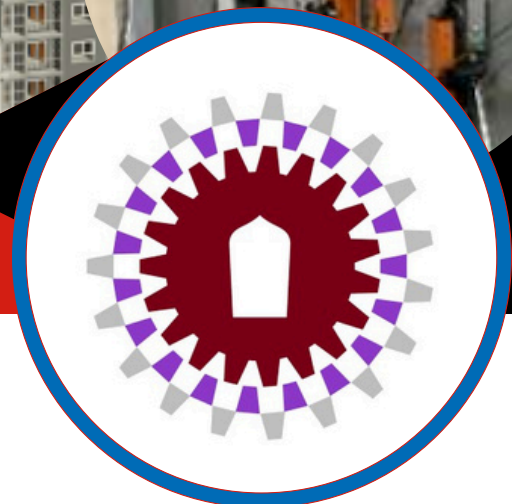




โครงการทางวิศวกรรมโยธา
รวมบทความประจำปีการศึกษา พ.ศ. 2568

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
SCHOOL OF ENGINEERING UNIVERSITY OF PHAYAO



โครงการทางวิศวกรรมโยธา ประจำปีการศึกษา 2568

วิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering : STR)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
วิเคราะห์สาเหตุและแนวทางการป้องกันของการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ตำบลดงเจน อำเภอกมยา จังหวัดพะเยา	รองศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ เขียวฉิน
การพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ	รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ชัยมาวัน
แผนที่ความเสียหายอุทกภัยอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พ.ศ. 2567	รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ชัยมาวัน

วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (Construction Material Engineering : MAT)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การทดสอบกำลังดึงคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ แซ่ล่อง
การทดสอบกำลังดัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ แซ่ล่อง
การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ แซ่ล่อง
การศึกษาโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ .ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ
การศึกษาโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน โดยเทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทนชัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ .ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ
การประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ .ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ

วิศวกรรมแหล่งน้ำ (Water Resource Engineering : WRE)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำอิงโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS	ดร.ขวัญสิรินภา ณะวงศ์
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าสำหรับกลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าโดยแบบจำลอง Hec-HMS	ดร.ขวัญสิรินภา ณะวงศ์
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าสำหรับกลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าโดยแบบจำลอง SWAT	ดร.ขวัญสิรินภา ณะวงศ์
การวิเคราะห์สมดุลน้ำเพื่อการบริหารจัดการน้ำ : กรณีศึกษาพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา	ดร.ขวัญสิรินภา ณะวงศ์
การประเมินพฤติการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอดีต ปัจจุบัน และอนาคตด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์ลาร์อโตมาตา (CA-ANN)	ดร.อนุจิตร ภูมิพันธ์
การจำลองผลกระทบที่เกิดจากเขื่อนฝ่งทลายต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมฉับพลัน	ดร.อนุจิตร ภูมิพันธ์
การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน: การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Machine Learning และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม	ดร.อนุจิตร ภูมิพันธ์
การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์	ดร.อนุจิตร ภูมิพันธ์

วิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering : GTE)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การศึกษาอิทธิพลของรูปร่างวัสดุเม็ดบนกลไกการพัดพาของการไหลจากเศษวัสดุธรรมชาติไหล : การศึกษาจากแบบจำลองทางกายภาพ	รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัธ ประอ้าย
การปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวมวลเพื่อความยั่งยืน	รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
การพัฒนากำลังอัดและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย	รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
การศึกษาสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลเพื่อความยั่งยืน	รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
คุณลักษณะการหดตัวและกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย	รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
ผลของการใช้ผักตบชวาและเศษคอนกรีตในดินซีเมนต์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี
การประเมินพฤติกรรมทางธรณีวิศวกรรมและการศึกษาสมบัติเชิงกลในชั้นตะกอยกึ่งแข็งตัว : กรณีศึกษาอุโมงค์พะเยา ฝั่งด้านเหนือ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี

วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ (Intelligent Transportation, Traffic and Logistic Engineering : TRL)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การประเมินความปลอดภัยทางถนนในช่วงเส้นทางภูเขาของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 120 ด้วยวิธีตามแนวทางของโครงการประเมินถนนระหว่างประเทศ (iRAP)	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณพล ศรีศักดิ์ดา
การศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ในเส้นทางภูเขาของถนน 4 ช่องจราจร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณพล ศรีศักดิ์ดา

การประยุกต์ใช้มาตรฐานการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งสาธารณะ สำหรับการพัฒนาสถานีรถไฟในพื้นที่จังหวัดพะเยา บนเส้นทางรถไฟทางคู่สายเด่นชัย - เชียงของ	ดร.ปาลิณี สุมิตสวรรค์
---	-----------------------

วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Survey and Geographic Information System Engineering : SGI)

- ไม่มี -

วิศวกรรมบริหารงานก่อสร้างและการจัดการ (Construction Engineering and Management : CEM)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความแข็งแรงเชิงสเปกตรัมกับต้นทุนเหล็กเสริม กรณีศึกษา อาคารเรียน 4 ชั้น	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บัวกล้า
การพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อการประมาณราคาด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บัวกล้า
การพัฒนาส่วนเสริมเพื่อวิเคราะห์หาค่าถ่ายเทความร้อนของอาคารเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บัวกล้า
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อการบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก : กรณีศึกษาอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์	อาจารย์ ฤทธิ์ยุทธ ก้อนทอง
การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศเพื่อปรับปรุงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคาร : กรณีศึกษาอาคารพักอาศัย 7 ชั้น	อาจารย์ ฤทธิ์ยุทธ ก้อนทอง
การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่ 3 สำหรับธุรกิจขนาดเล็ก กรณีศึกษาร้านพักอาศัยในจังหวัดลำปาง	อาจารย์ ฤทธิ์ยุทธ ก้อนทอง



วิเคราะห์สาเหตุและแนวทางการป้องกันของการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ตำบลดงเจน อำเภอภูพาน จังหวัดพะเยา

Analysis of causes and prevention methods of cracking of reinforced concrete columns in Dong Jen Subdistrict, Phukamyao District, Phayao Province

ธนธรณ์ ไชยบำรุง^{1*} ณัฐภูมิ ทิศา² ณัฐวดี พรหมเลิศ³ และศศิวิมล ตูพิลา⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101878@up.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของการแตกร้าวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นในพื้นที่ตำบลดงเจน อำเภอภูพาน จังหวัดพะเยา เพื่อเสนอแนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาดังกล่าว จากการสำรวจภาคสนามพบว่ารอยแตกร้าวของเสามีลักษณะเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของคลอไรด์ในดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา โดยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำ ดิน และคอนกรีตเพื่อตรวจวัดปริมาณคลอไรด์ พบว่าปริมาณคลอไรด์ในน้ำใต้ดินมีค่า 336–649 mg/L และในดินเฉลี่ย 454–511 mg/L ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดสำหรับน้ำผสมคอนกรีต การทดลองได้ศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวคอนกรีตในการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และศึกษาการใช้เหล็กเสริมชนิดพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) เพื่อทดแทนเหล็กเสริมทั่วไป ผลการทดสอบพบว่าสารเคลือบผิวสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตได้ในระดับหนึ่ง โดยตัวอย่างที่ทาสารกันซึมมีปริมาณคลอไรด์เพียง 0.222% ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ทาสีมีค่า 0.355–0.443% นอกจากนี้ เสาคอนกรีตที่เสริมเหล็ก GFRP มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด 1873 kN เมื่อใช้เหล็กปลอกขนาด 9 mm ระยะเรียง 100–125 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเหล็ก GFRP สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าเหล็กปลอก GFRP ขนาด 6 mm และลดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการป้องกันและบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนคลอไรด์สูงได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การแตกร้าวของคอนกรีต, คลอไรด์, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม, สารเคลือบผิวคอนกรีต, เหล็กเส้น GFRP

Abstract

This study investigates the causes of cracking in reinforced concrete columns observed in Dong Jen Subdistrict, Phukamyao District, Phayao Province, Thailand, and proposes preventive and remedial strategies. Field inspections revealed that the column cracks primarily resulted from steel reinforcement corrosion associated with chloride contamination in local soil and groundwater. Samples of water, soil, and concrete were collected for chloride concentration analysis. The results showed that chloride concentrations in groundwater

ranged from 336 to 649 mg/L, and in soil averaged 454–511 mg/L—both exceeding the standard limits for concrete mixing water. Experimental tests were conducted to evaluate the effectiveness of surface coating materials in reducing chloride penetration and to assess the performance of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars as a substitute for conventional steel reinforcement. The findings indicated that coated concrete specimens exhibited significantly lower chloride contents (0.222%) compared to those mixed with normal and local groundwater (0.355–0.443%). Moreover, GFRP-reinforced concrete columns achieved a maximum compressive load of 1873 kN when reinforced with 9 mm GFRP stirrups spaced at 100–125 mm, demonstrating superior compressive strength compared to 6 mm GFRP stirrups and effectively mitigating reinforcement corrosion. The outcomes of this research provide practical guidance for the sustainable prevention and maintenance of reinforced concrete structures in chloride-contaminated environments.

Keywords: Concrete cracking, Chloride contamination, Reinforcement corrosion, Surface coating, GFRP rebar

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นระบบโครงสร้างหลักที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างอาคารบ้านเรือนทั่วไป เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถรับน้ำหนักได้ดีทั้งแรงอัดจากคอนกรีตและแรงดึงจากเหล็กเสริม อย่างไรก็ตาม ความเสียหายหรือการแตกร้าวขององค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น เสา อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของอาคาร ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีรายงานจากประชาชนในเขตตำบลดงเจน จังหวัดพะเยา เกี่ยวกับการแตกร้าวของเสาคอนกรีตจากการเกิดสนิมในบ้านพักอาศัยหลายหลังโดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะเฉพาะคือเกิดขึ้นกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่ทราบสาเหตุที่ชัดเจน และพบในหลายจุดของตำบลเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวสร้างความวิตกกังวลให้แก่ผู้อยู่อาศัย เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อ



ความมั่นคงปลอดภัยของโครงสร้างอาคารในระยะยาว และอาจนำไปสู่ความเสียหายทางเศรษฐกิจและชีวิตหากไม่ได้รับการตรวจสอบอย่างรอบด้าน จากสถานการณ์ดังกล่าว ผู้ศึกษาจึงได้ดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างในพื้นที่ ได้แก่ คอนกรีต ดิน และน้ำ เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและทางเคมีอย่างละเอียด เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการแตกร้าว อันอาจมีที่มาจากปัจจัยภายนอก เช่น สภาพดิน น้ำใต้ดิน หรือปัจจัยภายใน

เหล็กเส้นชนิด GFRP ได้ถูกนำมาใช้ทั้งในงานโครงสร้างทั่วไปและงานโครงสร้างเฉพาะทางที่ต้องการลดปัญหาการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมวัสดุชนิดนี้มีจุดเด่นที่สำคัญคือมีอายุการใช้งานยาวนาน ไม่เป็นสนิม และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลต่อคอนกรีต เหล็กเส้น GFRP มีข้อดีสำคัญคือสามารถรับแรงดึงได้มากกว่าเหล็กเส้นทั่วไป แต่ในทางกลับกัน ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นกลับมีค่าต่ำกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า ทำให้เมื่อใช้ GFRP เป็นวัสดุเสริมแรงในโครงสร้างคอนกรีต พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา การนำ GFRP มาใช้เป็นเหล็กเส้นรับแรงดึงมักส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตที่มีความกว้างมากขึ้น และเมื่อถูกใช้งานร่วมกับคอนกรีตภายใต้แรงอัดก็มีความโน้มเอียงต่อการโก่งเดาะได้ง่ายกว่าปกติ ดังนั้นจึงศึกษาลักษณะการรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นเหล็กเสริมแรงอัดในเสาคอนกรีตสั้น

การศึกษานี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากผลการศึกษาหาที่มาของปัญหา และนำไปสู่การเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขหรือป้องกันการแตกร้าวของเสาคอนกรีตในอนาคต ทั้งในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบในปัจจุบัน และพื้นที่อื่นที่มีลักษณะภูมิประเทศหรือสภาพแวดล้อมคล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสามารถเป็นองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อวิศวกรช่างก่อสร้าง หน่วยงานท้องถิ่น และประชาชนทั่วไป ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างและการดูแลรักษาอาคารอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการแตกร้าวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตตำบลเจดีย์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดพิจิตร

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอนกรีต และน้ำที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายของโครงสร้าง

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาการแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบและพื้นที่ใกล้เคียง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ดำเนินการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่มีโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบการแตกร้าวในพื้นที่ตำบลเจดีย์ อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดพิจิตร

1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาครอบคลุมเฉพาะเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารพักอาศัยและอาคารขนาดเล็กในพื้นที่ศึกษาไม่ครอบคลุมโครงสร้างประเภทอื่น เช่น คาน พื้น หรือเสาเข็ม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบและพื้นที่ใกล้เคียง

1.4.2 สามารถนำผลการศึกษาไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขและป้องกันปัญหาในงานก่อสร้างทั้งในปัจจุบันและอนาคต

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาเหตุการแตกร้าวหรือความเสียหายในคอนกรีต [1]

สาเหตุการแตกร้าวในคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 3 สาเหตุหลัก คือ สาเหตุด้านกายภาพ สาเหตุด้านเคมี และสาเหตุด้านกล

2.1.1 สาเหตุความเสียหายทางด้านกายภาพ

สาเหตุด้านกายภาพ (Physical Causes of Deterioration) ปัจจุบันส่วนใหญ่มาจาก แรงดึงที่กระทำต่อคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ คือ ความเสียหายโดยน้ำแข็ง ความเสียหายโดยความร้อนและไฟ ความเสียหายโดยความล้า ความเสียหายโดยอุบัติเหตุ และความเสียหายโดยน้ำหนักบรรทุกทุก

2.1.2 สาเหตุความเสียหายทางด้านเคมี

ความเสียหายอันเกิดจากสาเหตุด้านเคมีมีหลายประการ และความรุนแรงของแต่ละกรณีจะแตกต่างกัน โดยมีต้นเหตุสำคัญหลักๆ จาก

ความเสียหายโดยซัลเฟต ซัลเฟตจะกัดกร่อนต่อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยปฏิกิริยาจะเกิดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ก่อให้เกิดยิปซัม และเอทริงไต์ (Ettringite, Calcium Sulphoaluminate) ก่อให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตจนเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งอัตราการเสียหายจะมากหรือน้อยจะแปรผันตรงกับปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เป็นส่วนผสมหลักในปูนซีเมนต์

ความเสียหายโดยกรดต่างๆ ซึ่งกรดจะกัดกร่อนซีเมนต์เพสต์ ถ้าคอนกรีตต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด (pH 6 หรือต่ำกว่า)

ความเสียหายจากปฏิกิริยาระหว่างต่างกับหิน เป็นปฏิกิริยาระหว่างต่างที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อหินที่มีปริมาณอัลคาไล (Alkali) เพียงพอ มีองค์ประกอบซิลิกา (Silica) ที่ไวต่อปฏิกิริยา และมีปริมาณน้ำเพียงพอ โดยลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น จะเป็นลักษณะการแตกร้าวกระจายไปทั่วพื้นที่ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ผิวคอนกรีตหลุดร่อน และสูญเสียกำลังอัด

การกัดกร่อนเหล็กเสริม มีสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ 1. การกัดกร่อนเนื่องจากความเป็นต่างของคอนกรีตลดลง ความเป็นต่างในคอนกรีตจะสร้าง Passivation Film เคลือบเหล็กเสริมคอนกรีตไว้ เป็นตัวป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน โดยสาเหตุที่ทำให้ความเป็นต่างลดลง ได้แก่ การชะล้าง (Leaching) และการทำให้คอนกรีตเป็นกลาง (Neutralization) จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอื่นๆ ที่จะลดค่า pH ในเนื้อคอนกรีต จาก 12.5 เป็น 9.0 หรือต่ำกว่า จนทำให้ Passivation Film ถูกทำลาย ลักษณะความเสียหายจะเกิดเป็นสนิมสีน้ำตาล แล้วเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีต

2. การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ แหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมาจากภายในคอนกรีต เช่น จากมวลรวม น้ำยาผสมคอนกรีตโดยเฉพาะน้ำยาเร่งการก่อตัว น้ำผสมคอนกรีต เป็นต้น หรืออาจมาจากภายนอกคอนกรีต เช่น จากน้ำทะเล จากพื้นดิน เป็นต้น ซึ่งเกลือคลอไรด์นี้จะซึมคลอไรด์อิสระที่ละลายน้ำเข้าไปปฏิกิริยากับเหล็กเสริม โดยทำลาย Passivation Film บางบริเวณ จนทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ลักษณะความเสียหายจะเกิดเป็นสนิมสีดำ เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีตเมื่อมีปฏิกิริยา



มากแล้ว ความเสียหายจะรุนแรง เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมจะเล็กลงเนื่องจากการกัดกร่อน

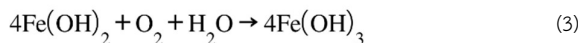
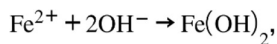
2.1.3 สาเหตุความเสียหายทางด้านกล

ความเสียหายด้านกล (Mechanical Causes of Deterioration) มักเกิดจากการถูกเสียดสีกับผิวของคอนกรีต เช่น พื้น ถนน เป็นต้น ลักษณะความเสียหายผิวหน้าแตกเป็นฝุ่น ผิวหน้าร่อนเป็นแผ่น ผิวหน้าเป็นโพรง และผิวหน้าพองปูด

2.2 การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

เมื่อคอนกรีตมีสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ปะปนอยู่ คลอไรด์จะเริ่มแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนโครงสร้างก่อน แล้วค่อยๆ ซึมเข้าสู่เนื้อในของคอนกรีต เมื่อซึมไปจนถึงเหล็กเสริมก็จะเกิดการกัดกร่อนจนเกิดสนิมขึ้น หลังจากนั้นก็จะเกิดแรงดันขึ้นในคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากการขยายตัวของสนิม จนเป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดรอยแตกและหลุดแยกออกมา กระบวนการกัดกร่อนก็จะเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากมีช่องทางให้คลอไรด์ ออกซิเจน และน้ำเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่ายกว่าเดิม แล้วเหล็กเสริมก็จะถูกกัดกร่อนต่อไป

กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จากที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ เมื่อ Passivation Film ที่ คอยปกป้องเหล็กเสริมถูกทำลายลง ก็จะทำให้กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ต้องมีขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode) แคโทด (cathode) และตัวนำไฟฟ้าคอนกรีตที่มีความชื้นก็จัดว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างหนึ่ง โดยที่โลหะที่ฝังในคอนกรีตจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแคโทด กระแสไฟฟ้าก็จะทำการไหลจากแอโนด ไปสู่แคโทด ผลจากปฏิกิริยานี้จะทำให้เนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก Fe ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ แล้วแปรสภาพเป็น $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (สนิม) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวต้องอาศัยออกซิเจนและน้ำในการเกิดปฏิกิริยา โดยสามารถเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



2.3 การหาสารเคลือบบริเวณผิวของคอนกรีต

เพื่อเป็นการลดปริมาณการแทรกซึมไอออนของคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำ ได้มีการศึกษาการนำวัสดุเคลือบผิวชนิดต่างๆ มาใช้ในการต้านทานการแทรกซึมจากผิวก่อนเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต

Mottl et al. [2] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยวัสดุคริสตัลไลน์ (Crystalline Coating) ซึ่งเป็นวัสดุเคลือบผิวคอนกรีตชนิดหนึ่ง สำหรับเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำ ความชื้น และสารเคมี เพื่อด้านทานการแพร่ของไอออนคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชั่น เนื่องจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชั่น Passivation Film จะถูกทำลาย แล้วเหล็กเสริมก็จะถูกกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ที่ซึมเข้าคอนกรีต โดยทดสอบกับคอนกรีตขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ที่ยังไม่ได้ทาสารกันซึมไปจำลองการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติในห้องที่มีการควบคุม CO_2 3% เป็นเวลา 365 วัน จากนั้นนำมาหาสารเคลือบผิวคอนกรีต แล้วนำไปแช่ในสารละลาย $NaCl$ 3% ผลการทดสอบพบว่าการเคลือบผิวด้วยคริสตัลไลน์ช่วยลดการแพร่ของไอออนคลอไรด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์บริเวณผิวถึง 0.68

เท่า และสามารถลดความลึก 20-25 มิลลิเมตร (บริเวณที่เหล็กเสริมมักอยู่) ได้ถึง 0.65 เท่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเคลือบผิว

Liao et al. [3] ได้ทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวคอนกรีต โดยเปรียบเทียบประเภทของสารเคลือบต่างๆ ได้แก่ สารเคลือบอะคริลิก (Acrylic) สารซิลิเกต (Silicate) สารอีพอกซี (Epoxy) และสารเคลือบชนิดเจาะลึก (Penetrating sealers) แล้วนำไปทดสอบด้วยวิธี Rapid Chloride Migration (RCM) เป็นวิธีทดสอบความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์แบบเร่งเวลาอาศัยสนามไฟฟ้า เพื่อเร่งให้ไอออนคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีต จากนั้นนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Diffusion Coefficient) เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ในสารเคลือบแต่ละชนิด จากผลการทดสอบพบว่าสารเคลือบอีพอกซีมีความสามารถในการลดการแพร่ของคลอไรด์ได้มากที่สุด ตามด้วยสารเคลือบแบบอะคริลิกมีประสิทธิภาพรองลงมา

2.4 การเสริมเหล็กเส้น GFRP ในเสาคอนกรีต

เพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต ในบางที่อาจจำเป็นต้องใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer) มาทำเป็นเหล็กเส้นเพื่อใช้ทดแทนเหล็กจริง

ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เลขที่ 2973 (มอก. 2973) ได้มีการกำหนดเหล็กเส้นที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมี 3 ประเภท [4] คือ เหล็กเส้น AFRP (Aramid-Fiber Reinforced Polymer) เหล็กเส้น CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer) และเหล็กเส้น GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer) เหล็กเส้น GFRP เป็นที่นิยมนำมาใช้ในประเทศไทยมากที่สุด มีกำลังดึงในช่วง 450-750 MPa ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและมีความอดุลยยืดหยุ่นประมาณ 60 GPa หากเทียบคุณสมบัติเชิงกลเหล็กเส้น GFRP มีกำลังดึงที่สูงกว่าเหล็กจริง จึงทำให้เหล็กเส้น GFRP เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่เสริมเหล็กเส้น FRP นั้น มีแนวทางการออกแบบตามมาตรฐาน ACI440 ซึ่งให้แนวทางการออกแบบโครงสร้างที่รับแรงดัดและแรงเฉือน แต่ไม่มีแนวทางการออกแบบโครงสร้างที่รับแรงอัด โดย ACI440.1 [5] ไม่แนะนำให้หาค่าความเค้นในเหล็กเส้น FRP มาออกแบบให้รับแรงอัด เนื่องจากเหล็กเส้น GFRP มีความอดุลยยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กถึง 3 เท่า จึงอาจส่งผลให้เหล็กเส้น GFRP เมื่อรับความเค้นอัดในโครงสร้างเสาแล้วเกิดการโก่งเดาะได้ง่ายกว่าเหล็กเส้นจริง ซึ่งอาจทำให้กำลังรับแรงอัดของเสามีค่าน้อยลงได้ จึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมมารับแรงอัดของโครงสร้างที่เสริมเหล็กเส้น GFRP เพื่อหาแนวทางการออกแบบโครงสร้างเสาที่เหมาะสม

การรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสมมติฐานว่าคอนกรีตและเหล็กเส้นตามยาวหดตัวเท่ากัน หรือมีความเครียดอัดในคอนกรีตและเหล็กเส้นตามยาวเท่ากัน เนื่องจากที่ความเครียดอัดปลายของคอนกรีต คอนกรีตจะถูกอัดแตกและเหล็กเสริมตามยาวจะถูกอัดจนเลยจุดครากโดยที่ไม่มีการโก่งเดาะของเหล็กเส้นตามยาว กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามมาตรฐาน ACI318 [6] จึงคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s \quad (4)$$

โดยที่ P_0 คือ กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก f'_c คือหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต



f_c คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
 A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริม

ในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก FRP หากยึดตามมาตรฐานการออกแบบ ACI440 กำลังอัดของเสาคอนกรีตจะรับโดยคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ไม่คิดผลของเหล็กเส้น GFRP ช่วยรับแรงอัด จึงสามารถเขียนสมการการคำนวณกำลังรับแรงอัดได้ดังสมการที่ (5)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) \quad (5)$$

Tobbi et al. [7] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ GFRP เป็นเหล็กเส้นตามยาวและเหล็กปลอก เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงและความเหนียว กลไกการวิบัติ และผลของรูปแบบและระยะเรียงของเหล็กปลอก โดยทดสอบกับเสาขนาด 350x350x1400 มิลลิเมตร รวม 8 ต้น คอนกรีตเปลา่ 1 ต้น เสริมเหล็กจริง 2 ต้น และเสริมเหล็ก GFRP 5 ต้น (ที่มีรูปแบบและระยะเรียงของเหล็กปลอกต่างกัน) ซึ่งเสริมเหล็ก GFRP ตามยาวขนาด 16 มิลลิเมตร และเหล็กปลอก GFRP ขนาด 13 มิลลิเมตร จากการทดสอบพบว่าในการนำ GFRP มาเป็นเหล็กเสริมคอนกรีตควรมีการโอบรัด (Confinement) ที่เพียงพอ สังเกตได้จากการลดระยะเรียงของเหล็กปลอกจาก 120 มิลลิเมตร เป็น 80 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มกำลังอัดได้มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้หากไม่คิดผลของเหล็กเส้น GFRP ตามสมการที่ (5) จะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ด้วยเหตุนี้จึงให้เหล็กเส้น GFRP ที่เป็นเหล็กเสริมตามยาวมีส่วนร่วมในการรับแรงอัดโดยให้ใช้กำลังอัด 0.35 เท่าของกำลังรับแรงดึงตามสมการที่ (6)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + 0.35f_u A_s \quad (6)$$

Abbas et al. [8] ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 250x250 มิลลิเมตร เสริมเหล็กตามยาว GFRP ขนาด 8 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร แล้วเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กจริงขนาด 8 มิลลิเมตร ที่มีระยะเรียง 6 8 และ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว จากการทดสอบพบว่าเหล็กปลอกที่เป็นเหล็กจริงมีความแข็งแรงที่จะป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่เป็น GFRP ได้เป็นอย่างดี โดยมีสมการที่ทำนายกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเพิ่มส่วนของเหล็กเส้น GFRP รับแรงอัดได้ดังสมการที่ (7)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + E_f \epsilon_f A_s \quad (7)$$

โดยที่ E_f คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้น GFRP

ϵ_f คือ ความเครียดอัดของเหล็กเส้น GFRP ที่จุดวิบัติของเสา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003

ในการทำนํายกกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP ต้องมั่นใจว่าเหล็กปลอกมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว GFRP และไม่ควรมีระยะเรียงเกิน 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว

สมบุรณ์ เชียงฉินและคณะ [9] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ GFRP เป็นเหล็กเส้นตามยาวและเหล็กปลอก เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP โดยที่คำนึงถึงการโก่งเดาะ โดยทดสอบกับเสาคอนกรีตทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ขนาด 250x250x450 มิลลิเมตร แล้วเสริมเหล็กตามยาว GFRP ขนาด 16

มิลลิเมตร และเหล็กปลอกขนาด 6 มิลลิเมตร ที่มีระยะเรียงต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP ที่มีความขะลุด L_e/D ไม่เกิน 6 จะไม่เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเส้น GFRP และมีการรับกำลังอัดประมาณ 0.65-0.70 เท่าของกำลังรับแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงอัดจะมีค่า 0.80 เท่าของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงดึง นอกจากนี้เหล็กปลอกที่มีการนำมาใช้มีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถควบคุมการโก่งเดาะของเหล็กตามยาว GFRP ได้ แม้ว่าจะมีระยะเรียงถี่ก็ตาม ในการทำนายกำลังอัดจึงเสนอให้ไม่ต้องคำนึงถึงคอนกรีตหุ้ม และกำลังอัดของเหล็กเส้น GFRP ต้องพิจารณา

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การสำรวจและวิเคราะห์สภาพปัญหาเบื้องต้น

เริ่มดำเนินการสำรวจภาคสนามเพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของการแตกร้าวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากผลการสำรวจเบื้องต้นได้ตั้งสมมติฐานการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ว่ามีสาเหตุมาจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิม จะมีปริมาตรขยายตัวและสร้างแรงดันภายใน จนทำให้เนื้อคอนกรีตโดยรอบเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการสังเกตการณ์ในพื้นที่วิจัย พบการปรากฏของคราบขาวลักษณะคล้ายคราบเกลือ บนผิวของเสาคอนกรีตที่แตกร้าว ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ที่นำไปสู่การตั้งสมมติฐานว่า การกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีปัจจัยเร่งที่สำคัญมาจากการปนเปื้อนของคลอไรด์ในระดับสูง



รูปที่ 3.2 คราบขาวลักษณะคล้ายเกลือบบริเวณผิวหน้าคอนกรีต

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในสภาพแวดล้อม

เพื่อพิสูจน์สมมติฐานข้างต้น จึงดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุ 3 ชนิด นำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) โดยใช้วิธีการไทเทรต [10-12] ซึ่งได้แก่ ตัวอย่างน้ำ (น้ำบาดาลและน้ำผิวดิน)



ตัวอย่างดินในบริเวณพื้นที่วิจัย และตัวอย่างผงคอนกรีตจากเสาที่เสียหาย

3.2.1 วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำ [10]

1. สารที่ต้องใช้ในการทดสอบ

- 1.1 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 1.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2), 30%

- 1.3 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl), 0.025 N
- 1.4 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate, $AgNO_3$), 0.025 N
- 1.5 โพแทสเซียมโครเมต (Potassium Chromate, K_2CrO_4), 50%

- 1.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
- 1.7 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4), (1:19)
- 1.8 ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein indicator solution)

2. อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ

- 2.1 บีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร (Beaker, 10 ml)
- 2.2 ปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร (Pipette, 5 ml)
- 2.3 ลูกยางปิเปต (Rubber pipette bulb)
- 2.4 กระดาษวัดค่ากรด-เบส (pH Paper)
- 2.5 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร (Erlenmeyer Flask, 125 ml)

- 2.6 บิวเรตต์ ขนาด 50 มิลลิลิตร (Burette, 50 ml)
- 2.7 หลอดหยด (Dropper)
- 2.8 กระบอกตวง (Cylinder)
- 2.9 จานפורซเลนสีขาว (White Porcelain Dish)

3. ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย*

3.1 การเตรียมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.025 N (NaCl, 0.025 N) ทำการชั่ง NaCl ที่ผ่านการอบแห้งแล้วน้ำหนัก 1.4613 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการมาตรฐานด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐาน

3.2 การเตรียมซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.025 N ($AgNO_3$, 0.025 N) ทำการชั่ง $AgNO_3$ น้ำหนัก 4.2473 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3.3 การเตรียมโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ทำการชั่ง K_2CrO_4 น้ำหนัก 50.00 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเติม $AgNO_3$ เล็กน้อยจนเกิดตะกอนสีแดง ทั้งไว้ในที่มืด 24 ชั่วโมง กรองตะกอนออก และเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

3.4 การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ทำการชั่ง $AgNO_3$ น้ำหนัก 10.00 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3.5 การเตรียมกรดซัลฟิวริก (H_2O_2), (1:19) ตวงปริมาตร H_2O_2 1 ส่วน ต่อ ปริมาตรน้ำกลั่น 19 ส่วน

*ในการเตรียมแต่ละสารอาจต้องเทียบบัญญัติโดยยงศ์ (Interpolate) ตามปริมาณสารที่จะใช้เพื่อไม่เป็นการเปลี่ยนสารเคมี

4. ขั้นตอนการทดสอบ

4.1 ตวงตัวอย่างน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในจานฟอร์ซเลนสีขาว หากมีไอออนซัลไฟต์ อยู่ให้เติมสารละลาย Hydrogen Peroxide (H_2O_2) 0.5 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง และผสมให้เข้ากัน

4.2 ปรับค่า pH ของตัวอย่างให้อยู่ใกล้ 8.3 โดยใช้สารละลาย NaOH หรือ H_2SO_4 โดยตรวจสอบด้วยสารชี้วัดฟีนอล์ฟทาลีน

4.3 เติมน้ำละลาย K_2CrO_4 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เป็นตัวชี้วัด ทำให้สารละลายมีสีเหลือง

4.4 ไทเทรตด้วยสารละลาย $AgNO_3$ มาตรฐาน 0.025 N จากบิวเรต จนเกิดสีแดงอิฐของ Ag_2CrO_4 คงอยู่ทั่วสารละลาย ถือเป็นจุดสิ้นสุด

4.5 ทำการยืนยันผลโดยใช้ตัวอย่างครึ่งหนึ่งของปริมาตรเดิม (เช่น 25 มิลลิลิตร) และไทเทรตซ้ำ หากปริมาตรที่ใช้เป็นครึ่งหนึ่งของครั้งแรก แสดงว่าไม่มีการรบกวน หากไม่ตรง ต้องพิจารณาสารรบกวน

5. การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำ

สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 9

$$Cl, mg / L = \frac{(V_1 - V_2) \times N \times 70.906}{S} \quad (8)$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างครึ่งหนึ่ง (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลาย $AgNO_3$

S คือ ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ไทเทรตครั้งแรก (มิลลิลิตร)

3.2.2 วิธีการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต [12]

1. สารที่ต้องใช้ในการทดสอบ

- 1.1 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 1.2 กรดไนตริก (Nitric Acid, HNO_3), (1:1)
- 1.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide), 30%
- 1.4 เมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ (Methyl Orange Indicator)
- 1.5 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl), 0.05 N
- 1.6 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate, $AgNO_3$), 0.05 N
- 1.7 โพแทสเซียมโครเมต (Potassium Chromate, K_2CrO_4), 4%
- 1.8 โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, $NaHCO_3$)

2. อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ

- 2.1 บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (Beaker, 250 ml)
- 2.2 ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร (Pipette, 10 ml)
- 2.3 ลูกยางปิเปต (Rubber pipette bulb)
- 2.4 แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- 2.5 กระดาษวัดค่ากรด-เบส (pH Paper)
- 2.6 เตาให้ความร้อน (Hot Plate)
- 2.7 ชุดกรองบูชเนอร์ (Buchner Funnel Suction Flask)
- 2.8 กระดาษกรอง เบอร์ 42 (Filter paper, NO.42)
- 2.9 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร (Erlenmeyer Flask, 125 ml)

- 2.10 บิวเรตต์ ขนาด 50 มิลลิลิตร (Burette, 50 ml)
- 2.11 หลอดหยด (Dropper)
- 2.12 กระบอกตวง (Cylinder)

3. ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย*

3.1 การเตรียมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ความเข้มข้น 4% ทำได้โดยชั่งโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) 4 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

3.2 การเตรียมซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.05 N ($AgNO_3$) ทำการชั่ง $AgNO_3$ น้ำหนัก 8.4938 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร



3.3 การเตรียมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 N (NaCl) ทำการชั่ง NaCl น้ำหนัก 2.9222 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3.4 การเตรียมโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 5% ทำการชั่ง K_2CrO_4 น้ำหนัก 5 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.5 การเตรียมกรดไนตริก (HNO_3 , (1+1)) ตวงปริมาตร HNO_3 1 ส่วน ต่อ ปริมาตรน้ำกลั่น 1 ส่วน

*ในการเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดและโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นอาจต้องเทียบบัญญัติโดยยังก์ (Interpolate) ตามปริมาณสารที่จะใช้เพื่อไม่เป็นการเปลี่ยนสารเคมี

4. ขั้นตอนการทดสอบ

4.1 ชั่งผงคอนกรีต 5 กรัม โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม นำมาใส่ใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.2 เติมน้ำกลั่นปริมาตร 75 มิลลิลิตร ลงไป แล้วเติม Nitric Acid, อัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 มิลลิลิตร ตามลงไปทันที โดยค่อยๆ เติมน้ำลงไป คอยคนผงคอนกรีตที่จับตัวกันเป็นก้อน (lumps) ให้แยกออกจากกัน ระหว่างนี้ถ้ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide) ให้เติม Hydrogen Peroxide, 30% ลงไป 3 มิลลิลิตร หากไม่มีกลิ่นก๊าซไข่เน่า ไม่จำเป็นต้องใส่ จากนั้นหยด Methyl Orange Indicator ลงไป 3 หยด ปิด Beaker ด้วยกระดาษฟอยล์แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที ถ้ามีสีเหลืองถึงสีเหลืองส้มปรากฏเหนือตะกอนอยู่ แสดงว่าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดไม่พอ ให้หยด Nitric Acid, อัตราส่วน 1:1 ลงไปเพิ่มแล้วคนไปเรื่อยๆ จนจนกระทั่งปรากฏเป็นสีชมพูหรือสีแดงเลือนๆ แล้วหยดสารละลายกรดไนตริกเพิ่มต่อไปอีกจำนวน 10 หยด

4.3 นำบีกเกอร์ไปต้มให้เริ่มเดือดด้วย hot plate แล้วนำออกโดยห้ามให้เดือดเกิน 1 นาที เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่าง จากนั้นรอให้อุ่นหมึกเย็นลง

4.4 ทำการกรองโดยใช้การกรองแบบดูด (suction filtering) นำ Filter paper, NO.42 มาล้างด้วยน้ำกลั่นในกรวยกรอง (Buchner funnel) ขนาด 250 หรือ 500 มิลลิลิตร พอให้กระดาษกรองแนบกับกรวยกรอง แล้วรองกรวยกรองด้วยขวดกรองแก้วกันโป่ง (filtration flask) จากนั้นประกอบสายยางดูดสุญญากาศ (Vacuum) เข้ากับขวดกรองแก้วกันโป่ง (filtration flask) และต่ออีกด้านของ vacuum เข้ากับก๊อกน้ำ จากนั้นทำการเปิดวาล์วน้ำเพื่อให้เป็นตัวสร้างแรงดูด จากนั้นเริ่มทำการกรองตัวอย่างอย่างช้าๆ เมื่อทำการกรองจนเสร็จให้ล้างบีกเกอร์ประมาณ 2 ครั้ง ด้วยน้ำกลั่นในปริมาณที่เล็กน้อย รวมถึงล้างกระดาษกรองด้วยเช่นกัน โดยปริมาตรสุดท้ายหลังจากการกรองเสร็จควรได้ปริมาตรเท่าๆ กันในกรณีที่ทำหลายชุดตัวอย่าง และมีปริมาตรหลังกรองห้ามเกิน 175 มิลลิลิตร

4.5 นำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดลูกขมพุนขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร (อาจใช้บีกเกอร์ที่เตรียมตัวอย่างที่ล้างสะอาดแล้วก็ได้) หลังจากนั้นเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ความเข้มข้น 4% ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH (ช่วงค่า pH ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 7-10)

4.6 นำตัวอย่างที่ผสมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) แล้ว เติมน้ำโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ลงไป 1 มิลลิลิตร

4.7 เริ่มไทเทรตด้วย Silver Nitrate ($AgNO_3$), 0.05 N ผ่าน Burette ขนาด 50 มิลลิลิตร ทำการไทเทรตอย่างช้าๆ จนถึงจุดสมมูล โดยให้สังเกตจากการเปลี่ยนสีของตัวอย่างจากสีเหลืองเป็นสีส้มก่อนไป

ทางแดงอิฐ แล้วทำการจดบันทึกปริมาณซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$), 0.05 N ที่ทำให้ตัวอย่างถึงจุดสมมูล

5. การทดสอบแบลงค์ (Blank)

ทำการเตรียมน้ำกลั่นในปริมาณที่เท่ากับปริมาณน้ำตัวอย่างที่ทำการไทเทรต แล้ว เติมน้ำโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) ลงไป 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการไทเทรตกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$), 0.05 N แล้วบันทึกปริมาตรสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้ ปริมาตรที่ได้จะเป็นตัวแปร V_2 ในสมการที่ 8

6. การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 8

$$Cl, \% = 3.545 \times \frac{(V_1 - V_2) \times N}{w} \quad (8)$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (Blank) ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลาย $AgNO_3$

w คือ น้ำหนักของตัวอย่างผงคอนกรีต (กรัม)

7. การทำมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน

ทำการละลายสารมาตรฐาน (Standardization) ทำเพื่อทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานที่ต้องการนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นทำได้โดยเปิดสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 0.05 N ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตรและโพแทสเซียมโครเมต 5% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ก่อนที่จะทำการนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต และจดบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานที่ใช้ไปเพื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$N = 0.25/V \quad (9)$$

โดยที่ N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต (มิลลิลิตร)

0.25 คือ มิลลิอควิวเลนต์ของสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ (5.0 มิลลิลิตร $\times$ 0.05 N)

3.3 การศึกษาแนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญห

3.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ดำเนินการหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100x100 มิลลิเมตร สูง 2000 มิลลิเมตร จำนวนทั้งสิ้น 11 ต้น โครงสร้างเหล็กเสริมประกอบด้วยเหล็กยืน (Longitudinal bars) 4 เส้น และเหล็กปลอก (Ties) ที่ระยะห่าง 500 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กเส้นกลม (Round bars) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีระยะหุ้มคอนกรีต (Concrete cover) 25 มิลลิเมตร กำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน จะมีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 25 MPa

ตัวอย่างทั้ง 11 ต้นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามเงื่อนไขของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตและสารเคลือบผิว ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เสาคอนกรีตที่ใช้น้ำประปา (ควบคุมปริมาณคลอไรด์) ใน การผสม จำนวน 7 ต้น แบ่งเป็น:

ไม่มีการทาสารเคลือบป้องกันการซึม จำนวน 3 ต้น



มีการหาสารเคลือบป้องกันการซึมที่ผิว จำนวน 4 ต้น
กลุ่มที่ 2 เสาคอนกรีตที่ใช้น้ำจากพื้นที่วิจัย (มีปริมาณคลอไรด์สูง)
ในการผสม จำนวน 4 ต้น เพื่อจำลองสภาวะการปนเปื้อนคลอไรด์ภายใน
เนื้อคอนกรีต

จากนั้น นำตัวอย่างเสาทั้งหมดไปติดตั้งในพื้นที่วิจัยจริง โดยการฝัง
ลงในดินลึก 100 เซนติเมตร เพื่อจำลองสภาวะการสัมผัสกับความชื้น
และคลอไรด์จากน้ำใต้ดิน เป็นการจำลองสภาพแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับ
สภาพการใช้งานจริงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การฝังตัวอย่างเสาคอนกรีตในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

2. การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล

ดำเนินการเก็บตัวอย่างผกอนกรีตจากเสาทดสอบทุก 2 เดือน เป็น
ระยะเวลาต่อเนื่อง 6 เดือน โดยใช้วิธีเจาะเก็บผกอนกรีตที่ 2 ระดับความสูง
ที่แตกต่างกัน ได้แก่

ระดับที่ 1 บริเวณโคนเสา (สูงจากระดับผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร)

ระดับที่ 2 บริเวณกลางเสา (สูงจากระดับผิวดินประมาณ 50 เซนติเมตร)

นำตัวอย่างผกอนกรีตที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์เพื่อพิสูจน์
สมมติฐานที่ว่า การแทรกซึมของคลอไรด์มาจากน้ำใต้ดินเป็นหลัก และเพื่อ
ประเมินประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวในการป้องกันการแทรกซึมของคลอ
ไรด์ (โดยเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่มที่ไม่ได้ทาสารกันซึมและกลุ่มที่มีการทา
สารกันซึม) รวมถึงศึกษาอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ในสภาวะที่มีการ
ปนเปื้อนภายในเนื้อคอนกรีตอยู่ก่อนแล้ว (โดยเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่ม
1 ที่ไม่ได้ทาสารกันซึม และกลุ่มที่ 2)

3.3.2 การศึกษาการใช้วัสดุทดแทนเหล็กเสริมเพื่อแก้ปัญหาการกีด กร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

เพื่อเป็นแนวทางแก้ไขปัญหการเกิดสนิมในระยะยาว การวิจัยในส่วนนี้
จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุทางเลือก ได้แก่ **เหล็กเสริมพอลิเมอร์เสริม
ใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer: GFRP)** เพื่อทดแทน
เหล็กกล้าเสริมคอนกรีต (Conventional Steel Rebars) ซึ่งมีปัญหาด้าน
การกัดกร่อน

เสาคอนกรีตที่เสริมด้วย GFRP มีรูปแบบการวิบัติที่สำคัญคือ การโก่ง
เดาะของเหล็กยื่น [9] (Buckling of longitudinal bars) ซึ่งระยะห่าง
ของเหล็กปลอก เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าว ดังนั้น
วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อหาระยะห่างของเหล็ก
ปลอก GFRP ที่เหมาะสมในการโอบรัด และช่วยป้องกันการโก่งเดาะของ
เหล็กยื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบแรงดึงและ
แรงอัดกับเหล็กเส้น GFRP ส่วนที่ 2 เป็นทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 25x25
เซนติเมตร เสริมเหล็กเส้น GFRP ให้รับแรงอัดตามแนวแกน พารามิเตอร์ที่
ทำการศึกษาคือ ขนาด และระยะเรียงเหล็กปลอก

1. การทดสอบให้แรงดึงกับเหล็กเส้น GFRP

การทดสอบรับแรงดึงจะเตรียมตัวอย่างโดยนำเหล็กเส้น GFRP ขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ไปกลึงให้มีขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลางลดลงเหลือ 5 มิลลิเมตร เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการ
ขาดในช่วงนี้เมื่อทำการทดสอบ และจะติดตั้งเครื่องวัดระยะยืด
(Extensometer) ในช่วง 50 มิลลิเมตร เพื่อนำมาหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น การ
ทดสอบจะให้แรงดึงด้วยเครื่องอเนกประสงค์ ดังรูปที่ 3.4

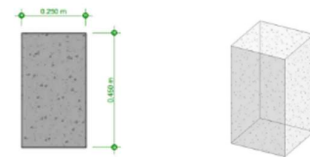


รูปที่ 3.4 การทดสอบรับแรงดึงโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

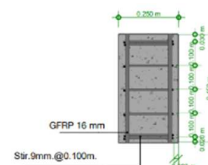
2. วิธีการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก GFRP

2.1 การเตรียมตัวอย่างและทดสอบกำลังรับแรงอัด

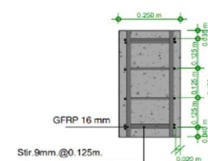
ดำเนินการจัดทำตัวอย่างเสาสั้นคอนกรีตเพื่อรับแรงอัดตาม
แนวแกน จำนวน 4 ต้น ขนาด 250x250 มิลลิเมตร และสูง 450 มิลลิเมตร
เสริมเหล็ก GFRP เป็นเหล็กเสริมตามยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากับ
16 มิลลิเมตร และเสริมเหล็ก GFRP เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร เป็น
เหล็กปลอก โดยมีระยะเรียงที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.5 และทำการเก็บ
กำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกอายุ 28 วัน



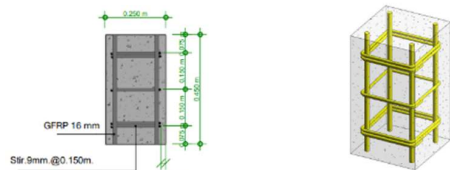
(ก) S000



(ข) S100



(ค) S125



(ง) S150

รูปที่ 3.5 รายละเอียดการเสริมเหล็กเส้น GFRP

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

นำตัวอย่างเสาทั้ง 4 ต้น ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวนแกน (Axial compression test) ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดขนาด 3,000 kN เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังและสังเกตรูปแบบการวิบัติที่สัมพันธ์กับระยะห่างของเหล็กปลอกที่แตกต่างกัน การเคลื่อนที่ของเคลื่อนที่ของแท่นอัดจะวัดโดยใช้อุปกรณ์ LVDT ค่าแรงอัด ระยะการเคลื่อนที่ของแท่นอัด และความเคื่อยอดจะถูกบันทึกไว้

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ของน้ำในพื้นที่วิจัย

จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์เจือปนอยู่ เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานที่ระบุถึงปริมาณคลอไรด์วิกฤตของน้ำในสภาพแวดล้อม จึงอ้างอิงจาก NRC Generic Ageing Lesson Learned (GALL) [13] ต้องมีปริมาณคลอไรด์ที่เจือปนไม่เกิน 500 mg/L โดยผลการทดสอบน้ำใต้ดินมีปริมาณคลอไรด์ 649 mg/L และน้ำที่ได้จากการขุดผิวดินมีปริมาณคลอไรด์ 336 mg/L

4.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ของดินในพื้นที่วิจัย

ปริมาณคลอไรด์ในดินมีแหล่งกำเนิดจากทั้งกระบวนการธรรมชาติ เช่น การผุพังของหินและแร่ รวมถึงการตกสะสมจากฝน และจากกิจกรรมของมนุษย์ คลอไรด์เป็นไอออนที่เคลื่อนที่ได้ง่ายในดิน จึงสามารถแพร่กระจายลงสู่ระบบน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ในดินและน้ำจึงมีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งบริเวณบ้านที่ทำการวิจัยได้เก็บตัวอย่างดินมาทดสอบ 2 บริเวณ พบปริมาณคลอไรด์ 511 mg/L และ 454 mg/L

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวเพื่อป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

จากการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ฝังดินและวางบนดินเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าค่าคลอไรด์ของคอนกรีตทุกตัวอย่างมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตาม มยพ.1332-5 [14] ไม่เกิน 0.45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งบริเวณใต้ดินที่ทำการฝังเสาตัวอย่างมีการสัมผัสกับน้ำใต้ดินที่มีคลอไรด์เจือปนอยู่ ปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใต้ดินจึงมีมากกว่าบริเวณที่อยู่บนดิน เมื่อมีการทาสารกันน้ำซึมที่บริเวณใต้ดิน ปริมาณคลอไรด์ตัวอย่างนี้จึงมีน้อยกว่าบริเวณใต้ดินของเสาตัวอย่างต้นอื่น โดยปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างที่ระยะเวลา 6 เดือน

ปริมาณคลอไรด์ (%) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน		
คอนกรีตผสมน้ำ สะอาด	คอนกรีตที่ ผสมน้ำในพื้นที่	คอนกรีตผสมน้ำสะอาด และทาสารกันซึม
0.355	0.443	0.222

ภายในตัวอย่างเสาที่ถูกฝังในสภาพแวดล้อมจริง เหล็กเสริมคอนกรีตที่ประกอบด้วยเหล็กเส้น RB6 จำนวน 4 เส้น เหล็กปลอก RB6 มีระยะหุ้มคอนกรีต 25 มิลลิเมตร พบว่าตัวอย่างเสาคอนกรีตของทั้งกลุ่มที่ 1 ใช้น้ำสะอาด (ควบคุมปริมาณคลอไรด์) และกลุ่มที่ 2 ใช้น้ำในพื้นที่วิจัย ยังไม่ปรากฏสนิมขึ้น



(ก) คอนกรีตผสมน้ำคลอไรด์ (ข) คอนกรีตทาสารกันซึม (ค) คอนกรีตผสมน้ำปกติ
รูปที่ 4.1 ลักษณะของเหล็กเสริมในระยะเวลา 6 เดือน

4.4 ผลการศึกษาการใช้วัสดุทดแทนเหล็กเสริมเพื่อแก้ปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

ทดสอบเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดเฉลี่ยจากคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัด 36.28 MPa เสริมเหล็กเสริมหลัก GFRP ขนาด 16 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น และเหล็กปลอก GFRP ขนาด 9 มิลลิเมตร ที่มีระยะเรียง 100, 125, 150 มิลลิเมตร (ตัวอย่าง S100, S125, S150 ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับตัวอย่างไม่มีเหล็กปลอก (S000) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 4.3



(ก) S000



(ข) S100



(ค) S125

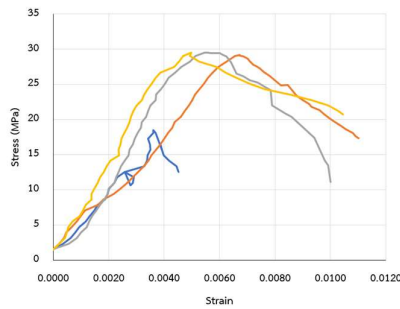


(ง) S150

รูปที่ 4.2 การทดสอบรับแรงดึงโดยเครื่องทดสอบเนกประสงค์

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการเสาคอนกรีต

ตัวอย่าง	แรงอัดสูงสุด (KN)	ความเค้นอัด (MPa)	ความเครียดอัด
S000	1173.96	18.49	0.0036
S100	1873.24	29.51	0.0050
S125	1873.24	29.51	0.0055
S150	1850.92	29.16	0.0067



รูปที่ 4.3 กราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมเหล็ก FRP ในเสาคอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่มีการเสริมปลอกให้ระยะเรียงมี (S100) ให้ค่าความเค้นอัดสูงสุดมากที่สุด (29.51 MPa) และมีพฤติกรรมการเสียรูปหลังจุดที่ความเค้นสูงสุดที่ดี แสดงถึงความเหนียวที่สูง ขณะที่เมื่อระยะเรียงปลอกเพิ่มขึ้น (S125 และ S150) ความเค้นอัดและความเหนียวมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง S000 มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดและพฤติกรรมเปราะ แตกหักรวดเร็วหลังถึงจุดที่ความเค้นสูงสุด สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเหล็กปลอก FRP ที่ดีในการโอบรัดคอนกรีตและเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสา

จากการทดสอบของสมบูรณ์และคณะ [9] ที่ได้ใช้เหล็กเสริมหลัก FRP ขนาด 16 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น และเหล็กปลอก FRP ขนาด 6 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด 1713 kN ที่ระยะเรียง 150 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในครั้งนี้ที่มีการเพิ่มขนาดเหล็กปลอก FRP เป็นขนาด 9 มิลลิเมตร จะพบว่าการรับแรงอัดสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 1851 kN ที่ระยะเรียง 150 มิลลิเมตร และสามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดที่ 1873 kN ที่ระยะเรียง 100, 125 มิลลิเมตร

5. สรุปผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของการแตกร้าวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นในพื้นที่ต่ำลงจน อำเภอภูพาน จังหวัดพะเยา รวมถึงศึกษาวิธีป้องกันและแนวทางแก้ไข โดยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุในพื้นที่ ได้แก่ คอนกรีต และน้ำ เพื่อทำการทดสอบทางเคมี และได้ทดลองใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต รวมถึงวัสดุเสริมแรงทางเลือกชนิด FRP ผลการศึกษาพบว่า รอยแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (Corrosion of Reinforcement) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride Penetration) ที่มีอยู่มากในดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่ โดยการตรวจวัดปริมาณคลอไรด์ในน้ำใต้ดินพบค่าระหว่าง 336–649 mg/L และในดินเฉลี่ย 454–511 mg/L ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสำหรับน้ำผสมคอนกรีต นอกจากนี้ การตรวจวัดคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตพบค่ามากกว่า 0.45% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามเกณฑ์ของ มยผ. จึงยืนยันได้ว่าการแตกร้าวมีสาเหตุหลักจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ถูกเร่งโดยคลอไรด์ แต่เนื่องจากระยะ 6 เดือนเป็นระยะเวลาที่สั้นในการสะสมของคลอไรด์เพื่อทำปฏิกิริยาไอออนในการลดค่า pH ของคอนกรีต Passive film ที่ป้องกันเหล็กเสริมยังไม่ถูกทำลาย เหล็กเสริมจึงยังไม่เกิดสนิม

ในการศึกษาการป้องกัน พบว่าสารเคลือบผิว สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับหนึ่ง โดยตัวอย่างเสาที่ทาสารเคลือบมีปริมาณคลอ

ไรด์สะสมเฉลี่ยเพียง 0.222 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้ทาสารเคลือบซึ่งมีค่า 0.355 เปอร์เซ็นต์

หากต้องการป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์จากสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่านี้ แนะนำให้ใช้วัสดุทดแทนเหล็กเสริมชนิด FRP

สำหรับการใช้วัสดุทดแทนเหล็กเสริมชนิด FRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) พบว่าเสาคอนกรีตที่เสริมด้วย FRP สามารถรับแรงอัดได้ดี โดยตัวอย่างที่มีการจัดระยะเหล็กปลอกถี่ (100 มิลลิเมตร) ให้กำลังอัดสูงสุด 29.51 MPa และมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบเหนียวกว่าตัวอย่างที่มีระยะปลอกห่างหรือไม่มีปลอก ซึ่งมีกำลังอัดต่ำสุดเพียง 18.49 MPa ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าระยะปลอกมีผลโดยตรงต่อการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริม FRP และส่งผลต่อกำลังอัดรวมของเสา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมบูรณ์ เชื้อเงิน ที่ให้คำปรึกษาในการทํางาน ตลอดจนการวิจัยแล้วเสร็จ

ขอบคุณ ดร. สุรเชษฐ์ ศรีนารา ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการเดินทางไปยังพื้นที่วิจัย

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ คุณอัญญา กันทะเนตร์ ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือ ให้ห้องปฏิบัติการทางเคมี

ขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนทุนการทำโครงการทางวิศวกรรมโยธาการศึกษา 2568

ขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนการใช้ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ในการทํางาน

ขอบคุณผู้พักอาศัยในพื้นที่ตำบลดงเจน อำเภอภูพาน จังหวัดพะเยา ที่ให้การสนับสนุนในการให้ข้อมูล และใช้พื้นที่ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] CPAC Concrete Academy. (2560). คอนกรีตเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์ CPAC Concrete Academy, หน้า 143-153.
- [2] Mottl, M., Pazderka, J., and Reiterman, P. (2025). Crystalline coating and its influence on chloride ion diffusion resistance of carbonated concrete. Coatings, 15(2), 163.
- [3] Liao, J., Wang, Y., Sun, X., Wang, Y. (2024). Chloride db9Penetration of Surface-Coated Concrete, 27, 4121.
- [4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 2973. (2562). พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [5] ACI Committee 440. (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. American concrete institute.
- [6] ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete and commentary. American concrete institute.
- [7] Tobbi, H., Farghaly, A.S. and Benmokrane, B. (2012). Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Structural Journal, 109(4), pp.551-558.
- [8] Abbas, H., Alanzi, M.A., Elsanadedy, H., Almusallam, T., Abadel, A. and Al-salloum, Y. (2023). Effect of tie spacing



- and GFRP rebar diameter on compression behavior of concrete columns. *Journal of Building Engineering*, 72, 106740, pp.1-21.
- [9] สมบูรณ์ เชียงฉิน, อนันต์ ชมชอบไพโรพณา, วรพงศ์ หน่อแก้ว, แสงหล้า มีนา และ ปรีดา ไชยมหาวัน (2568). พฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP และเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP ที่คำนึงถึงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 30.
- [10] ASTM Standard Test Method for Chloride Ion in Water, Annual Book of ASTM Standards D512-04, 2010.
- [11] Texas Department of Transportation, Determining Chloride and Sulfate Contents in Soil Tex-620-J, 2007.
- [12] ASTM Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, Annual Book of ASTM Standards C1152/C1152M, 2006, 04.02.
- [13] Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, NUREG-1801, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2010.
- [14] มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยผ.1332-55, ปรับปรุงครั้งที่ 1). (2555). กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.



การพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ

Development of a design-assistance worksheet for composite steel deck floor systems

นายศุภวิชญ์ กลิ่นอยู่^{1*} นางสาวอัจฉรา หรีจินดา²

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102611@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ (Composite Steel Deck Floor System) โดยใช้หลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 และมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปแบบไฟล์เวิร์กชีตซึ่งใช้งานง่ายและสามารถประมวลผลได้รวดเร็ว เพื่อช่วยวิศวกรในการออกแบบพื้นสำเร็จรูปประกอบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก โปรแกรมสามารถคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกทุก กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด กำลังต้านทานแรงเฉือน ความหนาของคอนกรีต การจัดวางเหล็กเสริม และการตรวจสอบความปลอดภัยตามหน่วยแรงต่าง ๆ ได้อย่างครบถ้วน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและสามารถใช้งานได้จริงในงานออกแบบทางวิศวกรรมโครงสร้าง

คำสำคัญ: แผ่นเหล็กประกอบ, โปรแกรมช่วยออกแบบ, ANSI/SDI C-2017, เวิร์กชีต, วิศวกรรมโครงสร้าง

Abstract

This research aims to develop a design-assistance program for composite steel deck floor systems based on the criteria set forth in ANSI/SDI C-2017 and other relevant international standards. The developed program is implemented in the form of a user-friendly worksheet that enables fast and accurate calculations to support engineers in designing composite floor systems comprising steel decking and reinforced concrete. The program is capable of calculating load-carrying capacities, concrete thickness, reinforcement layout, and verifying safety according to stress and strength requirements. Test results indicate that the program is accurate and practical for real-world structural engineering applications.

Keywords: Composite Steel Deck, Design Program, ANSI/SDI C-2017, Worksheet, Structural Engineering

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ (Composite Steel Deck Floor System) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างอาคารสมัยใหม่ โดยเฉพาะอาคารสูง โกดังอุตสาหกรรม และสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการลดน้ำหนักโครงสร้าง ลดเวลาในการก่อสร้าง และเพิ่มความเร็วในกระบวนการทำงาน เนื่องจากแผ่นเหล็กขึ้นรูปสามารถใช้แทนแบบหล่อได้ และทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างรับแรงเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว อย่างไรก็ตาม การออกแบบพื้นชนิดนี้ต้องคำนึงถึงพฤติกรรมร่วมของวัสดุสองชนิด ได้แก่ เหล็กรูปพรรณและคอนกรีต ซึ่งมีสมบัติทางกลศาสตร์ที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังต้องประเมินแรงดึง แรงเฉือน กำลังรับน้ำหนัก ความยาวช่วงพื้น รวมถึงการเสริมเหล็กในแนวทางที่สอดคล้องกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เช่น ANSI/SDI C-2017, AISC, และ ACI ซึ่งในทางปฏิบัติ วิศวกรมักประสบปัญหาด้านความยุ่งยากในการคำนวณ ความซับซ้อนของสูตร และการแปลผลข้อมูลด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาเครื่องมือหรือโปรแกรมที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการออกแบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ โดยควรอยู่ในรูปแบบที่ใช้งานง่าย เข้าถึงได้รวดเร็ว และสามารถตรวจสอบผลการคำนวณได้อย่างโปร่งใส งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเวิร์กชีต (worksheet) สำหรับช่วยในการออกแบบ โดยอ้างอิงตามแนวทางของมาตรฐานสากลและสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงของวิศวกรไทย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบในรูปแบบเวิร์กชีต ที่สามารถคำนวณค่าทางวิศวกรรมที่จำเป็นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว
2. เพื่อออกแบบฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 และแนวปฏิบัติทางวิศวกรรม
3. เพื่อประเมินความแม่นยำของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแบบดั้งเดิมหรือซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์



1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบเฉพาะระบบพื้นแบบแผ่นเหล็กประกอบที่มีลักษณะเป็นพื้นทางเดียว (One-way slab) โดยไม่รวมถึงพื้นชนิดพิเศษ เช่น พื้นไครนหรือพื้นสองทาง
- โปรแกรมพัฒนาในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel ซึ่งใช้สูตรและฟังก์ชันภายในสำหรับการคำนวณ โดยไม่พึ่งพาโปรแกรมภายนอกหรือ Add-in ใดๆ
- อ้างอิงหลักเกณฑ์การออกแบบจากมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 และ AISC สำหรับแผ่นเหล็ก และ ACI318 สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก
- ขอบเขตการวิเคราะห์เน้นไปที่การคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักภายใต้สถานะใช้งาน (serviceability) และสถานะวิกฤต (ultimate limit state) โดยไม่รวมการวิเคราะห์แบบ finite element

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้พัฒนาเครื่องมือช่วยออกแบบพื้นคอมโพสิตที่มีความถูกต้องและใช้งานง่าย เวอร์ชันที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยวิศวกรในการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ ความสามารถในการรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Live Load) และพฤติกรรมของพื้นคอมโพสิตได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยไม่ต้องอ้างอิงสูตรจากเอกสารหลายแหล่ง
- สามารถใช้เปรียบเทียบและตรวจสอบข้อมูลจากแคตตาล็อกของผู้ผลิตได้ โปรแกรมช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลพื้นคอมโพสิตจากบริษัทต่าง ๆ เช่น Lysaght และ MOD SUPPLIERS & SERVICE มาทดสอบความสอดคล้องกับผลคำนวณได้โดยตรง ซึ่งช่วยเพิ่มความมั่นใจในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุ
- ช่วยลดเวลาและความซับซ้อนในการออกแบบทางวิศวกรรม การใช้เวิร์กชีตช่วยออกแบบสามารถลดขั้นตอนการคำนวณซ้ำซ้อนที่ต้องอาศัยการคำนวณด้วยมือหลายขั้นตอน โดยเฉพาะในโครงการที่ต้องวิเคราะห์หลายกรณีของความหนาแน่นและช่วงพาด
- เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ออกแบบทางวิศวกรรมในอนาคต ผลลัพธ์ของโครงการนี้สามารถต่อยอดเป็นฐานข้อมูลหรือโปรแกรมออกแบบอัตโนมัติ (Automation Design Tool) เพื่อใช้ในงานโครงสร้าง
- บริษัทที่เกี่ยวข้องกับระบบพื้นแบบเหล็กประกอบสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณและออกแบบคุณสมบัติระบบพื้นประกอบได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ระบบแผ่นพื้นประกอบ (Composite Slab System) หมายถึงระบบพื้นชนิดหนึ่งที่มีการนำวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติทางกลแตกต่างกันมาใช้งานร่วมกัน ได้แก่ แผ่นเหล็กรีดลอน (Profiled Steel Deck) และคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้

วัสดุทั้งสองทำงานร่วมกันในการรับแรงดัดภายใต้ภาระบรรทุกใช้งานจริง องค์ประกอบของระบบ

- แผ่นเหล็กรีดลอน (Steel Deck) ทำหน้าที่เป็น แบบหล่อถาวร (Permanent Formwork) ในระหว่างการเทคอนกรีตหลังคอนกรีตแข็งตัวแล้วแผ่นเหล็กจะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างที่รับแรงดึง ในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวแล้วแผ่นเหล็กจะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างที่รับแรงดึงในขณะเกิด โมเมนต์ดัดเนื่องจากอยู่ด้านล่างของหน้าตัดมักผลิตจากเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (Galvanized Steel) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน
- คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete) เทอยู่เหนือแผ่นเหล็ก และจะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบรับแรงอัดของพื้น หลังจากคอนกรีตแข็งตัวเต็มที่ การเสริมเหล็กในคอนกรีต (เช่น ลวดตาข่ายเหล็ก หรือเหล็กเสริมแนวล่าง) จะใช้เพื่อควบคุมรอยร้าว และเพิ่มความสามารถในการรับแรง

หลักการการทำงานของระบบพื้นประกอบ หลังจากคอนกรีตแข็งตัว ระบบพื้นจะทำงานเสมือนเป็นคานคอมโพสิต (Composite Beam) ที่วัสดุทั้งสองทำงานร่วมกัน โดยมีหลักสำคัญคือการ ถ่ายแรงเฉือน (Shear Transfer) ระหว่างแผ่นเหล็กกับคอนกรีต ซึ่งอาศัยแรงยึดเหนี่ยวทางกลจากรอยหยัก (Embossments) หรือรูปทรงของแผ่นเหล็ก และในบางระบบอาจใช้ สลักเฉือน (Shear Studs) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยว

ความสามารถในการถ่ายแรงเฉือนนี้จะเป็นตัวกำหนดว่าโครงสร้างจะทำงานในรูปแบบใดระหว่าง:

- Full Composite Action – มีการถ่ายแรงเฉือนเต็มที่ วัสดุทั้งสองทำงานเป็นเนื้อเดียวกัน
- Partial Composite Action – มีการสลิบล้าง แต่ยังทำงานร่วมกันได้บางส่วน
- Non-composite Action – ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวเพียงพอ วัสดุแต่ละชนิดทำงานแยกกัน

คุณสมบัติของระบบแผ่นพื้นประกอบ (Composite Slab System)

- เป็นระบบคอมโพสิตระหว่างเหล็กและคอนกรีต ระบบแผ่นพื้นประกอบเป็นการรวมวัสดุสองชนิดที่มีพฤติกรรมแตกต่างกัน คือ แผ่นเหล็กรีดลอน (Profiled Steel Deck) และ คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของวัสดุในลักษณะ “Composite Action” ซึ่งทำให้น้ำตดโครงสร้างสามารถรับแรงดัดได้มากกว่าการใช้วัสดุชนิดเดียว
- แผ่นเหล็กทำหน้าที่ทั้งแบบหล่อและองค์ประกอบโครงสร้าง ในช่วงก่อนคอนกรีตแข็งตัว แผ่นเหล็กจะทำหน้าที่เป็นแบบหล่อถาวร (Permanent Formwork) รับน้ำหนักคอนกรีตสดและแรงคนงานระหว่างก่อสร้าง เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แผ่นเหล็กจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของหน้าตัดโครงสร้าง โดยทำหน้าที่รับแรงดัดด้านล่าง
- คอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัดหลังแข็งตัว คอนกรีตที่เททับบนแผ่นเหล็กจะรับแรงอัดเมื่อเกิดโมเมนต์ดัด และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ระบบพื้น แต่



อาจต้องมีการเสริมเหล็กเพิ่มเติมเพื่อควบคุมรอยร้าวตามข้อกำหนดมาตรฐาน เช่น ลวดตาข่ายเหล็ก (Wire Mesh)

4. เกิดการถ่ายแรงเฉือนระหว่างวัสดุต่างชนิด พฤติกรรมร่วมของระบบขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็ก ซึ่งมักใช้กลไกทางกล (Mechanical Interlock) เช่น รอยหยักของแผ่นเหล็ก หรือสลักเฉือน (Shear Stud) หากมีการเชื่อมกับคานเหล็กหลัก

5. แผ่นเหล็กมีลักษณะหน้าตัดเฉพาะ แผ่นเหล็กที่ใช้ในระบบนี้จะมีหน้าตัดเป็นลอน (Corrugated หรือ Trapezoidal) โดยมีความลึก ความหนา และรูปแบบที่ออกแบบเฉพาะเพื่อเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย และเสถียรภาพทางโครงสร้างในช่วงระยะ (Span) ที่กำหนด

6. ต้องคำนึงถึงสถานะก่อนและหลังคอนกรีตแข็งตัว การออกแบบระบบแผ่นพื้นประกอบต้องแยกวิเคราะห์พฤติกรรมในสองสถานะ คือ Construction Stage: ขณะที่แผ่นเหล็กรับน้ำหนักคอนกรีตสดและแรงก่อสร้าง

Composite Stage: หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แผ่นเหล็กและคอนกรีตทำงานร่วมกันในการรับน้ำหนักใช้งาน

7. มีข้อกำหนดด้านการโก่งตัวและการสั่น แม้ระบบจะสามารถรับแรงได้มาก แต่การออกแบบต้องพิจารณาค่า การโก่งตัว (Deflection) และการสั่นสะเทือน (Vibration) โดยเฉพาะในกรณีที่มีช่วงยาวหรือรับภาระพลศาสตร์ เพื่อให้ระบบพื้นยังคงความสบายในการใช้งาน

8. การเสริมเหล็กอาจจำเป็นในบางตำแหน่ง แม้แผ่นเหล็กจะช่วยลดความจำเป็นในการใช้เหล็กเสริม แต่ในทางปฏิบัติอาจต้องวางเหล็กเสริมแนวล่างที่แผ่นเหล็กไม่สามารถรับแรงดึงได้เพียงพอ โดยเฉพาะบริเวณที่รับโมเมนต์ดัดสูง เช่น กลางช่วงพื้น

9. มีมาตรฐานรองรับการออกแบบโดยเฉพาะระบบนี้มีแนวทางการออกแบบตามมาตรฐานวิศวกรรม เช่น

ANSI/SDI C-2017 สำหรับแผ่นพื้นประกอบ

AISC 360 สำหรับโครงสร้างเหล็ก

ACI 318 สำหรับองค์ประกอบคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งกำหนดสูตร การถ่ายแรงและเงื่อนไขด้านความปลอดภัยไว้อย่างชัดเจน



รูปที่ 1 คุณสมบัติของระบบแผ่นพื้นประกอบ (Composite Slab System)

แหล่งที่มา <https://stud-steeldeck.com/what-is-steel-deck/>

สมการแผ่นพื้นประกอบ

สมการนี้ได้จาก AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ STEEL DECK INSTITUTE C - 2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs หรือ ANSI Sdi 2017 โดยใช้วิธีการกำหนดความแข็งแรงของพื้นประกอบด้วยวิธีความแข็งแรงสูงสุด (Strength Determination of Composite Deck-Slab by Ultimate Strength Method) มีรายละเอียดของสมการดังนี้

$$(c/d) = \frac{A_s F_y}{0.85 f'_c d b \beta_1} \quad (1)$$

$$(c/d)_b = \frac{0.003(h-d_a)}{\left(\frac{F_y}{E_s} + 0.003\right)d} \quad (2)$$

เมื่อ :

b = หน่วยความกว้างที่พิจารณา (mm)

A_s = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กต่อหน่วยความกว้าง (area of steel deck per unit width) (mm²/m)

d = ระยะจากเส้นบนสุดของพื้น (extreme compression fiber) จนถึงจุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก (distance to centroid of steel deck) (mm)

d_a = ความลึกรวมของโปรไฟล์แผ่นเหล็ก (overall deck depth) (mm)

h = ความหนารวมของชั้น (overall slab thickness), (mm).

h_c = ความหนาของคอนกรีตเหนือแผ่นเหล็ก = $h -$ (ตำแหน่ง top of steel) (mm)

f'_c = ความต้านทานอัดของคอนกรีต (specified compressive strength) psi (หรือ MPa).

F_y = ค่าความเค้นยอมพลาสติกของแผ่นเหล็ก (yield stress) psi (หรือ MPa).

E_s = โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก $\approx 29,500,000$ psi ($\approx 203,000$ MPa)

c = ระยะจากเส้นใยที่อยู่ด้านรับแรงอัดสุดขีด (extreme compression fiber) ไปยังแกนเป็นกลางของหน้าตัดคอมโพสิต (composite neutral axis) (mm)

$\beta_1 = 0.85$ if $f'_c \leq 4000$ psi (27.58 MPa)

$\beta_1 = 1.09 - 0.008 f'_c \geq 0.65$ if $f'_c \geq 22.58$ Mpa (3)

ทำการเปรียบเทียบ

ถ้า $\frac{c}{d} < \left(\frac{c}{d}\right)_b$ under-reinforced

ถ้า $\frac{c}{d} \geq \left(\frac{c}{d}\right)_b$ over-reinforced

กรณีเป็น under-reinforced สามารถหาโมเมนต์สูงสุดที่กำหนดโดยใช้สตั๊ด(studs) บนคานจะคำนวณได้ดังสมการนี้



$$M_{nu} = A_s F_y (d - a / 2) \quad (4) \quad LRFD \quad M_{ro} = \phi_c f'_c b \beta_1 (d - \beta_1 c / 2) \leq \phi_s M_y \quad (13)$$

เมื่อ :

$$a = \frac{A_s F_y}{0.85 f'_c b} \quad (5)$$

จำนวนชั้นต่ำของสัณฐานต่อหน่วยความกว้างที่จำเป็นในการพัฒนาความสามารถในการรับโมเมนต์สูงสุด M_{nu} จะต้องคำนวณดังนี้

$$N_{su} = F_T / Q_n \quad (6)$$

เมื่อ :

$$F_T = F_y \left(A_s - \frac{A_{webs}}{2} - A_{bf} \right) \quad (7)$$

$$Q_n = 0.5 A_{sa} \sqrt{f'_c E_c} \quad (8)$$

F_T = แรงยึดเหนี่ยวที่ต้องการต่อความกว้างหน่วยหนึ่งของแผ่นเหล็กคอกเพื่อให้หน้าตัดของแผ่นเหล็กคอกพัฒนาได้เต็มกำลัง

Q_n = กำลังรับแรงเฉือนเชิงพิภพของสัณฐาน

เมื่อจำนวนสัณฐานต่อหน่วยความกว้าง N_s ที่ใช้จริงมากกว่าหรือเท่ากับ N_{su} กำลังต้านทานโมเมนต์คำนวณจาก

$$LRFD \quad M_r = \phi_s M_n \quad (9)$$

$$ASD \quad M_r = M_n / \Omega_s \quad (10)$$

เมื่อ :

$$\phi_s = 0.85$$

$$\Omega_s = 1.75$$

สำหรับกรณีเป็นจำนวนสัณฐานต่อหน่วยความกว้าง N_s ที่ใช้จริงน้อยกว่า N_{su} กำลังต้านทานโมเมนต์คำนวณจาก

$$LRFD \quad M_r = \phi_s M_y \quad (11)$$

$$ASD \quad M_r = M_y / \Omega_s \quad (12)$$

เมื่อ :

$$M_y = F_y I_{cr} / (h - y_{cc})$$

กรณีเป็น over-reinforced ค่าความต้านทานโมเมนต์ในการดัดโค้งเชิงบวกของแผ่นพื้นคอมโพสิตเสริมแรงเกินจะถูกกำหนดโดย

$$ASD \quad M_{ro} = f'_c b \beta_1 (d - \beta_1 c / 2) / \Omega_c \leq M_y / \Omega_s \quad (14)$$

เมื่อ :

$$C = d \left\{ \sqrt{pm + \left(\frac{pm}{2} \right)^2} - \frac{pm}{2} \right\} \quad (15)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (16)$$

$$m = \frac{E_s E_{cu}}{f'_c \beta_1} \quad (17)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sirimontree และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอมโพสิตเหล็ก - คอนกรีต โดยเฉพาะอัตราส่วนระหว่าง shear span ต่อความลึกของหน้าตัดว่ามีผลอย่างไรต่อความแข็งแรงและโหมดการวิบัติ นักวิจัยได้ทำการทดสอบแบบสี่จุดดัด (four-point bending test) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนรูป การเกิดรอยร้าว และการพังทลายของชิ้นทดสอบ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีผลอย่างมากต่อรูปแบบการรับแรงและการเกิด composite action ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบแผ่นพื้นคอมโพสิตจำเป็นต้องพิจารณาสัดส่วนทางเรขาคณิตและการเสริมแรงเอ็นอย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงช่วยให้โครงการของผู้วิจัยมีแนวทางในการคำนวณเชิงวิศวกรรมที่คำนึงถึงอัตราส่วนเรขาคณิต เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์จากโปรแกรมที่พัฒนา

Sirimontree และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาพัฒนาและทดสอบโปรไฟล์แผ่นเหล็กลอนรูปแบบใหม่ เช่น แบบ top-hat และแบบ corrugated โดยเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการโก่งตัวและการพังทลายในช่วงการก่อสร้างและการใช้งานจริง ผลการทดสอบพบว่าโปรไฟล์ที่ออกแบบใหม่สามารถลดการโก่งตัวและเพิ่มความแข็งแรงในช่วงที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัว ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงระหว่างการก่อสร้าง งานนี้จึงแสดงให้เห็นว่ารูปแบบหน้าตัดของแผ่นเหล็กมีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของพื้นคอมโพสิต ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อเพิ่มความหลากหลายและความแม่นยำในการเลือกพารามิเตอร์สำหรับโปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนา

Fetih Kefyalew Teshager และ Thanongsak Imjai (2024) มุ่งเน้นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้คอนกรีตผสมเศษวัสดุ (Recycled Aggregate Concrete, RAC) ในระบบแผ่นพื้นคอมโพสิต โดยเน้นการศึกษาพฤติกรรมภายใต้อุณหภูมิสูง เช่น กรณีไฟไหม้ ผลจากการรวบรวมงานวิจัยหลายชิ้นพบว่าแม้ RAC จะเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน แต่ก็ทำให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งตัวลดลงเมื่อเจอความร้อนสูง ส่งผลต่อ composite action และความสามารถในการรับน้ำหนัก งานนี้จึงสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบพื้นคอมโพสิตไม่ควรพิจารณาเฉพาะการใช้งานปกติ แต่ควรเผื่อถึงเงื่อนไขพิเศษ เช่น ไฟไหม้ ซึ่งเป็นประเด็นที่สามารถนำมา



เชื่อมโยงกับการปรับค่าความปลอดภัยหรือ factor ในโปรแกรมออกแบบของผู้วิจัยได้

Feng Zhang Chenxin และ Wang Xingxing (2023) ได้ศึกษาความสามารถในการรับแรงเฉือนของ shear studs ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้คอนกรีตและเหล็กทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทีมวิจัยได้ทำการทดสอบ push-out test และแบบจำลองตัวเลข เพื่อหาความสามารถรับแรงเฉือนเชิงพิภค (Qn) และความสัมพันธ์ระหว่างแรง-การลื่นไถล (load-slip curve) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของ stud ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เกรตและขนาดของ stud คุณสมบัติของคอนกรีต และรูปทรงของ deck งานนี้จึงมีความเชื่อมโยงโดยตรงกับโครงการ เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาจะต้องมีการคำนวณเกี่ยวกับแรงเฉือนและจำนวน studs ที่ต้องใช้ในการออกแบบ

ธนัทพงศ์ ณ ลำพูน (2016) ได้ทำการทดลองแผ่นพื้นคอมโพสิตที่ประกอบด้วยคอนกรีตและแผ่นเหล็กที่คลอนภายใต้การรับน้ำหนักแบบสถิต พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง ผลการศึกษาแสดงว่าแบบจำลองที่กำหนดพารามิเตอร์ได้เหมาะสมสามารถทำนายพฤติกรรมของแผ่นพื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องระวังค่าพารามิเตอร์ เช่น การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวหรือการแตกร้าวของคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงมีประโยชน์โดยตรงต่อโครงการ เนื่องจากสามารถนำผลการทดลองและแบบจำลองมาใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากโปรแกรมที่พัฒนา เพื่อยืนยันความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ



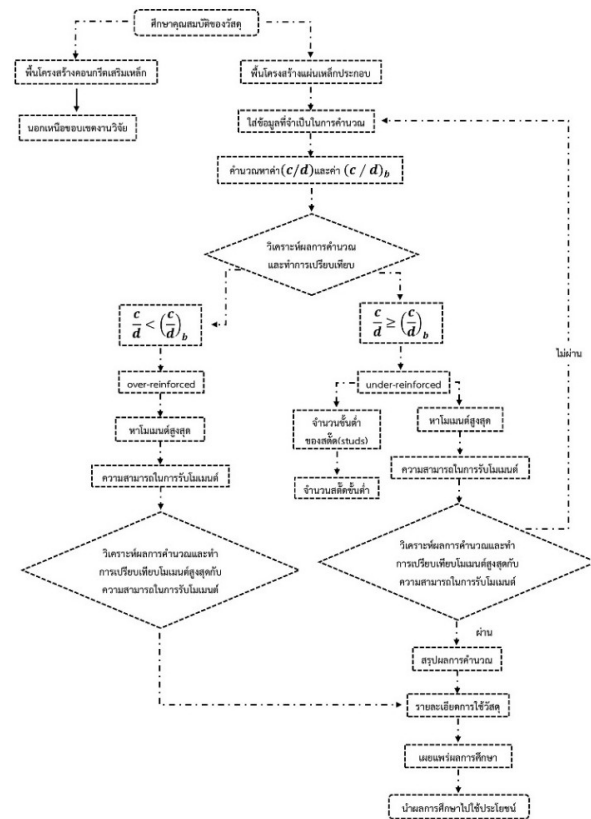
รูปที่ 2 composite steel deck floor systems (1)



รูปที่ 3 composite steel deck floor systems (2)

3.วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบเพื่ออำนวยความสะดวกในการคำนวณการออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ และแก้ไขปัญหาระยะเวลาในการคำนวณและความถูกต้องของรายการคำนวณระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ



รูปที่ 4 แผนผังวิธีดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 4 แผนการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ ว่าเป็นระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบหรือไม่
2. เมื่อศึกษาแล้วเป็นระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบให้ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานแล้วจึงใส่ข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณเช่น ขนาดความกว้าง ความหนา และความยาว ของระบบพื้นเหล็กประกอบรวมถึงคุณสมบัติของพื้นเหล็กประกอบเช่น หน้าตัดของ steel deck และขนาดของลอน
3. ทำการคำนวณและเปรียบเทียบเพื่อหาว่าเป็น under-reinforced หรือ over-reinforced
4. เมื่อเป็น under-reinforced ให้คำนวณหาโมเมนต์สูงสุดและความสามารถในการรับโมเมนต์ จำนวนสตั๊ด(studs)ขึ้นต่ำ
5. วิเคราะห์ผลการคำนวณ เปรียบเทียบโมเมนต์สูงสุดกับความสามารถในการรับโมเมนต์ ถ้าไม่ผ่านให้วนไปทำหัวข้อที่ 2 ถ้าผ่านให้ทำหัวข้อที่ 6 ต่อไป
6. สรุปผลการคำนวณและรายละเอียดการใช้วัสดุ
7. เปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยมือ ปรับปรุงและสรุปผล



ในการดำเนินการคำนวณเชิงโครงสร้างด้วยแบบฟอร์ม (Worksheet) ที่พัฒนาขึ้น จัดทำอยู่ในหน่วยของระบบ SI เพื่อให้สามารถใช้งานในระดับสากลได้ จำเป็นต้องมีข้อมูลป้อนเข้าที่ถูกต้องและครบถ้วน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและสามารถสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้างได้ โดยข้อมูลที่เตรียมสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1.คุณสมบัติวัสดุ (Material Properties)

- 1.1 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_c')
- 1.2 กำลังครากของแผ่นเหล็ก Steel Deck (f_y)
- 1.3 กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม (กรณีมีการใช้เหล็กเสริมเพิ่มเติม)

2.ข้อมูลหน้าตัด (Sectional Properties)

- 2.1 พื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยความกว้างของ Steel Deck
- 2.2 โมเมนต์เฉื่อยหน้าตัด (Section Modulus)
- 2.3 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)
- 2.4 ความหนาของแผ่น Steel Deck

3.ข้อมูลเรขาคณิตของโครงสร้าง (Geometrical Data)

- 3.1 ระยะช่วงพาด (Span length) ความต่อเนื่องของช่วงพาดหนึ่งช่วง
- 3.2 ความหนาของคอนกรีตทับหน้า (Slab thickness)
- 3.3 ความกว้างต่อแผ่นของ Steel Deck

4.ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกทุกและเงื่อนไขการใช้งาน (Loading and Service Conditions)

- 4.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)
- 4.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)
- 4.3 ค่าปัจจัยเพิ่มน้ำหนัก (Load Factor) ตามมาตรฐานการออกแบบที่ใช้อ้างอิง

ตัวอย่างข้อมูลที่เตรียมดังรูปที่ 5 ในช่องสีน้ำเงิน

เมื่อมีการป้อนข้อมูลครบถ้วน โปรแกรมจะประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ที่สำคัญตามมาตรฐานของ ANSI Sdi 2017 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและตรวจสอบความมั่นคงของโครงสร้าง ดังนี้

1. ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด (Flexural strength, ϕM_n) เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสามารถของหน้าตัดในการต้านทานโมเมนต์ดัด
2. ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear strength, ϕV_n) เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสามารถของหน้าตัดในการรับแรงเฉือนสูงสุด
3. ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุก (Load carrying capacity) ค่าการกระจายน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สามารถกระทำต่อพื้นที่ได้โดยไม่เกินข้อกำหนด
4. ผลการตรวจสอบการโก่งตัว (Deflection check) แสดงค่าการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างเมื่ออยู่ภายใต้ภาระใช้งาน และเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน
5. ผลการประเมินด้านความปลอดภัย (Safety evaluation) เมื่อปรากฏตัวอักษร OK ทุกตัวแสดงว่าพื้นสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 6 - 7

INPUT DATA

DESIGN LOADS

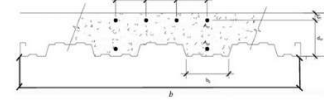
Dead Load, $D = 2.05$ kPa
Live Load, $L = 57.26$ kPa

The calculation is based on the total concrete area of the slab, excluding the three openings without concrete, and adding the self-weight of the steel deck.

CLEAR SPAN

$L_s = 1.5$ m

1.00



$I_g = 1,027,900$ mm⁴
 $b_y = 127$ mm
 $C_x = 75$ mm
 $h = 100$ mm
 $W_{deck} = 15.24$ kg/m²
 $d_s = 75$ mm

moment of inertia of the full (unreduced) steel deck per unit slab width.
width of deck
nominal out-to-out depth of slab, (mm)
Weight (Galvanized Coating)

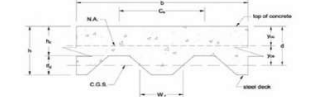


Figure A5-1 - Composite Section

$C_x = 305$ mm
 $W_y = 127$ mm
 $d_s = 75$ mm
 $h_s = 49$ mm

pitch of deck ribs
average deck rib width
depth of deck
depth of concrete above steel deck

STEEL HEADED STUD

$d_s = 16$ mm
 $A_{bf} = 305$ mm²
 $A_{wf} = 320.41$ mm²
 $A_{st} = 201.0619$ mm²

stud diameter
deck bottom flange area per unit width of steel deck
deck web area per unit width of steel deck
cross-sectional area of steel headed stud anchor



COMPOSITE STEEL PROPERTIES

$T_g = 26$ mm²
 $A_{st} = 320.41$ mm²
 $b = 315$ mm
 $d_s = 16$ mm
 $h = 100$ mm
 $d_{st} = 51$ mm
 $E_s = 203,000$ Mpa
 $F_c = 74$ Mpa
 $F_y = 305$ Mpa

steel deck type
area of steel deck, (mm²/m) of slab width
unit width of compression face of composite slab, 1000 mm
distance from extreme compression fiber to centroid of steel deck, (mm)
nominal out-to-out depth of slab, (mm)
overall depth of steel deck profile, (mm)
modulus of elasticity of steel deck (203,000 Mpa)
specified compressive strength of concrete, (MPa)
specified yield strength of steel deck, (MPa)

รูปที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลที่เตรียม

$$a = (A_s F_y) / (0.85 F_c b) = 0.0294 \text{ m} \quad (\text{Eq. A4-5})$$

$$M_{un} = (A_s F_y) (d - a/2) = 31.16 \text{ kN.m} \quad (\text{Eq. A4-4})$$

CHECK $N_u > N_{un}$ AND $N_u < N_{un}$

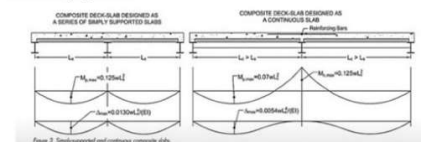
If $N_u > N_{un}$

Calculate the flexural resistance shall be

($M_u = M_{un}$)

LRFD	ASD
$M_u = \phi_s M_n$ where: $\phi_s = 0.85$	$M_u = M_n / \Omega_s$ where: $\Omega_s = 1.75$
$M_u = 26.48343352 \text{ kN.m}$	$M_u = 17.803999 \text{ kN.m}$

COMPUTE W_u , M_u AND FOS



LRFD	ASD
$W_u = (1.2D + 1.6L) 1.0 \text{ m}$	$W_u = (D + L) 1.0 \text{ m}$
$W_u = 94.11557 \text{ kN/m}$	$W_u = 59.33506 \text{ kN/m}$
$M_u = 0.125 W_u L^2 = 26.47000397 \text{ kN.m}$	$M_u = 0.125 W_u L^2 = 15.69 \text{ kN.m}$
$FOS = M_u / M_n = 1.00$ OK	$FOS = M_u / M_n = 1.07$ OK

$$a = f_s A_s / (0.85 F_c b) = 0.04755 \text{ m}$$

$$M_u = f_s A_s (d - 0.5 a) = 45.42 \text{ kN.m}$$

$$\text{LRFD } \phi M_u = 40.88 \text{ where: } \phi = 0.9$$

$$\text{ASD } M_u / \Omega = 27.20 \text{ where: } \Omega = 1.67$$

LRFD	ASD
$\phi M_u = 40.88 > M_u = 26.47000397$ OK	$M_u / \Omega = 27.20 > M_u = 15.69$ OK

Reinforcement spacing

$$S = 0$$



REINFORCEMENT

Negative Moment Capacity Calculations

(Calculations per ACI 318)

$$a = f_y A_s / 0.85 f'_c b_r$$

$$M_u = f_y A_s (d_u - 0.5 a)$$

$$\phi M_u \geq M_u$$

Check Shear strength

Maximum shear force,

LRFD	ASD
$W_u = (1.2D + 1.6L) 1.0 \text{ m}$	$W_u = (D + L) 1.0 \text{ m}$
$W_u = 94.11557 \text{ kN/m}$	$W_u = 59.33506 \text{ kN/m}$
$V_u = W_u L/2 = 70.59 \text{ kN}$	$V_u = W_u L/2 = 44.50 \text{ kN}$

Shear strength

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 1.78 \text{ kN}$$

$$V_s = A_s F_y = 88.67 \text{ kN}$$

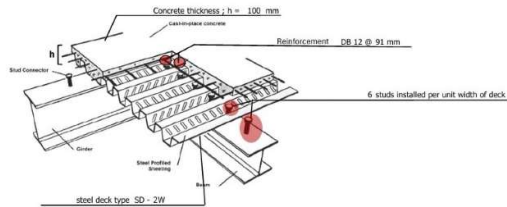
$$\therefore V_u = V_c + V_s = 90.45 \text{ kN}$$

LRFD	ASD
$\phi V_u = 76.88$ where : $\phi = 0.85$	$V_u/\Omega = 51.68$ where : $\Omega = 1.75$
$\phi V_u > V_u$ OK	$V_u/\Omega > V_u$ OK

Deflection of steel deck slabs ;

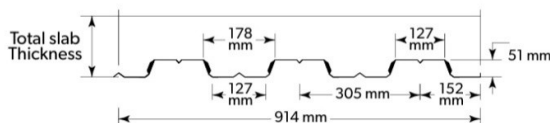
LRFD	ASD
$\Delta = (5W_u L^3)/(384EI) = 0.028094 \text{ m}$	$\Delta = (5W_u L^3)/(384EI) = 0.017712 \text{ m}$
$0.00625 < 0.028093682$ NON	$0.00625 < 0.017712$ NON

Summary



รูปที่ 7 ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์

4.ผลการศึกษา



รูปที่ 8 Section Properties บริษัท Lysaght

จากการนำเวิร์คชีตที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานกับข้อมูลของบริษัท Lysaght ซึ่งเป็นบริษัทที่มีผลิตภัณฑ์แผ่น steel deck เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของ work sheet ที่เขียนขึ้น ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Live Load) ของระบบพื้นคอมโพสิต 2W พบว่าผลลัพธ์จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าที่ปรากฏในแคตตาล็อกของบริษัท โดยได้ทำการเปรียบเทียบในกรณีแผ่นเหล็กที่มีความหนา 0.75 มม. และ 1.50 มม. ภายใต้ความหนาของพื้นคอนกรีต 100 มม.

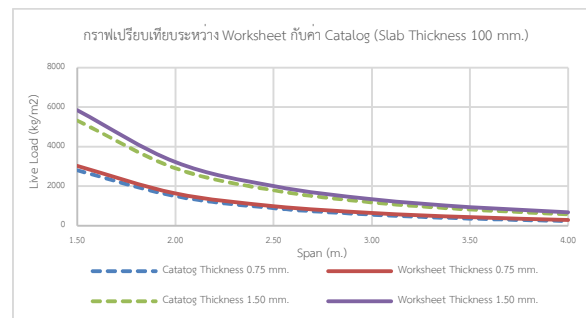
ตารางที่ 1 ข้อมูล Allowable Live Load จากแคตตาล็อกบริษัท Lysaght และจากเวิร์คชีต

Steel deck thickness (mm.)	Items	Span Length Center to Center of Support (m.)					
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.75	Live load (kN/m ²)						
	Lysaght	2807	1498	891	562	363	234
	Worksheet	3031	1639	995	645	433	296
1.5	ratio worksheet/Lysaght	1.08	1.09	1.12	1.15	1.19	1.27
	Live load (kN/m ²)						
	Lysaght	5327	2911	1793	1186	820	582
1.5	Worksheet	5841	3217	2003	1343	945	687
	ratio worksheet/Lysaght	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.18

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณ Moment capacity จากเวิร์คชีต

Thickness (mm.)	Moment capacity ($\phi S M_n$)	
	kN.m	kg.m
0.75	14.05	1432
1.50	26.48	2699

ผลการคำนวณจากเวิร์คชีตแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ระบุในแคตตาล็อกเล็กน้อย เช่น ในกรณีแผ่นเหล็กหนา 0.75 มม. ค่า Allowable Live Load จากเวิร์คชีตเท่ากับ 3031 kg/m² ขณะที่ค่าในแคตตาล็อกอยู่ที่ 2807 kg/m² และในกรณีแผ่นเหล็กหนา 1.50 มม. เวิร์คชีตให้ค่า 5841 kg/m² ในขณะที่แคตตาล็อกระบุ 5327 kg/m² คิดเป็นอัตราส่วนค่าจากเวิร์คชีตต่อค่าจากแคตตาล็อกเฉลี่ยประมาณ 1.14 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจมาจากการตั้งสมมติฐานด้านความปลอดภัย (Safety Factor) และวิธีการปัดค่าตามมาตรฐานการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต



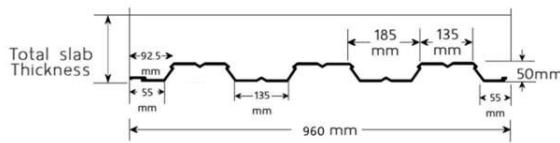
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวิร์คชีตกับแคตตาล็อกบริษัท Lysaght

เมื่อพิจารณาในเชิงแนวโน้ม กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะช่วงพาด (Span Length) และค่าการรับน้ำหนักใช้งาน พบว่าผลจากเวิร์คชีตและค่าที่อ้างอิงจากแคตตาล็อกมีทิศทางสอดคล้องกัน โดยเวิร์คชีตให้ค่าที่



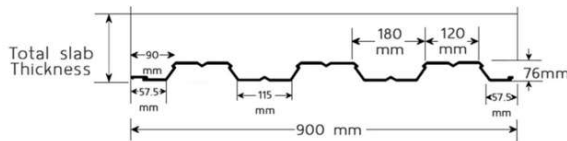
สูงกว่าเล็กน้อยตลอดทุกช่วง การที่ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันนี้สะท้อนให้เห็นว่า เวิร์คชีตที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและสามารถใช้งานแทนวิธีการคำนวณ หรือการอ้างอิงเอกสารผู้ผลิตได้จริง กล่าวโดยสรุป การทดสอบกับข้อมูลของบริษัท Lysaght ยืนยันว่าเวิร์คชีตสามารถคำนวณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นคอมโพสิตได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ และยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยออกแบบที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดเวลาในการคำนวณและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการทำด้วยมือ

SD-50W(2W) COMPOSITE FLOOR



รูปที่ 10 Section Properties บริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE

SD-76W(3W) COMPOSITE FLOOR



รูปที่ 11 Section Properties บริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE

จากการนำเวิร์คชีตที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานกับข้อมูลของบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE ซึ่งเป็นผู้ผลิตระบบพื้นคอมโพสิต SD-50W (2W) และ SD-76W (3W) เพื่อประเมินความถูกต้องของโปรแกรมในการคำนวณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Live Load) พบว่าผลลัพธ์จากเวิร์คชีตมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ปรากฏในแคตตาล็อกของบริษัทในทุกกรณี โดยได้ทำการเปรียบเทียบในกรณีแผ่นเหล็กที่มีความหนา 0.80 มม. และ 1.20 มม. ภายใต้ความหนาแน่นของพื้นคอนกรีต 150 มม.

ตารางที่ 3 ข้อมูล Allowable Live Load จากแคตตาล็อกบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE และจากเวิร์คชีต

steel deck thickness (mm.)	SD-50W (2W)	Span Length center to center of support (m.)					
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.8	Live load MOD	2339	1316	842	585	430	326
	worksheet	3495	1860	1105	694	446	286
	ratio worksheet/Lysaght	1.49	1.41	1.31	1.19	1.04	0.88
1.2	Live load MOD	3496	1967	1259	874	642	492
	worksheet	5136	2781	1694	1102	744	513
	ratio worksheet/Lysaght	1.47	1.41	1.35	1.26	1.16	1.04

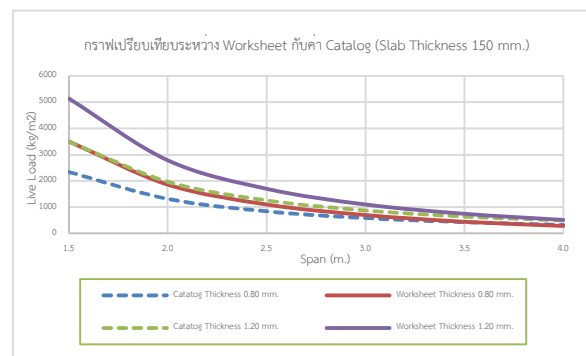
ตารางที่ 4 ข้อมูล Allowable Live Load จากแคตตาล็อกบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE และจากเวิร์คชีต

steel deck thickness (mm.)	SD-76W (3W)	Span Length center to center of support (m.)					
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.8	Live load MOD	2691	1514	969	673	494	378
	worksheet	2946	1549	904	553	341	203
	ratio worksheet/Lysaght	1.09	1.02	0.93	0.82	0.69	0.54
1.2	Live load MOD	4012	2257	1444	1003	737	564
	worksheet	4319	2321	1397	894	591	394
	ratio worksheet/Lysaght	1.08	1.03	0.97	0.89	0.80	0.70

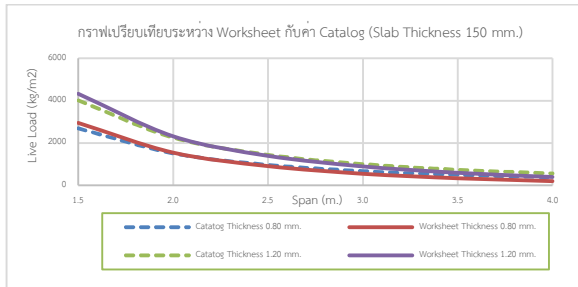
ตารางที่ 5 ผลการคำนวณ Moment capacity จากเวิร์คชีต

Item	Thickness (mm.)	Moment capacity ($\phi_s M_n$)	
		kN.m	kg.m
SD-50W(2W)	0.8	16.49	1680
	1.2	23.75	2421
SD-76W(3W)	0.8	14.10	1437
	1.2	20.17	2056

ผลการคำนวณจากเวิร์คชีตแสดงให้เห็นว่า ในกรณีของแผ่น SD-50W (2W) ค่า Allowable Live Load จากเวิร์คชีตเท่ากับ 3495 kg/m² และ 5136 kg/m² สำหรับแผ่นหนา 0.80 มม. และ 1.20 มม. ตามลำดับ ขณะที่ค่าในแคตตาล็อกอยู่ที่ 2339 kg/m² และ 3496 kg/m² อัตราส่วนค่าจากเวิร์คชีตต่อค่าจากแคตตาล็อกเฉลี่ยประมาณ 1.25 ส่วนในกรณีของแผ่น SD-76W (3W) ค่า Allowable Live Load จากเวิร์คชีตเท่ากับ 2946 kg/m² และ 4319 kg/m² สำหรับแผ่นหนา 0.80 มม. และ 1.20 มม. ตามลำดับ ขณะที่ค่าในแคตตาล็อกอยู่ที่ 2691 kg/m² และ 4012 kg/m² แสดงให้เห็นว่าแบบแผ่นที่มีหน้าตัดลึกกว่า (3W) ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าจากบริษัทมากขึ้น อัตราส่วนค่าจากเวิร์คชีตต่อค่าจากแคตตาล็อกเฉลี่ยประมาณ 0.88



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวิร์คชีตกับแคตตาล็อกบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE SD-50W (2W)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวิร์คชีทกับแคตตาล็อกบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE SD-76W (3W)

เมื่อพิจารณาในเชิงแนวโน้ม พบว่าผลจากเวิร์คชีทและค่าจากแคตตาล็อกมีทิศทางสอดคล้องกัน กล่าวคือ ค่าการรับน้ำหนักใช้งานจะลดลงเมื่อระยะช่วงพาดเพิ่มขึ้น และกราฟจากเวิร์คชีทจะอยู่เหนือกราฟของแคตตาล็อกในบางช่วง ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มที่เวิร์คชีทให้ค่าการรับน้ำหนักที่สูงกว่าเล็กน้อย เมื่ออยู่เหนือกราฟของแคตตาล็อกและค่าการรับน้ำหนักที่น้อยกว่าเล็กน้อย เมื่ออยู่ใต้กราฟของแคตตาล็อก สาเหตุอาจมาจากการที่เวิร์คชีทใช้ค่าความแข็งแรงเต็มตามมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 โดยไม่ได้ลดค่าด้วยตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) แบบที่บริษัทผู้ผลิตใช้ในแคตตาล็อก

ผลการทดสอบนี้จึงแสดงให้เห็นว่าเวิร์คชีทที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและสามารถคำนวณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นคอมโพสิตได้อย่างสอดคล้องกับข้อมูลจากผู้ผลิต

5.วิเคราะห์และสรุปผล

จากการนำเวิร์คชีทที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับข้อมูลของบริษัท Lysaght และบริษัท MOD SUPPLIERS & SERVICE พบว่า ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Live Load) ที่ได้จากเวิร์คชีทมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ปรากฏในแคตตาล็อกของผู้ผลิตเล็กน้อยในทุกกรณี ซึ่งเป็นผลจากการที่เวิร์คชีทคำนวณโดยอิงค่ากำลังรับโมเมนต์เต็ม (ϕM_n) ตามมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 โดยไม่ได้ลดค่าด้วยตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) แบบเดียวกับที่ผู้ผลิตใช้ในเอกสารทางการค้า เมื่อพิจารณาแนวโน้มของผลการคำนวณ พบว่าผลลัพธ์จากเวิร์คชีทและแคตตาล็อกมีทิศทางสอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อระยะช่วงพาดของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น ค่าการรับน้ำหนักใช้งานจะลดลงตามแนวทฤษฎีการดัดของโครงสร้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวิร์คชีทสามารถสะท้อนพฤติกรรมของพื้นคอมโพสิตได้อย่างถูกต้อง โดยในกรณีของแผ่นที่มีหน้าตัดลึก เช่น แบบ SD-76W (3W) พบว่าผลการคำนวณจากเวิร์คชีทมีความใกล้เคียงกับค่าที่ระบุในแคตตาล็อกมากที่สุด ซึ่งยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเวิร์คชีทสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นคอมโพสิตที่มีลักษณะต่าง ๆ ได้จริง กล่าวโดยสรุป เวิร์คชีทที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้มีแนวโน้มความแม่นยำและน่าเชื่อถือในระดับวิศวกรรมสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยออกแบบพื้นคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ช่วยลดเวลาในการคำนวณเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบข้อมูลจากผู้ผลิตและสามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบในอนาคตได้

6.ข้อเสนอแนะ

ในการนำเวิร์คชีทช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ (Composite Steel Deck Floor System) ไปใช้งานจริง ผู้ใช้งานควรพิจารณาและระมัดระวังในประเด็นต่อไปนี้ เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด

- 1.) การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น เวิร์คชีทที่พัฒนาขึ้นอาศัยข้อมูลนำเข้า (Input Data) หลายรายการ เช่น ความหนาของแผ่นเหล็ก ความหนาคอนกรีต ช่วงพาดของพื้น และชนิดของ shear connector ดังนั้น ผู้ใช้งานควรตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนการคำนวณทุกครั้ง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับโมเมนต์และความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นคอมโพสิต
- 2.) การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมาตรฐานและแคตตาล็อกของผู้ผลิต แม้ว่าเวิร์คชีทจะถูกพัฒนาตามแนวทางของมาตรฐาน ANSI/SDI C-2017 แต่ค่าที่ได้อาจแตกต่างจากแคตตาล็อกของผู้ผลิตเล็กน้อย เนื่องจากผู้ผลิตมักใช้ตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) หรือค่าลดทอน (Reduction Factor) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรใช้ผลจากเวิร์คชีทเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) และควรตรวจสอบซ้ำกับข้อมูลของผู้ผลิตก่อนนำไปใช้งานจริงในโครงการ
- 3.) ข้อจำกัดด้านรูปแบบหน้าตัดของแผ่นเหล็ก เวิร์คชีทที่พัฒนาขึ้นโดยอิงข้อมูลของแผ่นเหล็กจากบางบริษัท เช่น Lysaght และ MOD SUPPLIERS & SERVICE หากนำไปใช้กับแผ่นพื้นของผู้ผลิตรายอื่น หรือรูปหน้าตัดที่แตกต่างกันมาก ควรปรับค่าพารามิเตอร์และสมมติฐานให้เหมาะสม เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ
- 4.) การพิจารณาพฤติกรรมระยะยาวและสภาพแวดล้อมการใช้งาน เวิร์คชีทนี้คำนวณภายใต้สมมติฐานเชิงสถิต (Static Load) และไม่ได้รวมผลของการรับน้ำหนักซ้ำ (Fatigue Load) หรือการกัดกร่อนของวัสดุ (Corrosion) ในการนำไปใช้งานจริง ควรพิจารณาผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และภาระน้ำหนักจรระยะยาว เพื่อความปลอดภัยในระยะยาวของโครงสร้าง
- 5.) แนวทางการพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต เพื่อให้เวิร์คชีทมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อาจเพิ่มเติมส่วนของการวิเคราะห์ค่าแรงดัดสูงสุดในหลายช่วงพาด (Multi-span Analysis) รวมถึงพัฒนาให้เป็นซอฟต์แวร์เชิงกราฟิกที่ใช้งานง่ายขึ้นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบ

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ อธิบายหลักการ ตลอดจนชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อ “การพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่น



เหล็กประกอบ” (Development of a Design-Assistance Worksheet for Composite Steel Deck Floor Systems) ด้วยความเอาใจใส่และอดทนเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้ให้ความรู้และแรงบันดาลใจในการเรียนรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจและผู้ปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยพัฒนาความรู้ด้านการออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบให้ดียิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ เพื่อนๆในกลุ่มที่ช่วยกันค้นคว้า และจัดทำหัวข้องานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sirimontree S., Thongchom C., Keawsawasvong S., et al. (2021) // Experimental Study on the Behavior of Steel–Concrete Composite Decks with Different Shear Span-to-Depth Ratios, Buildings // Basel: MDPI Press. // (น.1- 13)
แหล่งที่มา <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/12/624>
- [2] Sirimontree S., Thongchom C., Keawsawasvong S., et al. (2020) // Experimental Investigation of Novel Corrugated Steel Deck under Construction and Service Loads — MDPI Buildings (2020). // Basel: MDPI Press. (น.1- 24)
แหล่งที่มา : <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/11/208>
- [3] Feng Zhang Chenxin Wang Xingxing Zou Yang Wei Dongdong Chen Qiudong Wang Libin Wang, (2023) / Shear connector // stud behaviour — Shear capacity evaluation of studs in steel–high strength concrete composite structures (recent article on shear capacity of studs). // Basel: MDPI Press. // (น.1- 18)
แหล่งที่มา : <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/2/496>

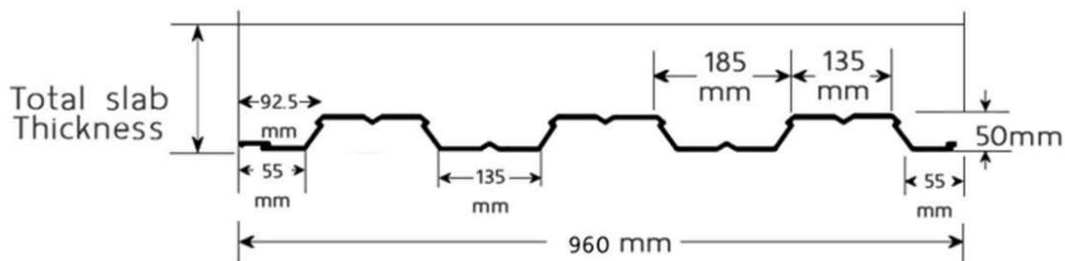
- [4] นายธนัทพงศ์ ณ ลำพูน, (2016) // พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตของแผ่นพื้นคอมโพสิตระหว่างคอนกรีตกับแผ่นเหล็กรีดลอน // ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. // (น.1- 258)
แหล่งที่มา :
https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:92215
https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2016/TU_2016_5510031619_3984_4005.pdf
- [5] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ STEEL DECK INSTITUTE C - 2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs // (น. 1- 43)
แหล่งที่มา : [Page not found - Steel Deck Institute](#)
- [6] Fetih Kefyalew Teshager Thanongsak Imjai Reyes Garcia Khanh-Son Nguyen and Sandeep Chaudhary, (2024) // Performance of recycled aggregate concrete composite metal decks under elevated temperatures — a comprehensive review (2024). // Warwick : University of Warwick Press. // (น. 1- 24)
แหล่งที่มา : <https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/183428> • <https://www.researchgate.net/publication/378052642>



ภาคผนวก

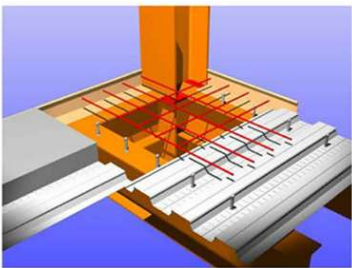
ตัวอย่างการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบระบบพื้นแผ่นเหล็กประกอบ
ข้อกำหนด $f_y = 210 \text{ Mpa}$ และ $f'_c = 24 \text{ Mpa}$ ช่วงพาดยาว 4 เมตร

SD-50W(2W) COMPOSITE FLOOR



SD-50W(2W) COMPOSITE FLOOR

Section Properties



Standard	Minimum Deposition of Zinc(Both side) g/m ²	Thickness mm.	Chemical composition(%)			Mechanical Properties		Elongation %
			C	P	S	Yield point kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	
SPGIG A	120	0.80	-	-	-	min21	min30	min25
		1.00	-	-	-	min21	min30	min25
		1.20	-	-	-	min21	min30	min25
SPGIG B	275	0.80	-	-	-	min21	min30	min25
		1.00	-	-	-	min21	min30	min25
		1.20	-	-	-	min21	min30	min25
ASTM A653 SS40-96	180	0.80	-	-	-	23	min30	min25
		1.00	-	-	-	23	min30	min25
		1.20	-	-	-	23	min30	min25

Section Properties

Type of Steel deck	Width mm.	thk. mm.	Section Area cm ² /m.	Weight(Galvanized Coating)		Moment of inertia Is cm ⁴ /m.	Section Modulus	
				kg/m.	kg/m ²		sZp(cm ³ /m)	sZn(cm ³ /m)
SD-50W	960	0.8	10.42	8.06	8.4	48.71	18.57	19.35
SD-50W	960	1.0	13.03	9.98	10.4	60.88	23.1	24.09
SD-50W	960	1.2	15.63	11.98	12.48	73.05	27.63	28.85



DESIGN OF COMPOSITE STEEL DECK FLOOR SYSTEMS



FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
UNIVERSITY OF PHAYAO

Project Title:
Project Location:
Prepared by: Suphawit Klinyoo and Outchara Richinda
Checked by: Assoc. Prof. Dr. Preeda Chaimahawan
Date:

IN PUT DATA

DESIGN LOADS

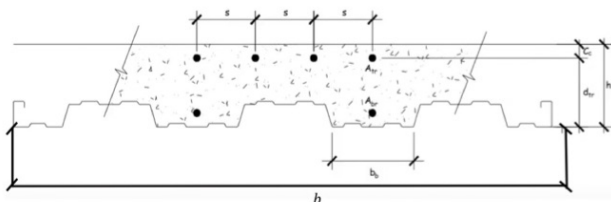
Dead Load; $D = 3.18$ kPa

Live Load; $L = 4.20$ kPa

The calculation is based on the total concrete area of the slab, excluding the three openings without concrete, and adding the self-weight of the steel deck.

CLEAR SPAN

$L_s = 4.00$ m



$I_{sf} = 730500$ mm⁴ moment of inertia of the full (unreduced) steel deck per unit slab width.
 $b_b = 135$ mm width of deck
 $C_c = 25$ mm nominal out-to-out depth of slab, (mm)
 $h = 150$ mm
 $W_{deck} = 12.48$ kg/m² = 0.12 kPa Weight (Galvanized Coating)
 $d_r = 125$ mm

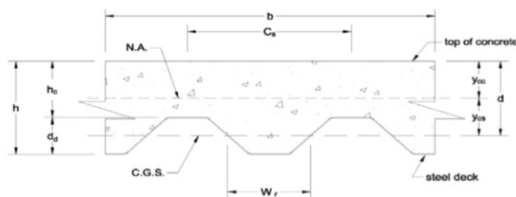
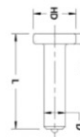


Figure A5-1 – Composite Section

$C_s = 300$ mm pitch of deck ribs
 $W_r = 135$ mm average deck rib width
 $d_d = 50$ mm depth of deck
 $h_c = 100$ mm depth of concrete above steel deck

STEEL HEADED STUD

$d_s = 16$ mm studs diameter
 $A_{bf} = 304$ mm² deck bottom flange area per unit width of steel deck
 $A_{webs} = 339.41$ mm² deck web area per unit width of steel deck
 $A_{sa} = 201.06$ mm² cross - sectional area of steel headed stud anchor



COMPOSITE STEEL PROPERTIES

$T_g = 50W(2W)$ steel deck type
 $A_s = 1042.00$ mm² area of steel deck, (mm²/m) of slab width
 $b = 1000$ mm unit width of compression face of composite slab, 1000 mm
 $d = 123.56$ mm distance from extreme compression fiber to centroid of steel deck, (mm)
 $h = 150$ mm nominal out-to-out depth of slab, (mm)
 $d_d = 50$ mm overall depth of steel deck profile, (mm)
 $E_s = 203000$ Mpa modulus of elasticity of steel deck (203,000 Mpa)
 $f'_c = 24$ Mpa specified compressive strength of concrete, (MPa)
 $F_y = 210$ Mpa specified yield strength of steel deck, (MPa)



DETERMINE β_1

กำหนด β_1

β_1 is from ANSI/SDI

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{if } f'_c \leq 27.58 \text{ MPa} \\ 1.09 - 0.008 f'_c & \text{if } f'_c > 27.58 \text{ MPa} \end{cases}$$

OK

$$\therefore \beta_1 = 0.85$$

Rainfoce Materials

Rebar $f_y = 392 \text{ MPa}$
DB = 12 mm

$$(c/d) < (c/d)_b \quad \text{Under - reinforced}$$

$$(c/d) > (c/d)_b \quad \text{Over - reinforced}$$

Where:

c = distance from extreme compression fiber to composite neutral axis, (mm)
d = distance from extreme compression fiber to centroid of steel deck, (mm)

$$(c/d) = (A_s F_y) / (0.85 f'_c d b \beta_1) \quad (\text{Eq. A4-1})$$

$$(c/d)_b = [0.003(h-d_s)] / [F_y/E_s + 0.003] d \quad (\text{Eq. A4-2})$$

Where:

$A_s = 1042 \text{ mm}^2$	area of steel deck, (mm ² /m) of slab width
$b = 1000 \text{ mm}$	unit width of compression face of composite slab, 1000 mm
$d = 123.56 \text{ mm}$	distance from extreme compression fiber to centroid of steel deck, (mm)
$h = 150 \text{ mm}$	nominal out-to-out depth of slab, (mm)
$d_s = 50 \text{ mm}$	overall depth of steel deck profile, (mm)
$E_s = 203000 \text{ MPa}$	modulus of elasticity of steel deck (203,000 MPa)
$f'_c = 24 \text{ MPa}$	specified compressive strength of concrete, (MPa)
$F_y = 210 \text{ MPa}$	specified yield strength of steel deck, (MPa)

$$(c/d) = (A_s F_y) / (0.85 f'_c d b \beta_1) = 0.1021 \quad (\text{Eq. A4-1})$$

$$(c/d)_b = [0.003(h-d_s)] / [F_y/E_s + 0.003] d = 0.6018 \quad (\text{Eq. A4-2})$$

therefore

$$\therefore (c/d) < (c/d)_b \quad \text{under - reinforced}$$

IF UNDER - REINFORCED "USED M_{nu} " / IF OVER - REINFORCED "USED M_{ro} "

since Under - reinforced, use nominal (ultimate) moment equation

Positive Moment

In case of no stud connection, the nominal moment resistance shall be determined using Eq. A3-5

$$M_r = M_y = F_y I_{cr} / (h - y_{cc}) = 19.78 \text{ kN.m} \quad (\text{Eq. A3-5})$$

If stud connectors are provided, use Eq. A4-4 for the nominal moment M_{nu} .

$$a = (A_s F_y) / (0.85 f'_c b) = 0.0107 \text{ m} \quad (\text{Eq. A4-5})$$

$$M_{nu} = (A_s F_y) (d - a/2) = 25.86 \text{ kN.m} \quad (\text{Eq. A4-4})$$

if Over - reinforced, the moment resistance of an composite slab be determined by the following equations

LRFD	ASD
$M_{ro} = \phi_c f'_c b \beta_1 \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \leq \phi_s M_y \quad (\text{Eq. A4-12a})$	$M_{ro} = f'_c b \beta_1 \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) / \Omega_c \leq M_y / \Omega_s \quad (\text{Eq. A4-12b})$

where:

$$c = d \left\{ \sqrt{\rho m + \left(\frac{\rho m}{2} \right)^2} - \frac{\rho m}{2} \right\} \quad (\text{Eq. A4-13})$$

$$\rho = \frac{A_s}{b d} \quad (\text{Eq. A4-14})$$

$$m = \frac{E_s \epsilon_{cu}}{f'_c \beta_1} \quad (\text{Eq. A4-15})$$

$E_s = 203000 \text{ MPa}$
$\epsilon_{cu} = 0.003$
$\phi_c = 0.65$
$\Omega_c = 2.30$
$\phi_s = 0.85$
$\Omega_s = 1.75$



COMPUTE MINIMUM NUMBER OF STUDS

To ensure that ultimate moment capacity develops, the minimum number of studs must be calculated.

$$N_{su} = F_T / Q_n \quad (\text{Eq. A4-6})$$

Where:

F_T = required anchorage force per unit deck width to develop the full cross section of the steel deck

$$F_T = F_y (A_s - A_{weds}/2 - A_{bf}) \quad (\text{Eq. A4-7})$$

Q_n = nominal shear strength of steel headed stud anchor

$$Q_n = 0.5 A_s (\text{Sqrt}(f_c E_c)) \quad (\text{Eq. A4-8})$$

Where:

$A_{bf} = 304 \text{ mm}^2$	deck bottom flange area per unit width of steel deck
$A_{webs} = 339.41 \text{ mm}^2$	deck web area per unit width of steel deck
$A_{sa} = 201.06193 \text{ mm}^2$	cross - sectional area of steel headed stud anchor
$E_c = 23025.204 \text{ Mpa}$	$E_c = 4700 \text{ sqrt}(f_c)$

$$F_T = 119341.95 \text{ kN}$$

$$Q_n = 74732 \text{ kN}$$

$$N_{su} = 1.60 \quad \text{Assume, } N_s = 2 \text{ studs installed per unit width of deck}$$



CHECK $N_s > N_{su}$ AND $N_s < N_{su}$

if $N_s > N_{su}$

Calculate the flexural resistance shall be $(M_n = M_{nu})$

LRFD	ASD
$M_r = \phi_s M_n$ where : $\phi_s = 0.85$	$M_r = M_n / \Omega_s$ where : $\Omega_s = 1.75$
$M_r = 21.98424365 \text{ kN.m}$	$M_r = 14.77932 \text{ kN.m}$

if $N_s < N_{su}$

When the number of studs per unit width, N_s , installed is less than N_{su} , then: $M_n = M_{no} + (M_{nu} - M_{no})(N_s / N_{su})$

COMPUTE W_u , M_u AND FOS

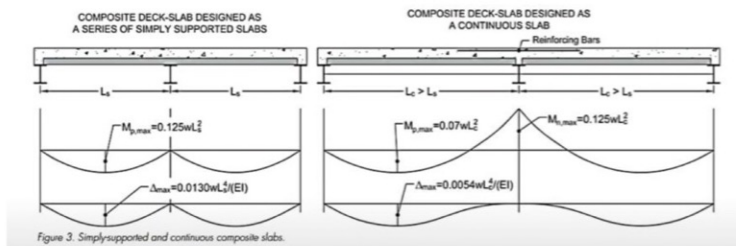


Figure 3. Simply-supported and continuous composite slabs.

LRFD	ASD
$W_u = (1.2D + 1.6L) 1.0 \text{ m}$	$W_u = (D + L) 1.0 \text{ m}$
$W_u = 10.532715 \text{ kN/m}$	$W_u = 7.377263 \text{ kN/m}$
$M_u = 0.125wL_s^2 = 21.07 \text{ kN-m}$	$M_u = 0.125wL_s^2 = 14.75 \text{ kN-m}$
$\text{FOS} = M_r/M_u = 1.04 \text{ OK}$	$\text{FOS} = M_r/M_u = 1.00 \text{ OK}$



REINFORCEMENT

Negative Moment Capacity Calculations

(Calculations per ACI 318)

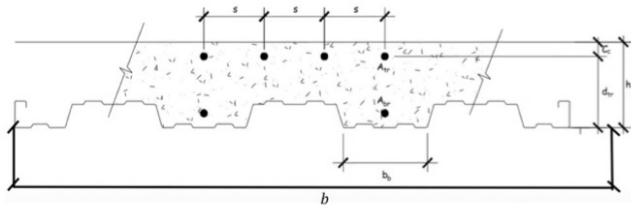
$$a = f_y A_{tr} / 0.85 f_c b_o$$

$$M_n = f_y A_{tr} (d_{tr} - 0.5 a)$$

$$\phi M_n \geq M_u$$

Materials

$$f_c = 24 \text{ MPa}$$



Section

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$b_o = 135 \text{ mm}$$

$$C_c = 25 \text{ mm}$$

$$d_{tr} = 125 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

Rebar

$$DB = 12 \text{ mm}$$

$$f_y = 392 \text{ MPa}$$

$$A_{tr} = 0.0016 \text{ m}^2$$

$$\text{Amount} = 7 \text{ piece}$$

$$A_{tr} = ((2 * \pi * D^2) / 4) * \text{Amount}$$

$$a = f_y A_{tr} / 0.85 f_c b$$

$$M_n = f_y A_{tr} (d_{tr} - 0.5 a)$$

$$= 0.0304 \text{ m}$$

$$= 68.14 \text{ kN-m}$$

$$\text{LRFD} \quad \phi M_n = 61.33$$

$$\text{ASD} \quad M_n / \Omega = 40.80$$

$$\text{where : } \phi = 0.9$$

$$\text{where : } \Omega = 1.67$$

LRFD			ASD		
$\phi M_n = 61.33$	>	$M_u = 21.07$ OK	$M_n / \Omega = 40.80$	>	$M_u = 14.75$ OK

Reinforcement spacing

$$S = 0.143 \text{ m}$$

Check Shear strength

Maximum shear force,

LRFD		ASD	
$W_u = (1.2D + 1.6L) 1.0 \text{ m}$		$W_u = (D + L) 1.0 \text{ m}$	
$W_u = 10.53 \text{ kN/m}$		$W_u = 7.38 \text{ kN/m}$	
$V_u = W_u * L / 2 = 21.07 \text{ kN}$		$V_u = W_u * L / 2 = 14.75 \text{ kN}$	

Shear strength

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c} b d = 3.25 \text{ kN}$$

$$V_D = A_{tr} F_y = 62.07 \text{ kN}$$

$$\therefore V_n = V_c + V_D = 65.31 \text{ kN}$$



LRFD			ASD		
$\phi V_n =$	55.52	where : $\phi = 0.85$	$V_n/\Omega =$	37.32	where : $\Omega = 1.75$
ϕV_n	>	V_u OK	V_n/Ω	>	V_u OK

Check deflection

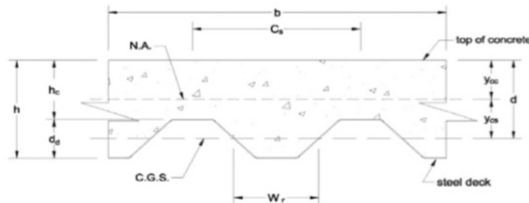


Figure A5-1 – Composite Section

$C_s =$	300	pitch of deck ribs in. (mm)
$W_r =$	135	average deck rib width in. (mm)
$d_d =$	50	depth of deck in. (mm)
$h_c =$	100	depth of concrete above steel deck in. (mm)
$h =$	150	overall slab depth in. (mm)

Moment of Inertia of the Uncracked Section

For the uncracked moment of inertia ;

$$y_{cc} = \frac{0.5bh_c^2 + nA_s d + W_r d_d (h - 0.5d_d) \frac{b}{C_s}}{bh_c + nA_s + W_r d_d \frac{b}{C_s}} = 67.95 \text{ mm}$$

Where:

$A_s =$	1042	mm ²	area of steel deck per unit slab width
$b =$	1000	mm	unit slab width
$d =$	123.56	mm	distance from top of concrete to centroid of steel deck
$n =$	8.82		modular ratio = E_s/E_c
$E_s =$	203000	Mpa	modulus of elasticity of steel deck
$E_c =$	23025.204	Mpa	$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$
$f'_c =$	24	Mpa	concrete strength
$y_{cs} =$	55.61	mm	d-ycc
$\rho =$	0.0084		A_s/bd
$I_{sf} =$	730500	mm ⁴	moment of inertia of the full (unreduced) steel deck per unit slab width.

The uncracked moment of inertia transformed to steel ;

$$I_u = \frac{bh_c^3}{12n} + \frac{bh_c}{n} (y_{cc} - 0.5h_c)^2 + I_{sf} + A_s y_{cs}^2 + \frac{W_r b d_d}{n C_s} \left(\frac{d_d^2}{12} + (h - y_{cc} - 0.5d_d)^2 \right)$$

$$I_u = 25897337 \text{ mm}^4$$

For the cracked moment of inertia ;

$$y_{cc} = d \left(\sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n \right) = 39.34 \text{ mm} \leq h_c = 100 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Where:

$A_s =$	1042.00	mm ²	area of steel deck per unit slab width
$b =$	1000	mm	unit slab width
$d =$	123.56	mm	distance from top of concrete to centroid of steel deck
$n =$	8.82		modular ratio = E_s/E_c
$E_s =$	203000	Mpa	modulus of elasticity of steel deck
$E_c =$	23025.20	Mpa	$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$
$f'_c =$	24	Mpa	concrete strength
$y_{cs} =$	84.22	mm	d-ycc
$\rho =$	0.0084		A_s/bd
$I_{sf} =$	730500	mm ⁴	moment of inertia of the full (unreduced) steel deck per unit slab width.

The cracked moment of inertia transformed to steel ;



$$I_{cr} = \frac{b}{3n} y_{cc}^3 + A_s y_{cs}^2 + I_{sf} = 10423330 \text{ mm}^4$$

Moment of inertia of the composite section

$$I_d = \frac{I_u + I_c}{2} = 18160333 \text{ mm}^4$$

I_u = The uncracked moment of inertia transformed to steel

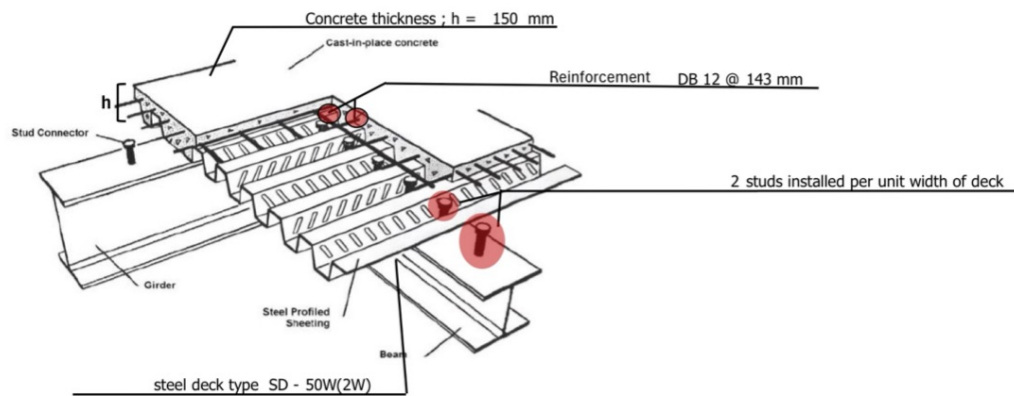
I_c = moment of inertia of concrete

Maximum allowable deflection ; $\Delta = L/240 = 0.016667 \text{ m}$

Deflection of steel deck slabs ;

LRFD				ASD			
$\Delta = (5WL^3)/384EI = 0.0210 \text{ m}$				$\Delta = (5WL^3)/384EI = 0.0147 \text{ m}$			
0.016667	<	0.0210	NON	0.016667	>	0.0147	OK

Summary





แผนที่ความเสียหายอุทกภัยอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พ.ศ.2567 Flood damage map of Mae Sai District, Chiang Rai Province, 2024

นางสาวหทัยรัตน์ อินยาศรี^{1*} นางสาวสุชนรี ไชยวรรณ² นายวรวิช เทพรักษา³ และนายบุรพา ไม้ไผ่⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding Hatairat Inyansir ; E-mail address 65103915@up.ac.th

บทคัดย่อ

เหตุการณ์น้ำท่วมถือเป็นภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน โดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มต่ำและพื้นที่ริมลำน้ำที่มีความเสี่ยงสูง อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย เป็นพื้นที่ที่ตั้งอยู่ใกล้แม่น้ำสาย ซึ่งได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมบ่อยครั้ง ทั้งจากฝนตกหนักและน้ำหลากจากประเทศเพื่อนบ้าน เหตุการณ์น้ำท่วมครั้งรุนแรงในปี พ.ศ. 2567 สร้างความเสียหายแก่บ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างเป็นวงกว้าง ทำให้มีความจำเป็นในการจัดทำข้อมูลที่สามารถสะท้อนขอบเขตและระดับความเสียหายได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ประเมินระดับความเสียหายจากข้อมูลภาคสนามและข้อมูลสนับสนุนอื่น ๆ และ (2) จัดทำแผนที่แสดงความเสียหายของอาคารในเชิงพื้นที่ เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จะช่วยให้หน่วยงานภาครัฐและท้องถิ่นสามารถใช้แผนที่ความเสียหายเป็นข้อมูลประกอบการวางแผนฟื้นฟู การจัดสรรงบประมาณ และการกำหนดมาตรการป้องกันน้ำท่วมในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการวิจัยและการวางแผนจัดการภัยพิบัติในพื้นที่อื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

คำสำคัญ: น้ำท่วม, ความเสียหายอาคาร, แผนที่เชิงพื้นที่, แม่สาย, ภัยพิบัติทางธรรมชาติ

Abstract

Flooding is a natural disaster that causes severe damage to people's lives and property, particularly in low-lying areas and communities located along riverbanks, which are highly vulnerable to inundation. Mae Sai District, Chiang Rai Province, is situated adjacent to the Sai River and has been frequently affected by flooding, both from heavy rainfall and floodwaters originating from neighboring countries. The severe flooding event in 2024 caused widespread damage to residential buildings and other structures, highlighting the urgent need for comprehensive information that can clearly illustrate the extent and severity of the damage. This research aims to (1) assess the level of building damage using photographic data obtained from relevant agencies and other supplementary sources, and (2) develop a spatial damage map of the affected buildings as a decision-support tool for relevant authorities. The findings of this study will enable government and local agencies to utilize the damage map as a key reference for post-disaster recovery planning, resource allocation, and the formulation of effective flood prevention measures. Furthermore, the results can serve as a valuable database for future research and disaster management planning in other areas with similar geographical and environmental characteristics.

Keywords: Flood, Building Damage, Spatial Map, Mae Sai, Natural Disaster



1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำท่วมเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างผลกระทบอย่างรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ลุ่มต่ำและพื้นที่ริมลำนํ้า ซึ่งมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดน้ำหลากและน้ำท่วมฉับพลัน เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ซึ่งเป็นพื้นที่ชายแดนทางตอนเหนือสุดของประเทศไทย ติดกับประเทศเมียนมา โดยมีแม่น้ำสายเป็นเส้นแบ่งเขตแดน ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ประกอบด้วยที่ราบลุ่มสลับกับภูเขา ทำให้บางพื้นที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมสูง ทั้งจากฝนตกหนักในพื้นที่และน้ำหลากจากพื้นที่ต้นน้ำในประเทศเพื่อนบ้าน ในปี พ.ศ. 2567 อำเภอแม่สายเผชิญกับเหตุการณ์น้ำท่วมที่รุนแรงที่สุดในรอบหลายสิบปี เนื่องจากอิทธิพลของพายุ "ยาหิง" ซึ่งส่งผลให้ฝนตกหนักติดต่อกันและครอบคลุมพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของไทยและเมียนมา พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบหนักที่สุด ได้แก่ อำเภอแม่สายและอำเภอเมือง โดยเฉพาะในอำเภอแม่สาย ประชาชนกว่า 53,209 คน ครัวเรือนและพื้นที่เกษตรกว่า 14,138 ไร่ได้รับความเสียหาย โรงเรียน 31 แห่ง ถนน 7 แห่ง และสะพาน 4 แห่งได้รับความเสียหายจากน้ำท่วม นอกจากนี้ยังมีผู้เสียชีวิตถึง 12 ราย เหตุการณ์น้ำท่วมในครั้งนี้มีสาเหตุจากฝนที่ตกหนักมากกว่า 200 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้น้ำแม่น้ำสายที่มีต้นทางจากรัฐฉาน ประเทศเมียนมา ไม่สามารถระบายได้ทันเวลา ทั้งนี้ แม่น้ำแม่สายมีการไหลผ่านประเทศไทยประมาณร้อยละ 20 ที่ชายแดนจังหวัดท่าขี้เหล็กและอำเภอแม่สาย การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและการทำเหมืองแร่ในประเทศเมียนมา รวมถึงการขยายตัวของเมืองทับเส้นทางการระบายน้ำในพรมแดนไทย-เมียนมา ทำให้การระบายน้ำในแม่น้ำแม่สายไม่เป็นที่ไปตามธรรมชาติและเกิดการเอ่อล้นในพื้นที่เศรษฐกิจหลัก เช่น ตลาดสายลมจอย ชุมชนแม่สาย ชุมชนเหมืองแดง ชุมชนไม้ลุงชน และชุมชนเกาะทราย เหตุการณ์น้ำท่วมครั้งนี้เกิดขึ้นถึง 8 ครั้งในปี พ.ศ. 2567 ซึ่งได้ทั้งความเสียหายจำนวนมากไว้หลังน้ำลด โดยบ้านเรือน โรงเรียน ร้านค้า อาคาร ถนน และสะพานต่างๆ ได้รับความเสียหาย ขณะที่ดินโคลนที่ทับถมในบางจุดสูงถึง 2 เมตรได้สร้างแรงดันให้โครงสร้างอาคารเสียหาย ต้องใช้เวลามากกว่า 2-3 สัปดาห์ในการฟื้นฟูพื้นที่ที่ถูกดินโคลนทับถมออกจากบ้านเรือน สถานการณ์ดังกล่าวทำให้เห็นถึงความจำเป็นในการมีข้อมูลที่สะท้อนขอบเขตและระดับความเสียหายของอาคารอย่างชัดเจนและเป็นระบบ เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนฟื้นฟูและจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายที่จัดทำโดยหน่วยงานราชการในการประเมินความเสียหายของอาคาร ช่วยลดข้อจำกัดจากการลงพื้นที่ ทั้งด้านเวลา งบประมาณ และความปลอดภัย อีกทั้งยังสามารถครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว การนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์และสร้างแผนที่เชิงพื้นที่ (Spatial Map) จะช่วยให้การนำเสนอข้อมูลความเสียหายมีความชัดเจน เข้าใจง่าย และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงทั้งในระดับนโยบายและระดับปฏิบัติ การสร้างแผนที่แสดง ความเสียหายจากน้ำท่วมในอำเภอแม่สายจึงเป็นงานวิจัยที่มีความสำคัญ

อย่างยิ่งต่อการจัดการภัยพิบัติ และยังสามารถต่อยอดเป็นฐานข้อมูลสำหรับการวางแผนรับมือภัยน้ำท่วมในพื้นที่อื่นที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์และความเสี่ยงใกล้เคียงกันได้ในอนาคต ผู้วิจัยได้ขอข้อมูลจากสมาคมโครงสร้างแห่งประเทศไทย ซึ่งได้ลงพื้นที่ร่วมกับวิศวกรอาสา และเทศบาลอำเภอแม่สาย เก็บข้อมูลภาพถ่าย และประเมินความเสียหายให้กับผู้ประสบภัยในเขต อ.แม่สาย จ.เชียงราย เมื่อ 4-6 ต.ค. 2567 19-20 ต.ค. 2567 และ 2-3 พฤศจิกายน 2567 เพื่อนำไปใช้ในการการจ่ายเงินเยียวยาจากรัฐบาล ทำให้มีข้อมูลความเสียหายของอาคารแต่ละหลังจำนวน 1209 หลัง ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจ และเกิดแนวคิดที่จะสร้างแผนที่ความเสียหายจากเหตุการณ์อุทกภัยในครั้งนี้ ที่มีต่ออาคารและบ้านเรือนในเขตเศรษฐกิจอำเภอแม่สาย เพื่อเก็บเป็นข้อมูลสำคัญ และอาจนำไปเชื่อมโยงกับการสร้างแผนที่ความเสี่ยงต่อเหตุการณ์น้ำท่วมที่อาจเกิดขึ้นซ้ำในอนาคตได้



รูปที่ 1 เหตุการณ์น้ำท่วมอ.แม่สาย จ.เชียงราย พ.ศ.2567

แหล่งที่มา <https://www.thaipbs.or.th/news/content/344023>



รูปที่ 2 ภาพมุมสูงเหตุการณ์น้ำท่วมอ.แม่สาย จ.เชียงราย พ.ศ. 2567

แหล่งที่มา: <https://www.fm91bkk.com/newsarticle/36657>

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อจัดทำแผนที่แสดงความเสียหายของโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างภายใต้เหตุการณ์น้ำท่วมที่เกิดขึ้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาขอบเขตความเสียหายในพื้นที่ที่โครงสร้างสิ่งปลูกสร้างได้รับผลกระทบเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำหลาก-น้ำท่วมในอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย



1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1. ขอบเขตพื้นที่ : การศึกษาครั้งนี้ครอบคลุมพื้นที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ซึ่งได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งรุนแรงในปี พ.ศ. 2567 โดยมุ่งเน้นพื้นที่ชุมชนและเขตที่อยู่อาศัยที่ตั้งอยู่ริมแม่น้ำสาย และลำน้ำสาขา รวมถึงพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญที่มีอาคารและสิ่งปลูกสร้างได้รับความเสียหาย

1.3.2. ขอบเขตของข้อมูล :

- ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากหน่วยงานราชการ ซึ่งบันทึกหลังเหตุการณ์น้ำท่วมในปี พ.ศ. 2567 ไม่มีการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยตรง แต่ใช้การวิเคราะห์เชิงภาพและเชิงพื้นที่เป็นหลัก

1.3.3. ระยะเวลา : หนึ่งภาคเรียนการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ได้แผนที่แสดงความเสียหายของโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างภายใต้เหตุการณ์น้ำหลากที่เกิดขึ้น และจัดทำแผนที่แสดงตำแหน่งโครงสร้างและสร้างสิ่งปลูกสร้างจากข้อมูลความเสียหายที่ได้สำรวจ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนรับมือกับเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตของ อำเภอ แม่สาย จังหวัดเชียงราย

1.4.2. ทำให้ประชาชน และหน่วยงานระดับท้องถิ่นมีความรู้ ความเข้าใจถึงขอบเขตความเสียหายในพื้นที่ที่โครงสร้างสิ่งปลูกสร้างได้รับผลกระทบเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำหลาก-น้ำท่วม ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการวางแผนบริหารจัดการพื้นที่เพื่อเตรียมตัวรับมือกับเหตุการณ์ในอนาคต

1.4.3. ข้อมูลแผนที่ดังกล่าว ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการคาดการณ์แนวโน้มความรุนแรงของเหตุการณ์ รวมถึงสามารถประเมินความเสียหายและจัดเตรียมความพร้อมเพื่อวางแผนรับมือกับเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

การประเมินความเสียหายของอาคารและสิ่งปลูกสร้างจากเหตุการณ์น้ำท่วมเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการจัดการภัยพิบัติ เนื่องจากข้อมูลความเสียหายดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญในการวางแผนฟื้นฟูและบริหารจัดการทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงพื้นที่ช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถรับรู้ถึงขอบเขตของความเสียหายและลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ต้องการความช่วยเหลืออย่างเร่งด่วน

ปัจจุบัน เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System: GIS) รวมถึงการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมและภาพถ่ายมุมสูง (Aerial Imagery) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการประเมินความเสียหาย

เชิงพื้นที่ ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้มีข้อดีด้านความรวดเร็วและความแม่นยำในการเก็บข้อมูล โดยสามารถเก็บข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ในเวลาอันสั้น ลดข้อจำกัดและความเสี่ยงของการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจริง โดยเฉพาะในช่วงที่สถานการณ์ภัยพิบัติยังคงดำเนินอยู่

การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อประเมินความเสียหายมักเริ่มต้นจากการจำแนกพื้นที่น้ำท่วมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากภัยธรรมชาติ จากนั้นทำการประเมินอาคารที่เสียหายอย่างละเอียด ผ่านการสังเกตลักษณะต่าง ๆ ที่แสดงถึงความเสียหาย เช่น โครงสร้างที่พังถล่ม รอยร้าวขนาดใหญ่ หรือความเสียหายของส่วนประกอบผิวเผิน ทั้งนี้ ข้อมูลจากภาพถ่ายมุมสูงและดาวเทียมช่วยให้สามารถประเมินความเสียหายโดยใช้สัญญาณภาพที่บ่งบอกถึงสภาพอาคารและบริบทโดยรอบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของรูปทรงอาคารที่ทรุดตัว หรือการรुकล้ำของน้ำท่วม

2.1.1 เกณฑ์การจำแนกระดับความเสียหายของอาคารตามกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (ปภ.)

ในการประเมินระดับความเสียหายของอาคารจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ โดยเฉพาะอุทกภัย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (ปภ.) ได้กำหนดแนวทางการจำแนกระดับความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการจ่ายเงินเยียวยาและวางแผนฟื้นฟูพื้นที่ โดยแบ่งออกเป็น

3 ระดับหลัก ดังนี้ระดับความเสียหายมาก (Severe Damage)

ความเสียหายมาก (Severe Damage)

โครงสร้างหลักของอาคาร เช่น เสา คาน หรือฐานราก ได้รับความเสียหายรุนแรงถึงขั้นไม่สามารถใช้งานได้ ผนังหรือหลังคาพังถล่ม มีการแตกร้าวของโครงสร้างจนเกิดอันตรายต่อการพักอาศัยจำเป็นต้องรื้อถอนหรือสร้างใหม่ทั้งหมด

เกณฑ์อ้างอิง: ปภ. ระบุเป็น “ความเสียหายระดับมาก” ไม่สามารถใช้การได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพความเสียหายบ้านหลังหลัง ระดับความเสียหายมาก



ความเสียหายปานกลาง (Moderate Damage)

โครงสร้างหลักของอาคารยังคงอยู่ในสภาพมั่นคง แต่ส่วนประกอบรอง เช่น ผนัง ฝ้า หลังคา หรือพื้นได้รับความเสียหายบางส่วน มีรอยร้าวขนาดเล็กถึงปานกลาง ไม่กระทบต่อเสถียรภาพของอาคาร สามารถซ่อมแซมได้ ภายในวงเงินไม่เกิน 30–70% ของมูลค่าอาคาร

เกณฑ์อ้างอิง: ปก. ระบุเป็น “ความเสียหายระดับปานกลาง” ต้องได้รับการซ่อมแซมก่อนเข้าอยู่อาศัย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาพความเสียหายระดับความเสียหายปานกลาง

ความเสียหายน้อย (Minor Damage)

ความเสียหายเฉพาะส่วนผิวเผิน เช่น สีหลุดลอก เฟอร์นิเจอร์หรือระบบไฟฟ้าเสียหายเล็กน้อยไม่มีผลต่อความมั่นคงของโครงสร้างหลัก สามารถอยู่อาศัยได้ตามปกติหลังน้ำลด

เกณฑ์อ้างอิง: ปก. ระบุเป็น “ความเสียหายระดับเล็กน้อย (น้อยกว่า 30% ของมูลค่าอาคาร)” ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพความเสียหายบ้านหลังหลัง ระดับความเสียหายน้อย

การนำเกณฑ์ของ ปก. มาใช้เป็นกรอบในการจำแนกระดับความเสียหายช่วยให้การประเมินมีมาตรฐานและสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐอื่นได้อย่างสอดคล้อง ทั้งยังสามารถเชื่อมโยงกับ

หลักเกณฑ์การเยียวยาผู้ประสบภัยของรัฐบาล ซึ่ง ปก. ใช้เป็นแนวทางหลักในการจ่ายเงินช่วยเหลือกรณีบ้านเรือนเสียหายจากภัยธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงนำแนวทางของ การตรวจสอบความเสียหายขั้นต้นของโครงสร้างอาคารหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวของกรมโยธาธิการและผังเมืองมาประยุกต์ใช้ ซึ่งแบ่งระดับความเสียหายโครงสร้างอาคารเป็น 3 ระดับคือ เสียหายเล็กน้อย เสียหายปานกลาง และเสียหายมาก (เขียว เหลือง แดง) ประกอบกับหลักเกณฑ์ดังกล่าวสอดคล้องกับ มาตรฐานข้อมูลด้านสาธารณสุข กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2550 ที่ระบุให้เก็บข้อมูล สภาพโครงสร้างพื้นฐาน (ถนน/สะพาน/อ่างเก็บน้ำ/ฝาย/ท่าเรือ ในพื้นที่เสี่ยง) กรณี พื้นที่เสี่ยงอุทกภัยและดินโคลนถล่ม สภาพโครงสร้างพื้นฐานที่มีการรวบรวมข้อมูลโดยกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย

มีหลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดรหัส

- 1=ไม่สามารถใช้การได้
- 2=ใช้การได้แต่ต้องซ่อมแซม
- 3=ชำรุดแต่ยังใช้การได้

หลังจากดำเนินการประเมินความเสียหายของอาคารบ้านเรือนทุกหลังในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลรายละเอียดความเสียหายของแต่ละหลังจะถูกบันทึกอย่างเป็นระบบในโปรแกรม Microsoft Excel โดยจัดเก็บข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ (ละติจูดและลองจิจูด) ซึ่งระบุพิกัดตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร รวมถึงหมายเลขบ้านและระดับความเสียหายตามเกณฑ์ที่กำหนด ข้อมูลเหล่านี้ถือเป็นฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลในขั้นตอนถัดไป

จากนั้น ข้อมูลที่บันทึกในโปรแกรม Excel จะถูกนำเข้าสู่แพลตฟอร์มสร้างแผนที่เชิงพื้นที่บนระบบออนไลน์ เช่น Google My Map ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถสร้างแผนที่เชิงโต้ตอบ (Interactive Map) ได้สะดวกและรวดเร็ว โดยระบบจะใช้พิกัดละติจูดและลองจิจูดเพื่อกำหนดตำแหน่งของแต่ละอาคารบนแผนที่ พร้อมแสดงข้อมูลรายละเอียด เช่น หมายเลขบ้านและระดับความเสียหาย เมื่อผู้ใช้งานทำการเลือกหรือคลิกที่จุดนั้น ๆ

โปรแกรม Google My Map

Google My Map เป็นแพลตฟอร์มออนไลน์ที่พัฒนาโดย Google เพื่อให้ผู้ใช้สามารถสร้าง แก้ไข และแชร์แผนที่เชิงพื้นที่แบบอินเทอร์แอคทีฟได้อย่างง่ายดาย ผ่านเว็บเบราว์เซอร์โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม ระบบนี้รองรับการนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ในรูปแบบไฟล์ต่าง ๆ เช่น CSV, KML หรือ GPX ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถแสดงข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์ (ละติจูดและลองจิจูด) รวมถึงข้อมูลรายละเอียดอื่น ๆ ในรูปแบบของจุด เส้น หรือพื้นที่บนแผนที่

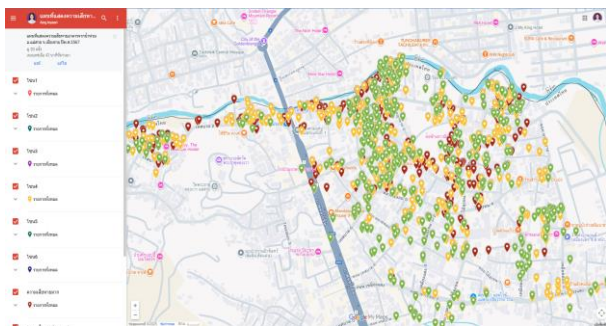


Google My Map มีฟังก์ชันการใช้งานที่ครอบคลุม เช่น การกำหนดสัญลักษณ์ สี และเลเยอร์ เพื่อแยกแยะข้อมูลตามประเภทหรือลักษณะต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มคำอธิบาย ภาพถ่าย หรือข้อมูลเสริมลงในแต่ละจุดข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลมีความสมบูรณ์และเข้าใจง่ายขึ้น

แพลตฟอร์มนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และการจัดการภัยพิบัติ เนื่องจากช่วยให้การรวบรวมและนำเสนอข้อมูล ความเสียหายในเชิงพื้นที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถเข้าถึงข้อมูลและวิเคราะห์สถานการณ์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

Google My Map ยังมีข้อดีด้านความสะดวกในการแบ่งปันข้อมูล โดยสามารถตั้งค่าการเข้าถึงข้อมูลได้หลายระดับ ตั้งแต่สาธารณะจนถึงเฉพาะกลุ่มผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาต ซึ่งส่งเสริมการทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยงาน ภาครัฐ ภาคเอกชน และชุมชนในกระบวนการวางแผนและฟื้นฟูหลังภัยพิบัติ

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว Google My Map จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างแผนที่เชิงพื้นที่ที่สนับสนุนการตัดสินใจ และการบริหารจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ในทุกขั้นตอนของการจัดการภัยพิบัติ



รูปที่ 6 รูปตัวอย่างการทำแผนที่แสดงตำแหน่งในโปรแกรม Google My Map

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายคมสัน ศรีบุญเรือง(2565) การจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยพิบัติด้านอุทกภัย ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาความเสี่ยงภัยพิบัติจากน้ำท่วมจากภัยธรรมชาติจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และ 2) เพื่อวิเคราะห์พื้นที่เปราะบางจากการเกิดภัยน้ำท่วมจากภัยธรรมชาติด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เครื่องมือการวิจัย ได้แก่ การสำรวจพื้นที่แบบสอบถาม ข้อมูลด้านความเปราะบาง กลุ่มประชากร และกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย เจ้าหน้าที่องค์การบริหารส่วนท้องถิ่นตำบลลำต้นสะทอน และภาคประชาชนที่มีการป้องกันและบริหารจัดการภัยพิบัติในพื้นที่ ศึกษาข้อมูลประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน ข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลเชิงสถิติที่ได้จากพื้นที่ภาคสนาม โดยใช้การวิเคราะห์พื้นที่ผิวศักยภาพ (Potential Surface Analysis: PSA) ผลการประเมินความเสี่ยงโดยใช้การวิเคราะห์การจัดการความเสี่ยง แสดงค่าผลการศึกษาความเสี่ยงเป็นค่าร้อยละ

ผลการวิจัยพบว่าโดยสรุป ความเสี่ยงภัยพิบัติจากน้ำท่วมจากภัยธรรมชาติด้วยการประยุกต์สารสนเทศภูมิศาสตร์ 2 ประเด็น ดังนี้ ประเด็นที่

หนึ่ง แผนที่ความเสี่ยงภัยพิบัติในพื้นที่ตำบลลำต้นสะทอน แสดงให้เห็นถึงพื้นที่เสี่ยงภัยระดับสูง พื้นที่เปราะบางคือเกิดน้ำท่วมบ่อย คิดเป็นร้อยละ 29.40 และพื้นที่เสี่ยงภัยระดับปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 42.90 พื้นที่เสี่ยงภัยน้อย คิดเป็นร้อยละ 27.70 ของพื้นที่เสี่ยงภัย จัดทำแผนที่เสี่ยงภัยรายประมาณ ผลการวิเคราะห์ความเปราะบางในภาพรวมพบว่า พบว่า มีบ้านเรือน 1,145 หลัง ที่มีความเปราะบางต่อภัยอยู่ในระดับสูง คิดเป็นร้อยละ 37.8 ประเด็นที่สอง ผลการวิเคราะห์ความรุนแรงจากทุกภัยในระดับตำบล จำนวน 27 หลังคาเรือน ผลวิเคราะห์หลักได้ไปสู่การจัดการบริหารจากทุกภัยจากพื้นที่ต้นแบบไปสู่การปฏิบัติจริง โดยได้เสนอแนวทางหลักด้านการบริหารจัดการเชิงพื้นที่ ได้แก่ การบริหารจัดการด้านโครงสร้างพื้นฐานด้านภัยพิบัติ ระหว่างโครงสร้างและสิ่งสาธารณภัยที่เกิดขึ้น ขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่นอำเภอลำต้นสะทอน จังหวัดกาญจนบุรี

ไพศาล จั้ว(2564) การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ น้ำท่วมเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน บทความวิชาการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรวบรวมรายเกี่ยวกับเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ วิเคราะห์ปริมาณทางภูมิศาสตร์ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำท่วมพื้นที่อำเภอวังใหญ่ จังหวัดน่าน วิจัยดำเนินการวิจัยได้แก่ การวิเคราะห์ปัจจัยขับเคลื่อนแบบจำลองกระบวนการคำนวณเชิงวิเคราะห์ โดยผู้เขียนอาศัยปัจจัยด้านน้ำฝนเป็นปัจจัยให้คะแนนน้ำหนักปัจจัยและแบบจำลองข้อมูลที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง ผลการศึกษาพบว่า มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดภัยน้ำท่วม ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ความลาดชัน ลักษณะพื้นที่และความสูง ระยะทางจากแม่น้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดิน และฤดูกาล ตามลำดับ ข้อเสนอแนะจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลปัจจัยการลดระดับปัจจัยความสามารถในการระบายน้ำของดินในเขตหมู่บ้าน และการสำรวจพื้นที่กลุ่มประชากรระดับครัวเรือนสำหรับจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ร่วมกับพื้นที่น้ำท่วม ซึ่งเป็นหน้าที่ของหน่วยงานปกครองส่วนท้องถิ่นหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องสำหรับการศึกษาอย่างเป็นไปได้อย่างสูงในโครงการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมในอนาคตได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเรื่อง “การสร้างแผนที่แสดงความเสี่ยงภัยพิบัติจากน้ำท่วม” ในพื้นที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ประกอบด้วยขั้นตอนหลักดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยตรง ข้อมูลพื้นฐานจึงถูกจัดหามาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของภาพถ่ายพื้นที่น้ำท่วมและอาคารบ้านเรือนในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ยังรวบรวมข้อมูลเสริม เช่น แผนที่ฐาน พิกัดภูมิศาสตร์



และข้อมูลทะเบียนบ้านที่จำเป็นสำหรับการระบุและวิเคราะห์ความเสียหาย

2. การประเมินความเสียหายของอาคาร

ทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อประเมินระดับความเสียหายของอาคารบ้านเรือนแต่ละหลัง โดยแบ่งความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ความเสียหายมาก (Severe Damage) ความเสียหายปานกลาง (Moderate Damage) และความเสียหายน้อย (Minor Damage) ตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยอาศัยการสังเกตลักษณะความเสียหายที่ปรากฏบนภาพถ่าย เช่น รอยร้าวขนาดใหญ่ โครงสร้างพังถล่ม หรือความเสียหายในส่วนฉนวน

3. การบันทึกและจัดเก็บข้อมูล

รวบรวมข้อมูลรายละเอียดความเสียหายของแต่ละหลัง พร้อมระบุพิกัดละติจูดและลองจิจูด รวมถึงหมายเลขบ้าน บันทึกลงในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่สำหรับใช้ในขั้นตอนต่อไป

4. การสร้างแผนที่แสดงความเสียหาย

นำข้อมูลที่บันทึกไว้ในโปรแกรม Excel เข้าสู่โปรแกรม Google My Map เพื่อนำข้อมูลพิกัดและรายละเอียดต่าง ๆ มาสร้างเป็นแผนที่เชิงพื้นที่แบบอินเทอร์แอคทีฟ โดยกำหนดสัญลักษณ์ สี และหมวดหมู่แยกแยะตามระดับความเสียหายของอาคาร เพื่อให้ข้อมูลที่นำเสนอมีความชัดเจนและง่ายต่อการวิเคราะห์

5. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ

นำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาสรุปเพื่อให้เห็นภาพรวมของความเสียหายในพื้นที่ศึกษา พร้อมจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและมาตรการทางเทคนิคสำหรับการจัดการภัยน้ำท่วมและการฟื้นฟูบ้านเรือนในพื้นที่ เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและบริหารจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ แผนที่ความเสียหายที่สร้างขึ้นได้กำหนด **สัญลักษณ์หมวดสีต่าง ๆ เพื่อแสดงระดับความเสียหายของอาคาร ดังนี้**

- **หมวดสีแดง** แทนพื้นที่ที่มี **ความเสียหายมาก (Severe Damage)**
- **หมวดสีเหลือง** แทนพื้นที่ที่มี **ความเสียหายปานกลาง (Moderate Damage)**
- **หมวดสีเขียว** แทนพื้นที่ที่มี **ความเสียหายน้อย (Minor Damage)**

การใช้สีดังกล่าวช่วยให้สามารถสังเกตและเปรียบเทียบระดับความเสียหายได้อย่างชัดเจนในภาพรวม โดยเฉพาะเมื่อซูมดูในพื้นที่ชุมชน จะ

เห็นแนวกระจายของสีที่สัมพันธ์กับทิศทางการไหลของน้ำและระดับความสูงของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน

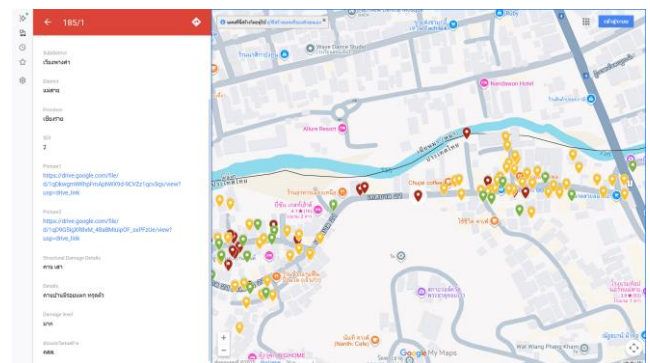
4. ผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลความเสียหายของอาคารในเขตอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย จากเหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ. 2567 โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากหน่วยงานราชการ ร่วมกับการประเมินระดับความเสียหายตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วนำเข้าสู่โปรแกรม **Google My Map** เพื่อสร้างแผนที่เชิงพื้นที่แสดงตำแหน่งอาคารที่ได้รับผลกระทบ

ลิงค์เข้าสู่แผนที่ความเสียหายอุทกภัยอำเภอแม่สาย

<https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=11qezcaPApSHF69kLzk3LVKjkHKCkR0&usp=sharing>

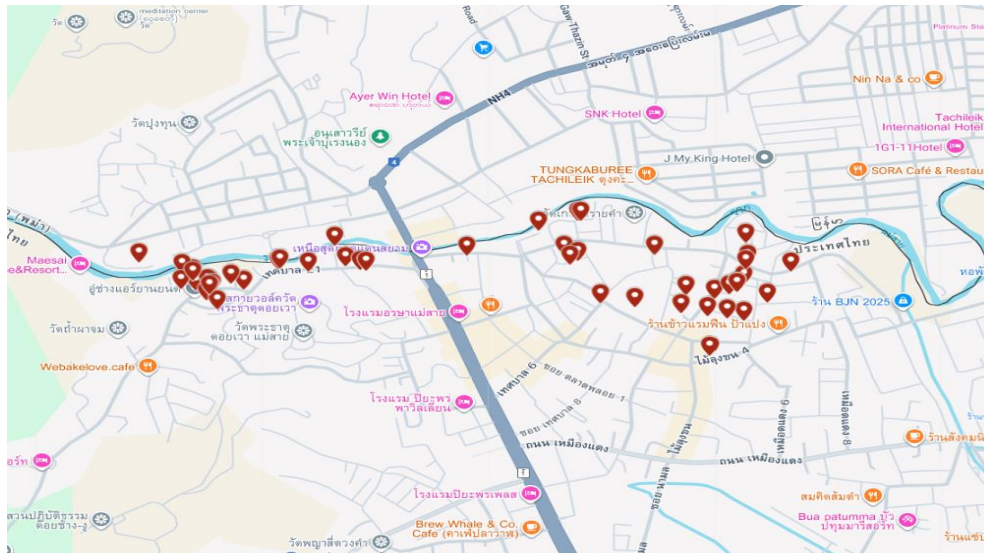
แผนที่ดังกล่าวสามารถแสดงข้อมูลของแต่ละอาคารแบบอินเทอร์แอคทีฟ ผู้ใช้งานสามารถคลิกที่ตำแหน่งจุดเพื่อดูรายละเอียด เช่น หมายเลขบ้าน ระดับความเสียหาย และภาพประกอบ ซึ่งช่วยให้เห็นขอบเขตความเสียหายในพื้นที่ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย ดังรูปที่ 7



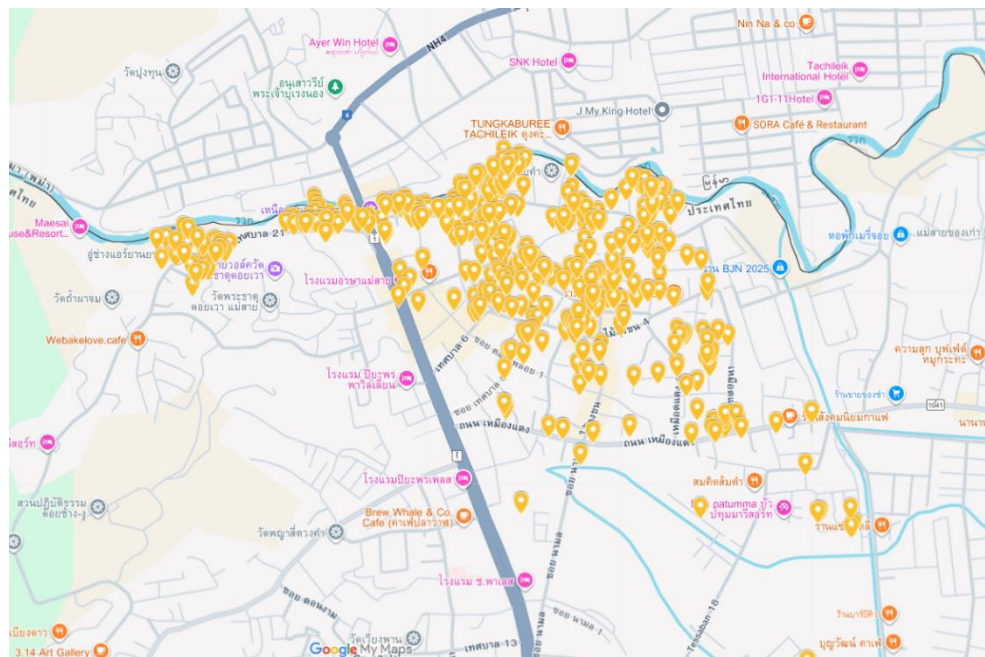
รูปที่ 7 รูปตัวอย่างการใช้งานแผนที่ในโปรแกรม Google My Map

4.1 จุดเด่นของแผนที่

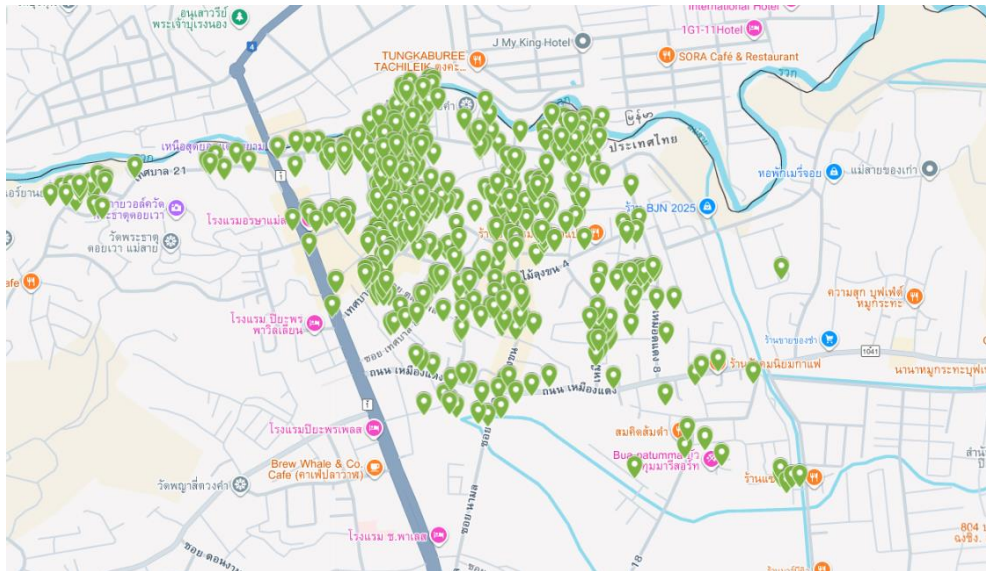
1. เป็นแผนที่เชิงโต้ตอบ (Interactive Map) สามารถซูมเข้า-ออก หรือเลือกพื้นที่เฉพาะจุดได้อย่างสะดวก
2. แสดงระดับความเสียหายด้วยสีและสัญลักษณ์ต่างกัน ทำให้มองเห็นภาพรวมความรุนแรงของความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว
3. สามารถดูรูปความเสียหายของอาคารได้ (รูปภาพไม่สามารถเผยแพร่ได้ทั้งหมด เนื่องจากอาจเป็นการละเมิด พรบ.คุ้มครองความเป็นส่วนตัวส่วนบุคคล)
4. เผยแพร่และปรับปรุงข้อมูลได้ง่าย ผ่านระบบออนไลน์ของ Google My Map โดยไม่ต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม



รูปที่ 8 รูปแสดงพื้นที่ที่มีความเสียหายมากในโปรแกรม Google My Map



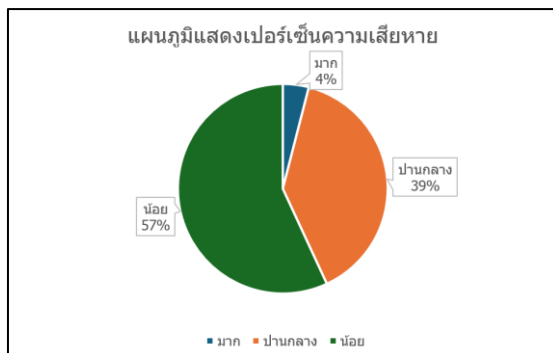
รูปที่ 9 รูปแสดงพื้นที่ที่มีความเสียหายปานกลางในโปรแกรม Google My Map



รูปที่ 10 รูปแสดงพื้นที่ที่มีความเสียหายน้อยในโปรแกรม Google My Map

4.2 ผลการประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

จากการรวบรวมข้อมูลอาคารที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์อุทกภัยในอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย จำนวนทั้งสิ้น 1,209 หลัง พบว่ามีระดับความเสียหายแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่ตั้ง ลักษณะภูมิประเทศ และทิศทางการไหลของน้ำ โดยแบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ความเสียหายมาก ความเสียหายปานกลางและความเสียหายน้อย ดังตาราง



รูปที่ 11 รูปแผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละ ระดับความเสียหายจากอุทกภัย

ระดับความเสียหาย	จำนวน (หลัง)	ร้อยละ(%)
มาก (Severe Damage)	48	4.0%
ปานกลาง (Moderate Damage)	473	39.1%
น้อย (Minor Damage)	688	46.9%
รวม	1,209	100 %

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า อาคารส่วนใหญ่ในพื้นที่ศึกษาได้รับความเสียหายน้อยถึงปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 96 ของอาคารทั้งหมด ขณะที่อาคารที่ได้รับ ความเสียหายรุนแรง มีเพียงร้อยละ 4 ซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่บริเวณ ริมแม่น้ำแม่สายและพื้นที่ลุ่มต่ำ ที่มีการไหลผ่านของกระแสน้ำโดยตรง

4.3 การกระจายตัวของความเสียหาย

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของหมุดในพื้นที่ พบว่า

- หมุดสีแดง มีความหนาแน่นมากบริเวณริมแม่น้ำแม่สาย โดยเฉพาะในพื้นที่ ตลาดสายลมจอย ชุมชนแม่สาย และชุมชนเหมืองแดงซึ่งเป็นเขตเศรษฐกิจหลักที่อยู่ติดลำน้ำโดยตรง อาคารส่วนใหญ่เป็น บ้านไม้ หรือ ครึ่งปูนครึ่งไม้ ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 15 ปี โครงสร้างฐานรากดิน ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงดันน้ำโดยตรง เมื่อถูกน้ำท่วมขังและกระแสน้ำแรง ทำให้ผนังและพื้นแตกร้าวหรือพังถล่ม ส่วนใหญ่ตั้งอยู่บริเวณริมแม่น้ำแม่สาย หรือแนวทางน้ำหลัก บางส่วนเป็นโครงสร้างเหล็กเบา ซึ่งบิดตัวจากแรงน้ำ โดยรวมมีความเปราะบางสูง จำเป็นต้องซ่อมแซมหรือรื้อถอน
- หมุดสีเหลือง กระจายอยู่ในแนวรอบนอกของชุมชนใกล้ลำน้ำ หรือในพื้นที่ราบลุ่มที่น้ำท่วมถึงระดับสูงแต่ไม่รุนแรงเท่าบริเวณริมตลิ่ง ส่วนใหญ่เป็น บ้านคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ชั้นเดียว หรือ ครึ่งปูนครึ่งไม้ โครงสร้างหลักยังมั่นคง แต่มีความเสียหายในส่วนประกอบรอง เช่น ผนัง ฝ้าเพดาน หรือพื้น ตั้งอยู่บริเวณรอบนอกของชุมชนริมน้ำ ซึ่งน้ำท่วมถึงแต่ไม่รุนแรง บางหลังน้ำท่วมถึงระดับ 0.5–1 เมตร ส่งผลให้วัสดุผิวและระบบไฟฟ้าเสียหาย แต่อาคารสามารถซ่อมแซมและกลับมาใช้งานได้



- หมดสิทธิ์พบมากในพื้นที่ยกระดับ เช่น บริเวณทางทิศเหนือ และตะวันออกของเขตเมือง ซึ่งอยู่ห่างจากแนวแม่น้ำแม่สาย ส่วนใหญ่เป็น บ้านคอนกรีตเสริมเหล็ก 1-2 ชั้น ฐานรากมั่นคง ยกพื้นสูงกว่าระดับน้ำท่วมเฉลี่ย ตั้งอยู่ในเขตชั้นในของเมือง หรือพื้นที่ยกระดับ ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย ความเสียหาย พบเพียงสไลด์ลง ทรุดดิน หรือวัสดุตกแตงบวม โดยรวมมีความ ทนทานสูงและอยู่ในพื้นที่ปลอดภัยกว่ากลุ่มอื่น

4.4 ลักษณะเชิงพื้นที่และปัจจัยที่มีผล

- พื้นที่ที่เสียหายมากตั้งอยู่ในบริเวณที่มี ทางน้ำหลักไหลผ่านและ คับแคบ ซึ่งเมื่อน้ำหลากจะเกิดการกัดเซาะตลิ่งและพัดพาดิน โคลนเข้าสู่อาคาร
- อาคารในบริเวณตลาดและเขตชุมชนหนาแน่น ได้รับผลกระทบ จาก กระแสน้ำที่พัดพาเศษวัสดุ ท่อนซุง และโคลนตะกอน ทำให้ความเสียหายรุนแรง
- พื้นที่ชั้นในของเมืองซึ่งมีความสูงกว่าตลิ่ง ได้รับผลกระทบใน ระดับน้อย เนื่องจากน้ำท่วมขังชั่วคราวและระบายออกได้เร็ว กว่า



รูปที่12 ข้อมูลแผนที่กับลักษณะภูมิประเทศและทิศทางการไหลของน้ำ

ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศและทิศทางการไหลของน้ำหลากใน เหตุการณ์ครั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในไฟล์ Excel ซึ่งระบุประเภท โครงสร้างของอาคารแต่ละหลัง พบว่าการที่อาคารซึ่งอยู่ติดกันได้รับความ เสียหายต่างระดับกันนั้น มีสาเหตุหลักมาจาก ความแตกต่างของวัสดุและ ความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ได้แก่

- บ้านที่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) มักได้รับความ เสียหายน้อยกว่า แม้อยู่ในบริเวณที่น้ำท่วมถึง เนื่องจากมีความ มั่นคงแข็งแรง สามารถรับแรงดันของกระแสน้ำได้ดีกว่า
- บ้านที่สร้างด้วย ไม้ เหล็ก หรือครึ่งปูนครึ่งไม้ จะมีความ เปราะบางกว่า โดยเฉพาะส่วนฐานรากหรือผนังที่ไม่ได้ออกแบบ เพื่อรับแรงดันน้ำ ทำให้เกิดการพังถล่มหรือแตกร้าวได้ง่าย
- ในบางพื้นที่พบว่า บ้านที่อยู่ติดกัน แต่ระดับพื้นอาคารต่างกัน เพียงเล็กน้อย มีผลต่อระดับน้ำท่วมที่เข้าถึง ทำให้ระดับความ เสียหายแตกต่างกัน

ดังนั้น แม้อาคารจะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน แต่ ปัจจัยด้านวัสดุ โครงสร้างอาคาร และระดับพื้นดิน มีผลโดยตรงต่อระดับความเสียหายที่ เกิดขึ้น ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นว่า การออกแบบและก่อสร้างบ้านในพื้นที่ เสี่ยงน้ำท่วมควรคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยเฉพาะฐานราก และผนัง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงดันน้ำและการกัดเซาะของดิน

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในเขตเศรษฐกิจ เช่น การถม ดิน หรือการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ใกล้ทางน้ำ ยังส่งผลต่อการระบายน้ำ ตามธรรมชาติ ทำให้เกิดการท่วมขังเฉพาะจุด ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้บ้าน บางหลังแม้อยู่ใกล้กันแต่ได้รับผลกระทบต่างระดับกัน

4.5 การเชื่อมโยงกับข้อมูลภาคสนาม

ผลจากแผนที่สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามในรายงานของหน่วยงาน ราชการและภาพถ่ายมุมสูงที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัย พบว่า

- อาคารที่พังถล่มหรือเสียหายโครงสร้างหลักสอดคล้องกับ บริเวณหมดสิทธิ์แดงบนแผนที่
- พื้นที่ที่มีการทับถมของดินโคลนหนา (ประมาณ 1-2 เมตร ตาม รายงานในไฟล์บทความ) ตรงกับเขตที่มีหมดสิทธิ์เหลืองและแดง หนาแน่น
- การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากพื้นที่ป่าและการถมดินในเขต เศรษฐกิจส่งผลให้การระบายน้ำผิดธรรมชาติและก่อให้เกิดน้ำ หลากฉับพลัน

ในกลุ่มอาคารที่เสียหายมาก พบว่ามีลักษณะของความเสียหายเชิง โครงสร้าง เช่น ผนังและเสาเกิดการแตกร้าวหรือพังถล่ม มีดินโคลนทับถม บางหลังฐานรากถูกเซาะกัดเซาะจากน้ำเชี่ยวและตะกอนดิน ส่งผลให้ไม่ สามารถใช้งานได้ จำเป็นต้องรื้อถอนหรือซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน

สำหรับอาคารที่เสียหายปานกลาง ส่วนใหญ่เป็นบ้านพักอาศัยชั้นเดียว ที่ถูกน้ำท่วมถึงระดับฝ้าเพดานหรือหลังคาบางส่วน ความเสียหายมักเกิดกับ วัสดุตกแต่ง เช่น กระเบื้อง ผนัง ฝ้า หรือระบบไฟฟ้า โดยโครงสร้างหลัก ยังคงมั่นคง สามารถซ่อมแซมและกลับมาใช้งานได้

ส่วนอาคารที่เสียหายน้อย ส่วนใหญ่ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่สูงหรือไกลจาก แม่น้ำแม่สาย ความเสียหายที่พบเป็นเพียงลักษณะผิวเผิน เช่น สไลด์ลง ทรุดดินโคลนเกาะตามผนัง วงกบประตูหน้าต่างบวม หรือพื้นผิววัสดุเสื่อมสภาพ จากการแช่น้ำเป็นเวลานาน

เมื่อวิเคราะห์เชิงพื้นที่ร่วมกับแผนที่ Google My Map จะเห็นได้ว่า ระดับความเสียหายลดหลั่นตามระยะทางจากแม่น้ำแม่สาย อย่างมี นัยสำคัญ พื้นที่ใกล้ตลิ่งมีความเสียหายรุนแรง ส่วนพื้นที่ชุมชนตอนในและ พื้นที่ยกระดับมีความเสียหายน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศ และทิศทางการไหลของน้ำหลากในเหตุการณ์ครั้งนี้



5. สรุปผล

จากการสำรวจอาคารที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยในอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย พ.ศ. 2567 พบว่ามีอาคารเสียหายทั้งหมด 1,209 หลัง โดยแบ่งเป็น

- เสียหายมาก 48 หลัง (4%)
- เสียหายปานกลาง 473 หลัง (39.1%)
- เสียหายน้อย 688 หลัง (56.9%)

ส่วนใหญ่ได้รับความเสียหายในระดับ น้อยถึงปานกลาง (96%) ขณะที่อาคารที่เสียหายรุนแรงส่วนใหญ่อยู่ริมแม่น้ำแม่สาย ซึ่งเป็นจุดที่กระแสน้ำเชี่ยวและมีดินโคลน เศษวัสดุ และท่อนซุงพัดพามากระแทกอาคารโดยตรง

แผนที่ Google My Maps ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงระดับความเสียหายได้อย่างชัดเจน โดยใช้หมวด สีแดง-เหลือง-เขียว แทนความรุนแรงต่างระดับ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศจริง และสามารถใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนฟื้นฟูพื้นที่และป้องกันอุทกภัยในอนาคต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

การออกแบบแผนที่แสดงความเสี่ยงภัยอาคารเนื่องจากน้ำท่วมสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ รศ.ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ

มาโดยตลอดผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ที่ได้ให้การ สนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

เอกสารอ้างอิง

คมสัน ศรีบุญเรือง.(2565).การจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยพิบัติด้านอุทกภัย ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี(รายงานผลการวิจัย).ปีที่ 13 ฉบับที่สี่คันจาก

<https://so01.tcithaijo.org/index.php/truhusocjo/article/download/253428/171510/969711>

สุพิศมัย ธนาธณ.(2552).การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการกำหนดพื้นที่เสี่ยงอุทกภัย จังหวัดอ่างทอง(รายงานผลการวิจัย).สืบค้นจาก

<https://repository.nida.ac.th/items/348cd0f2-bec7-4d6b-a1e6-f228934f5575>

ไพศาล จีฟู.(2564).การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติน้ำท่วมด้วยแบบจำลองกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Flood Risk Assessment using Analytical Hierarchy Process and GIS)(รายงานผลการวิจัย).สืบค้นจาก

<https://sc01.tcithaijo.org/index.php/dtaj/article/download/240463/163841/826581>

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. (2566). แนวทางการประเมินความเสียหายสิ่งปลูกสร้างและการจ่ายเงินช่วยเหลือผู้ประสบภัยธรรมชาติ. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพมหานคร.



ภาคผนวก

ภาพแสดงตาราง Excel ที่ระบุข้อมูลพิกัด รูปแบบความเสียหาย ประเภทของโครงสร้างอาคาร

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
621	20.42338	99.88809	6	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	d/3hGhgzlTQ0TuGohwYHtqj8	https://drive.google.com/file/d/3hGhgzlTQ0TuGohwYHtqj8/view	พื้น, ผนัง	ผนังแตกร้าว, พื้นทรุด	มาก	คสล.
814/1	20.443031	99.888940	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคาถล่ม	มาก	ไม้
113	20.443563	99.888382	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/15b5bpNPVumOPy_0Je6IXsKjg	https://drive.google.com/file/d/15b5bpNPVumOPy_0Je6IXsKjg/view	หลังคา	บ้านถูกไฟไหม้หลังคาถล่ม	มาก	ไม้
81	20.444784	99.888420	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ผนัง	บ้านถูกไฟไหม้ผนังถล่ม	มาก	ไม้
220	20.445436	99.884369	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	โครงสร้าง	พื้นบ้านและประตูหน้าต่างไม้ถูกกระแสน้ำและโคลนพัดพาไปใต้ฐานความเสียหาย	มาก	ไม้
198/1	20.444418	99.881683	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	โครงสร้างชั้น1	ผนังชั้นหนึ่งและเสา	มาก	คสล.
04	20.445139	99.883408	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ผนัง	คาน้ำเป็นหมันต่อเติมชั้น1 เกิดรอยแตก	มาก	คสล.
195/1	20.443254	99.886978	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ผนัง	คาน้ำ	มาก	คสล.
466/1	20.442902	99.885742	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
478/1	20.441469	99.887566	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	โครงสร้าง	คาน้ำ	มาก	คสล.
508/2	20.443012	99.884911	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	โครงสร้าง	คาน้ำ	มาก	ไม้
51/2/2	20.444174	99.888481	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ผนัง	คาน้ำ	มาก	คสล.
109	20.444006	99.888428	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ประตู หน้าต่าง	ประตูหน้าต่าง	มาก	คสล.
349/1	20.443138	99.887662	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
385	20.442497	99.888374	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
385/1	20.442564	99.887962	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
473/1	20.442629	99.887497	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
663	20.443261	99.888011	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
665/4	20.443349	99.888212	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
665/5	20.443334	99.888205	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
698/2	20.442705	99.886856	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	หลังคา	หลังคา	มาก	คสล.
61	20.444439	99.884033	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	ผนัง	ผนัง	มาก	คสล.
254	20.444246	99.884361	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	ไม้
253	20.444143	99.884178	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
220	20.445444	99.884422	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	ไม้
216	20.444441	99.886223	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
283	20.443937	99.889511	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
10	20.444218	99.873703	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
1016	20.443430	99.875427	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
15	20.443729	99.875008	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
152	20.443901	99.874748	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
185/1	20.443935	99.877823	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
209	20.443375	99.875099	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	ไม้
224	20.444010	99.877068	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
25	20.443455	99.875381	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
339/1	20.444107	99.878731	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
381/1	20.443398	99.876259	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
402/3	20.444700	99.878456	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
535/1	20.443422	99.874741	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
619	20.443310	99.875504	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	ไม้
628/4	20.443094	99.875359	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
704/2	20.443241	99.875443	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
772/1	20.443668	99.875023	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
780	20.442835	99.875626	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
867	20.443575	99.875946	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
92/2	20.443989	99.879074	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
923	20.444035	99.877129	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
94/2	20.443974	99.879219	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.
963	20.443264	99.875412	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV	https://drive.google.com/file/d/1nGTWzch0wUwzdlBmkLyCcV/view	คาน้ำ	คาน้ำ	มาก	คสล.

ภาพที่ 1 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายมาก



HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural	Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
8/219	20.42734	99.89191	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	2QpHw93Idz4CTCnAis	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
8/106	20.42716	99.89172	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	ixTw3GpNITABnXwHr	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
8/44	20.42635	99.89333	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	IDF_3yXPDcyiDwM9uub	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
14	20.42812	99.89228	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	2gTbeAC5SbfymN4Zme	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
8/37	20.42699	99.89359	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	9vZfGbwOSPg3_7C4Vn	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
8/54	20.42909	99.89116	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	HTVn_hePK_yiUfU8L55	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
8/236	20.42976	99.89068	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	NHcQPKNLQEHlowj_M	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
8/210	20.42692	99.89311	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	6Qif3IZZqTiptN95wib	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
442/1	20.42453	99.89402	6	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	n9lp5mNRfoQAF8P_G4d	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
75/3	20.435961	99.894379	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
74/3	20.435949	99.894348	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	ไม้
74/2	20.435852	99.894272	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
150	20.43976	99.89887	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กระเบื้อง	กระเบื้อง	ปานกลาง	คสล.
195	20.44218	99.89017	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ง	ง	ปานกลาง	คสล.
8/2	20.43893	99.89315	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	น	น	ปานกลาง	คสล.
151	20.43965	99.88957	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	รั้ว	รั้ว	ปานกลาง	คสล.
30	20.43864	99.89215	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
72	20.43636	99.89426	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
388/28	20.43961	99.88957	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
180	20.43854	99.89069	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
338	20.4426	99.88879	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
168/1	20.43869	99.89033	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
336	20.44312	99.88959	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
164/1	20.43872	99.89069	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
164	20.43886	99.89069	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	รั้ว	รั้ว	ปานกลาง	คสล.
11	20.44313	99.88879	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
289/1	20.4385	99.89027	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
168/19	20.43965	99.88957	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กำแพง	กำแพง	ปานกลาง	คสล.
13	20.43899	99.88987	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	น	น	ปานกลาง	คสล.
100/2	20.43636	99.88997	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ไม้	ไม้	ปานกลาง	คสล.
189/7	20.43835	99.88971	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
388/16	20.44023	99.88928	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
583/6	20.441	99.88953	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กำแพง	กำแพง	ปานกลาง	คสล.
147/55	20.44098	99.89077	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
625	20.44103	99.88947	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	รั้ว	รั้ว	ปานกลาง	คสล.
357	20.44114	99.88931	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
357/1	20.44099	99.88938	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
147/37	20.44039	99.89027	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
39/6	20.44292	99.88535	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
147/41	20.44034	99.89012	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
39/7	20.44282	99.88524	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	หน้าต่าง	หน้าต่าง	ปานกลาง	คสล.
147/36	20.44019	99.89024	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
147/34	20.44051	99.89029	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
249	20.44057	99.8903	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	หลังคา	หลังคา	ปานกลาง	คสล.
147/66	20.44113	99.89048	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
147/20	20.44109	99.89004	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
504	20.44225	99.88432	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
169/2	20.43872	99.89104	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
260/5	20.44218	99.88879	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
169	20.43889	99.89101	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
410	20.43752	99.89297	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
88/10	20.444880	99.88740	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ระดั	ระดั	ปานกลาง	คสล.
79/1	20.443115	99.888794	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
384/3	20.445190	99.888191	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
79	20.443306	99.888481	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
156	20.441738	99.885284	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กระจก	กระจก	ปานกลาง	คสล.
384/7	20.445065	99.888214	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
813	20.445181	99.888176	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กำแพง	กำแพง	ปานกลาง	คสล.
244	20.442142	99.885208	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	ไม้
256/1	20.443642	99.888550	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
98/1	20.443565	99.888481	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
154	20.445150	99.888374	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
730	20.443478	99.888443	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ระดั	ระดั	ปานกลาง	คสล.
152	20.441763	99.884857	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กำแพง	กำแพง	ปานกลาง	คสล.
149	20.443789	99.888405	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กระเบื้อง	กระเบื้อง	ปานกลาง	คสล.
761/2	20.444874	99.888405	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
116/1	20.443594	99.888290	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	3	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
247	20.442995	99.888756	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กระจก	กระจก	ปานกลาง	คสล.
32/7	20.442162	99.884178	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
146/1	20.441973	99.884140	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
93/1	20.443741	99.888687	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	กระจก	กระจก	ปานกลาง	คสล.
809	20.443727	99.888817	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ระดั	ระดั	ปานกลาง	คสล.
223	20.441853	99.884392	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ก, ผนัง	ก, ผนัง	ปานกลาง	คสล.
72	20.444237	99.888535	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
172/2	20.442240	99.884354	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
46	20.444220	99.888390	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ประตู	ประตู	ปานกลาง	คสล.
272/2	20.442314	99.884399	10	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	พื้น	พื้น	ปานกลาง	คสล.
147/26	20.440895	99.890114	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
147/27	20.440840	99.890167	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
35	20.442003	99.889198	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	รั้ว	รั้ว	ปานกลาง	คสล.
147/35	20.440500	99.890167	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
437	20.431660	99.895523	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
246	20.442997	99.889992	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	เสา	เสา	ปานกลาง	คสล.
587/4	20.432289	99.893028	2	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.
418	20.442488	99.886040	5	เมสสา	เมสสา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.c	https://drive.google.c	ผนัง	ผนัง	ปานกลาง	คสล.

ภาพที่ 2 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายปานกลาง

House ID	Latitude	Longitude	Village No	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural	Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
100/2	20.442383	99.886459	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	Structural ต่าง/กำแพง	ผนังพังทลาย, ผนังข้างนอกและกำแพงด้านข้าง	ปานกลาง	ประเภทโครงสร้าง คสล.
77/1	20.444988	99.883118	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังทลายแตกหัก พื้นแตก	ปานกลาง	คสล.
763	20.444992	99.884140	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	กำแพงพังทลายเป็นแนวราบ	ปานกลาง	คสล.
762	20.445848	99.884415	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นบ้าน	พื้นบ้านเป็นโพรงไม้เก่าๆ ถูกแรงดันน้ำและโคลนทำให้โผล่	ปานกลาง	ครึ่งปูนครึ่งไม้
72/1	20.444485	99.882126	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตกเฉียงเป็นโคลน เสริมโครงด้วยฉันทวย	ปานกลาง	คสล.
642	20.44592	99.884369	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตกบริเวณจากแรงดันน้ำโคลน กำแพงเป็นโพรง	ปานกลาง	คสล.
62/1	20.444096	99.880890	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังแตก	ปานกลาง	คสล.
48/1	20.444096	99.880890	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นดินแตก	พื้นดินแตก	ปานกลาง	คสล.
45/3-4	20.44369	99.881004	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดหักแตก	ปานกลาง	คสล.
384/4	20.444416	99.881432	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานหลุด	ปานกลาง	คสล.
383	20.443020	99.882065	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก	ประตูบานใหญ่เหล็กประตูบานแรงดันน้ำและโคลน	ปานกลาง	คสล.
36	20.442722	99.881409	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดแตก	ปานกลาง	คสล.
358	20.445225	99.883614	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงและประตูเป็นโคลน	ปานกลาง	คสล.
330	20.445675	99.884338	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังประตูหน้าต่างเสียหาย กำแพงเป็นโคลนบริเวณหัวบันได	ปานกลาง	คสล.
206	20.442699	99.883278	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูหลุดจากบาน	ปานกลาง	คสล.
183/2	20.442663	99.883537	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังเสียหายจากแรงดันน้ำเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
180/1	20.441988	99.883530	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังบริเวณหัวบันได	ปานกลาง	คสล.
158	20.445253	99.884407	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นแตก	ผนังแตกเฉียง	ปานกลาง	คสล.
145	20.444309	99.882011	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานหักเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
14/1	20.441799	99.883642	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้อง	พื้นกระเบื้องไม้ใหม่	ปานกลาง	คสล.
132	20.441950	99.882950	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังเสียหายบริเวณ เนื่องจากแรงดันน้ำและโคลน	ปานกลาง	คสล.
118	20.445383	99.884384	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังและผนังแตก	ปานกลาง	คสล.
112/2	20.44248	99.88171	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้อง	กระเบื้องแตก	ปานกลาง	คสล.
101/7	20.445082	99.883774	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงเป็นรู	ปานกลาง	คสล.
283	20.4444	99.88144	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก	ประตูเหล็กพังเสียหายจากแรงดันน้ำ ส่วนเดิมเสริมกำแพง	ปานกลาง	คสล.
12	20.442804	99.886276	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก	ประตูบานใหญ่เหล็กประตูบานแรงดันน้ำและโคลน	ปานกลาง	คสล.
176/4	20.441919	99.887718	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานหลุด	ปานกลาง	คสล.
217/2	20.441275	99.886368	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
217/3	20.441204	99.886536	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
23-น.8	20.444267	99.887062	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง	กระจกหน้าต่างแตกเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
270/2	20.444382	99.888344	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหายเนื่องจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
316	20.443077	99.885216	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
316/1	20.443083	99.885139	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
367/1	20.442774	99.885246	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
37	20.442293	99.887321	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
387	20.442793	99.884712	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
417/6	20.441099	99.886131	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
439/4	20.440729	99.887146	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย เนื่องจากแรงดันน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
457	20.44454	99.88587	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	โครงสร้างเสียหายเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
460	20.444918	99.889098	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
462/2	20.442288	99.886673	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
466/3	20.442627	99.885811	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
472/15	20.44245	99.886871	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
532	20.444872	99.889969	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
64	20.443941	99.886673	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
678/1	20.444614	99.887428	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
678/19	20.444302	9.887466	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
802	20.4447	99.888557	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
812/1	20.440216	99.885467	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
818/1	20.440084	99.886711	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
818/2	20.439659	99.885636	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
819/1	20.441416	99.886185	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
819/2	20.441313	99.88633	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
819/3	20.441372	99.886322	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
867/1	20.441179	99.886818	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
95/1	20.441992	99.888138	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
102/1	20.442499	99.886871	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
115	20.441448	99.885185	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	ครึ่งปูนครึ่งไม้
138/6	20.441610	99.883530	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
141	20.444935	99.888641	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
149/9	20.443127	99.887619	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังประตูหน้าต่างเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
153	20.441475	99.885338	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
153/1	20.441196	99.885216	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
160/3	20.436504	99.884857	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
171/2	20.441465	99.887787	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
216	20.438387	99.886092	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
223/1	20.441727	99.884590	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
243/1	20.442173	99.888474	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
276/2-3	20.441931	99.886879	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
3/1	20.442865	99.887596	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบริเวณหัวบันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
334	20.441746	99.885567	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังประตูหน้าต่างเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
34	20.444893	99.888588	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
356/1	20.443416	99.888075	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
367/6	20.443117	99.884979	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
387/10	20.443144	99.885117	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังประตูหน้าต่างเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
404/1	20.440447	20.440447	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
406/1	20.440580	99.884583	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงพังประตูหน้าต่างเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
411	20.440493	99.884933	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
413/2	20.440802	99.885448	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
42	20.444351	99.889137	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
425	20.437778	99.886551	10	แม่สาย									

ภาพที่ 3 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายปานกลาง



HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
453/5	20.442095	99.886917	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บานกระจกแตก ประตูไม้แตกหลุด	ปานกลาง	คสล.
469	20.442787	99.885529	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสาเข็มแรง เสาเข็มแตก	ปานกลาง	คสล.
47	20.444212	99.889122	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง พื้น รั้ว	ปานกลาง	คสล.
476	20.442963	99.887451	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้องฝ้า กระเบื้องไม้หลุดแตกออก	ปานกลาง	คสล.
494	20.443420	99.887428	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน เบื้องโคลนข้างของเสียดาย	ปานกลาง	คสล.
504/1	20.442507	99.884369	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง กำแพงสไลด์และแตกตามแนว	ปานกลาง	คสล.
504/2	20.442337	99.884445	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง กำแพงแตกกว้างมาก	ปานกลาง	คสล.
61	20.438477	99.886055	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้า ประตู ฝ้าแตกกว้าง ประตูแตกหัก เหลวรั่ว ผนังแตก	ปานกลาง	คสล.
760	20.441099	99.885117	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง กระจก กำแพงแตกตามแนวระนาบ กระเบื้องรั่ว	ปานกลาง	คสล.
81/1	20.43854	99.88796	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง พื้น กำแพงแตก พื้นรั่ว	ปานกลาง	คสล.
818	20.440002	99.886780	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได กระเบื้องบันไดแตกออก กระเบื้อง	ปานกลาง	คสล.
859/1	20.443569	99.887688	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน กำแพงปูนแตก ประตูแตกหักหลาย	ปานกลาง	คสล.
92/1	99.887726	99.887726	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระจก พื้น กระจกแตก พื้นแตกกว้างมาก	ปานกลาง	คสล.
96/1	20.442068	99.884125	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสาหลัก คาน พื้นเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
92	20.443624	99.882973	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ชั้น1 ชั้น1ได้รับความเสียหาย ผนัง ประตูหน้าต่าง	ปานกลาง	คสล.
783	20.444973	99.884941	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น กำแพง พื้นแตกกำแพงรั่ว	ปานกลาง	คสล.
77/6	20.444052	99.883461	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังเบา ผนังเบาเสียหายจากแรงดันน้ำ	ปานกลาง	คสล.
77/5	20.444603	99.882950	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังร้าวเป็นตามแนวระนาบ	ปานกลาง	คสล.
77/4	20.444473	99.882919	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังเบา ผนังเบาเสียหายจากแรงดันน้ำ	ปานกลาง	คสล.
769	20.445326	99.884392	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังเบา ผนังพัง	ปานกลาง	คสล.
765/8	20.444931	99.886314	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังแตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.
643	20.444429	99.884773	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้า ประตู ฝ้าประตูหลุด หน้าต่างหลุดและฝ้าฉาบฉวย	ปานกลาง	คสล.
63	20.444204	99.881821	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง หน้าต่างกระจกหลุด	ปานกลาง	คสล.
61/1	20.444464	99.884567	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได บันไดแตกกว้างเนื่องจากทรุดของดิน	ปานกลาง	คสล.
603	20.445559	99.886330	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ประตูหลุดทั้งวงกบ	ปานกลาง	คสล.
600/39	20.443161	99.883736	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานหลุดออกจากราง	ปานกลาง	คสล.
57	20.444250	99.886253	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง หลังคา ผนังร้าวและกระเบื้องหลุด	ปานกลาง	คสล.
55/1	20.44424	99.88168	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังมีรอยร้าว	ปานกลาง	คสล.
55	20.444132	99.881744	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง หน้าต่างหลุดทั้งบาน	ปานกลาง	คสล.
538	20.445284	99.884567	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังมีรอยแตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.
537	20.445608	99.884720	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังมีรอยแตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.
528	20.444895	99.884315	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก ประตูเหล็กหลุด	ปานกลาง	คสล.
522	20.445532	99.884659	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น กระเบื้องหลุด	ปานกลาง	คสล.
52/2	20.444515	99.881226	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น ประตู " พื้นลาดเอียงและประตูบานฉีกขาด	ปานกลาง	คสล.
52	20.444473	99.881294	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง หน้าต่างหลุด	ปานกลาง	คสล.
517	20.444462	99.884583	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู ผนังมีรอยร้าวและประตูบานฉีกขาด	ปานกลาง	คสล.
48	20.444639	99.881554	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีกขาด	ปานกลาง	คสล.
377	20.445536	99.886284	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ประตูไม้แตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.
372	20.443798	99.884117	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีกขาด	ปานกลาง	คสล.
331	20.445805	99.884811	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง โครงสร้างบานโกลนจากน้ำท่วมหนัก	ปานกลาง	คสล.
33	20.445675	99.884789	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง หน้าต่างบานกระจกแตก	ปานกลาง	คสล.
328	20.444168	99.886284	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีก	ปานกลาง	คสล.
327	20.444126	99.885773	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานแตกจาก บันไดกระเบื้องแตก	ปานกลาง	คสล.
325	20.444702	99.883942	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
311	20.445557	99.884636	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสาบาน เสาบานแตก	ปานกลาง	คสล.
304	20.444046	99.886185	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว กระจกหน้าต่างแตก รั้วพัง	ปานกลาง	คสล.
300	20.443968	99.886040	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานและประตูบานหลุด	ปานกลาง	คสล.
297/1	20.443806	99.883942	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
285/4	20.442177	99.883827	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	คานหลังคา ประตูบานพัง ผนังเบาแตก	ปานกลาง	คสล.
285/3	20.442138	99.883842	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังเบา ผนังเบาแตกหักจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
275	20.443979	99.883080	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
261	20.444237	99.886620	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน ฝ้าเพดานแตกหลุด	ปานกลาง	คสล.
259	20.444048	99.886215	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
249/3	20.443060	99.884949	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ฝ้าเพดานพังหลุด	ปานกลาง	คสล.
249	20.442924	99.884834	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน ประตูบานฉีก ฝ้าเพดานหลุดหมด	ปานกลาง	คสล.
232	20.444561	99.883324	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู หน้า ประตูหลุด หน้าต่างแตก	ปานกลาง	คสล.
228	20.444441	99.883194	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีกขาด	ปานกลาง	คสล.
224/2	20.443213	99.884384	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ประตูพัง	ปานกลาง	คสล.
223	20.443377	99.884018	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ฝ้าเพดาน ประตู ฝ้าเพดานพังจากโคลนน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
221/2	20.44477	99.88619	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ดินและรั้ว กำแพงบ้านแตกหักกว้าง	ปานกลาง	คสล.
219	20.443611	99.884529	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานหลุดจากราง	ปานกลาง	คสล.
214/1	20.442945	99.884277	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู และ ฝ้าเพดานแตกหลุด	ปานกลาง	คสล.
214	20.444420	99.883820	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ประตูพัง	ปานกลาง	คสล.
213	20.443871	99.883995	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ผนัง ประตูและผนังแตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.
210/4	20.444050	99.883034	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังเบา ประตูเหล็ก เสียหายจากแรงดันน้ำ	ปานกลาง	คสล.
210/1	20.444101	99.883334	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระจก กระจกแตก	ปานกลาง	คสล.
210	20.444158	99.883310	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีก	ปานกลาง	คสล.
2/ข	20.445194	99.884506	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
192/1	20.444132	99.886078	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังเบา ประตูบานฉีก ผนังเบาแตก	ปานกลาง	คสล.
192	20.442579	99.884483	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีก	ปานกลาง	คสล.
190	20.442551	99.883995	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ผนังรั่วแตก	ปานกลาง	คสล.
187	20.442291	99.884232	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน ประตูบานฉีก	ปานกลาง	คสล.
15/1	20.443687	99.884377	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้อง กระเบื้องพื้นในบ่อน้ำเสียหาย ทากการปูใหม่	ปานกลาง	คสล.
149	20.443755	99.883412	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก ผนังไม้ทั้งจากไม้ เสียหาย ประตูเหล็กพัง	ปานกลาง	คสล.
120/1	20.443657	99.883171	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก ประตูบานเสียหายจากแรงดันน้ำ บันไดปูนบดแตก ผนังไม้หรือเหล็กทากการปูใหม่เสียหาย ไม้ค้ำยันพัง	ปานกลาง	คสล.
109/1	20.444334	99.882210	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง บานประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
105	20.443972	99.882729	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง กำแพงร้าวและพังตามแนวตั้ง	ปานกลาง	คสล.
103	20.443071	99.884132	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น หน้า ประตู ประตูบานพังและประตูบานแตกตามแนวตั้ง	ปานกลาง	คสล.
102/1	20.444588	99.883423	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงบาน ประตูบานพังและประตูบานแตกตามแนวตั้ง	ปานกลาง	คสล.
100	20.442741	99.884193	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น พื้นมีรอยแตกกว้าง	ปานกลาง	คสล.



HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural	Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
277	20.44428	99.884232	7	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น กระง	พื้นแตกเป็นจุด กระงหน้าด้านแตก	ปานกลาง	คสล.
143	20.44567	99.88459	7	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานหลุด ประตูพัง	ปานกลาง	คสล.
83	20.43627	99.89339	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้า หิ้ง	ฝ้ารั่ว หิ้งงอ	ปานกลาง	คสล.
603/5	20.42851	99.89326	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้า หิ้ง	เกิดรอยร้าวทั้งหลัง	ปานกลาง	คสล.
116	20.43838	99.89041	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเปิดไม่ได	ปานกลาง	คสล.
603/4	20.42853	99.892921	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้า หิ้ง	ฝ้ารั่ว ฝ้าบาน	ปานกลาง	คสล.
561/13	20.42853	99.892654	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	มีรอยร้าว	ปานกลาง	คสล.
590/2	20.428215	99.893120	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	เกิดรอยร้าว	ปานกลาง	คสล.
26/1	20.438496	99.891144	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ระบาย	ประตูพัง ระบายประปาไม่มี	ปานกลาง	คสล.
454	20.442385	99.890198	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู	ผนังร้าว ประตูบาน	ปานกลาง	คสล.
609	20.431276	99.891357	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	พบรอยร้าวบางจุด	ปานกลาง	คสล.
388/45	20.440165	99.889313	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบานเปิดไม่ได	ปานกลาง	คสล.
1004	20.444113	99.878304	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดาน บานฝ้า หิ้งแตก	ปานกลาง	คสล.
122	20.443214	99.875046	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหายทั้งหมด,พื้นกระเบื้องแตก	ปานกลาง	คสล.
123/1	20.444515	99.880943	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ฝ้าเพดานเสียหายและประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
123/2	20.444130	99.878357	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู,พื้น	ประตูพัง,พื้นเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
13	20.443361	99.875763	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสา,หลัง	เสาหัก รอยร้าว,หลังคาเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
135/3	20.444647	99.878960	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ฝ้าหิ้งมีรอยร้าวเป็นแนวยาว	ปานกลาง	คสล.
175	20.444017	99.878159	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู,ฝ้า	ฝ้ามีรอยร้าวทั้งหมด,ประตูพังเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
216	20.443506	99.876122	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู,ผนัง	ผนังพังเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
226	20.443220	99.874893	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นหน้า	พื้นหน้ามีรอยร้าว เกิดหลุม	ปานกลาง	คสล.
24	20.443455	99.876274	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นชั้น 2,เสา	พื้นชั้น 2,เสา รอยร้าวเพดานชั้น 2 และคานกับเสา	ปานกลาง	คสล.
242	20.442867	99.875565	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
277/7	20.442326	99.875504	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังแตก	ปานกลาง	คสล.
270	20.442724	99.875938	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น,หลังคา	พื้นหลังคาพังหลังบ้านชั้น 2,บันไดเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
279	20.443420	99.876549	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด รอยร้าวตรงหลังบ้าน	ปานกลาง	คสล.
321/3	20.443598	99.874733	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
366/2	20.442837	99.875443	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังร้าว	คานหลังมีรอยร้าว	ปานกลาง	คสล.
368	20.443987	99.879662	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู	ผนัง รอยร้าว ประตูพัง	ปานกลาง	คสล.
39	20.443417	99.875221	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
391/2	20.444254	99.879074	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด กระเบื้องหลังคาหลุด	ปานกลาง	คสล.
391/4	20.444376	99.879105	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้องหลัง	กระเบื้องหลังคาหลุด ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
391/5	20.444330	99.879005	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	พื้นหลุด ฝ้าเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
395	20.444431	99.879837	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้า ประตู ผนังบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
397/10	20.444206	99.879242	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
398	20.444075	99.879753	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
399	20.444229	99.879372	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
399/1	20.444544	99.878983	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้นหลังบ้านยุบ	ปานกลาง	คสล.
399/3	20.444418	99.879082	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น,บันได	บันไดไม่พียง,บันไดเพดานพื้นชั้น 2 มีรอยแตก	ปานกลาง	คสล.ไม่แข็งแรง
399/4	20.444098	99.878929	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
399/6	20.444159	99.878891	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได ประตู	บันไดไม่พียง ประตูบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
399/7	20.444275	99.878975	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังร้าว ฝ้า	ฝ้าเพดานเสียหาย ผนังร้าวร้าว	ปานกลาง	คสล.
400	20.443977	99.879517	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหาย พื้นเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
404	20.444096	99.879181	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว หน้าเสา	รั้วหน้าเสา รอยร้าว ล้มเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
407	20.444054	99.879585	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
407/1	20.443966	99.879662	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ฝ้าเพดานหลุด ประตูพัง	ปานกลาง	คสล.
49	20.443560	99.874474	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังร้าว	มีรอยร้าวที่เสาการหักตัวของบ้าน	ปานกลาง	คสล.
528	20.444008	99.879066	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
531	20.444016	99.878822	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูพัง,แผ่นหลังคาหลุด	ปานกลาง	คสล.
549/1	20.443024	99.874619	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว	รั้วที่หลังบ้านเดิมหน้า	ปานกลาง	คสล.
609/1	20.444117	99.878853	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูบานพัง,ผนังก่ออิฐฉาบปูนหลุด	ปานกลาง	คสล.
628/1	20.443874	99.875244	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูพัง,ผนังบานหลุด	ปานกลาง	คสล.
630	20.444012	99.879005	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูบานบานพัง	ปานกลาง	คสล.
631/3	20.443125	99.875023	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้วหลังบ้าน	รั้วหลังบ้าน สันค้ำคาน	ปานกลาง	คสล.
631/4	20.443951	99.878387	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
631/7	20.443420	99.875351	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ฝ้าเพดานหลุด	ปานกลาง	คสล.
632	20.444134	99.880501	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังบาน	ฝ้าหลุดออก	ปานกลาง	คสล.
635	20.442896	99.875862	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นบันได	พื้นบันไดชั้นสองหลุดออกเสียหาย	ปานกลาง	คสล.ไม่แข็งแรง
72/3	20.443226	99.876434	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเสียหายมาก	ปานกลาง	คสล.
771/3	20.443834	99.875381	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ลิ้นชัก,ประตู	ลิ้นชัก,ประตู	ปานกลาง	คสล.
775/2	20.444134	99.880150	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังชั้นแรกหลุดออกมา	ปานกลาง	คสล.
778	20.443979	99.880234	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูบานพัง,สีผนังลอกพื้นมีคราบ	ปานกลาง	คสล.
838	20.443499	99.875023	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องยุบ,ผนังแตก	ปานกลาง	คสล.
860	20.443228	99.876419	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสา หลังคา	หลังคาเสาหักคานค้ำคานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
899	20.444275	99.879913	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานพังทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
904	20.443289	99.876274	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น ผนัง	พื้น ฝ้าเพดานพังทั้งหมด,กระเบื้องแตก	ปานกลาง	คสล.
940	20.443409	99.875816	1	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเสียหายทั้งหมด	ปานกลาง	คสล.
8/181	20.42986	99.89683	6	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว	รั้วล้ม ภายในบ้านไม่เสียหาย	ปานกลาง	คสล.
510/1	20.42395	99.89505	6	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสา	มีรอยร้าวที่กำแพงอาจส่งผลกระทบต่อเสา	ปานกลาง	คสล.
80	20.43625	99.89331	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังอาคารคานค้ำคานหลุดจากเสา	ปานกลาง	คสล.
397	20.44073	99.88923	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบานเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
71	20.445189	99.888016	10	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว	รั้วคานค้ำคานเสียหายจนต้องรื้อออก เสารั้วและผนัง	ปานกลาง	คสล.
142	20.443668	99.888458	10	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง	เสารั้วและผนังพัง 3 ช่วง, ประตูเปิดไม่ไดเนื่องจาก	ปานกลาง	คสล.
148/1	20.442011	99.884354	10	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว	รั้วพังตลอดแนว, หน้าต่างกระจกแตก	ปานกลาง	คสล.
38/1	20.441860	99.884224	10	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังพังหลุดและรอยร้าว	ปานกลาง	คสล.
279	20.443470	99.889069	2	เวียงสา	เวียงสา	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...					

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural	Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
516	20.444057	99.881935	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าไหม	ทาสีฟ้าขาว	ปานกลาง	คสล.
500/1	20.445032	99.883438	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู หน้า	โครงสร้างไม้แตกพัง	ปานกลาง	คสล.
46/1	20.44377	99.88098	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หลังบ้าน	หลังบ้านไม้โคกแข็ง	ปานกลาง	คสล.
384/2	20.444525	99.881630	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	ผ้าพลาสติกเสียหาย เนื่องจากระดับน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
374	20.444990	99.884315	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้วพัง	รั้วคอนกรีตบ้านและโคกดินพังเสียหาย ภายใต้น้ำ	ปานกลาง	คสล.
284/1	20.444536	99.881393	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น ผนัง	พื้นและผนังพังเนื่องจากกริดเซาะจากน้ำ ฟ้าผ่า	ปานกลาง	คสล.
27	20.442276	99.881538	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	คาน และ	คานและเสาไม้ได้รับความเสียหายจากน้ำ	ปานกลาง	คสล.
26	20.442036	99.881371	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	ได้รับความเสียหายจากการกัดเซาะจากน้ำ	ปานกลาง	คสล.
231/1	20.445250	99.883575	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	แม้มีอาคารฐานรากและผนัง คสล.ดินคันผนังพัง	ปานกลาง	คสล.
22	20.441881	99.881950	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	คาน และ	คานแตกหลายวง มีผนังรื้อออก	ปานกลาง	คสล.
163/1	20.445490	99.884064	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตกเปื้อน	ปานกลาง	คสล.
109/2	20.444138	99.882057	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกหลุด	ปานกลาง	คสล.
03	20.444887	99.883263	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	คานวางระแนงพื้นวางบนดินหลุด	ปานกลาง	คสล.
218	20.442148	99.886787	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูปูน	ประตูปูนแตก	ปานกลาง	คสล.
1	20.444384	99.886711	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก	ประตูเหล็กพัง โดยโคลนบีบ	ปานกลาง	คสล.
10	20.442673	99.887108	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
11	20.443008	99.886581	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หลังบ้าน	หลังเสียหายจากโคลน	ปานกลาง	คสล.
14	20.442247	99.886528	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ผ้าพลาสติกพังหลุด ประตูจากผนังหลุด	ปานกลาง	คสล.
4	20.443787	99.88678	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
6	20.443531	99.886665	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
7	20.443192	99.886581	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงบ้าน	กำแพงบ้านพังเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
8	20.443283	99.886826	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูปูน	ประตูปูนพังเนื่องจากโคลนบีบผนังบ้าน	ปานกลาง	คสล.
110/3	20.441866	99.886765	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	รั้ว	รั้วด้านนอก ประตูเปิดโคลนเค้นช่อง	ปานกลาง	คสล.
12	20.444044	99.887115	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเสียหาย เนื่องจากระดับน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
120/1	20.444048	99.886894	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หลัง	หลังบ้านพัง	ปานกลาง	คสล.
158/2	20.442781	99.886467	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	า	ประตูเปิดโคลนจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
160/3	20.442537	99.885719	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู	หลังบ้านพัง ประตูบ้านฉีกผนังหลุด	ปานกลาง	คสล.
162/1	20.441992	99.887344	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ผนัง	ประตูบ้านพัง ผนังพังเนื่องจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
166/2	20.441339	99.886414	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูเปิดโคลนจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
172	20.441248	99.887695	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
176	20.441578	99.887749	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังพัง	ปานกลาง	คสล.
217	20.441488	99.886642	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กร	พื้นปูนแตกร้าวจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
229	20.44495	99.888863	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงบ้าน	กำแพงบ้านพังเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
269	20.442453	99.887306	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
32/1	20.444071	99.887085	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู ผนัง	ประตูบ้านถูกแรงดันน้ำและโคลนเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
387/1	20.443169	99.884979	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูปูน	ประตูบ้านถูกแรงดันน้ำและโคลนเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
387/7	20.443335	99.885033	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูพังเนื่องจากน้ำท่วม	ปานกลาง	คสล.
39	20.442661	99.887077	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้นเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
417/3	20.441044	99.886421	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังพัง	ปานกลาง	คสล.
417/5	20.441351	99.886635	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเสียหาย เนื่องจากระดับน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
417/7	20.441053	99.886391	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติกเสียหาย เนื่องจากระดับน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
418/4	20.442451	99.886086	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังแตกหลายวงพื้นเป็นโคลนโคลนเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
440/1	20.439887	99.888062	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าเสา	หน้าเสาได้รับความเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
440/3	20.439977	99.888763	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าเสา	หน้าเสาได้รับความเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
450	20.44195	99.887512	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังเปิดโคลน	ปานกลาง	คสล.
450/3	20.441978	99.887505	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังเปิดโคลน	ปานกลาง	คสล.
453	20.441746	99.887047	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูปูน	ประตูบ้านถูกแรงดันน้ำและโคลนเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
466/5	20.442709	99.885582	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	า	ผนังบ้านส่วนนอก เปื้อน	ปานกลาง	คสล.
469	20.442598	99.885445	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หลังคา	หลังคาบ้านเสียหายเนื่องจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
469/1	20.442736	99.885312	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู	ผนังแตกหลายวงจากคาน้ำขึ้นประตูลุดจากผนัง	ปานกลาง	คสล.
469/3	20.442617	99.885338	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงบ้านแตกร้าว	ปานกลาง	คสล.
472/14	20.442535	99.886963	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังบ้านเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
472/2	20.442621	99.886993	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระถ	กระถางบ้านแตกร้าว	ปานกลาง	คสล.
5	20.442917	99.885147	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูปูน	ประตูบ้านถูกแรงดันน้ำและโคลนเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
78/1	20.444588	99.888832	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังหลังค	ประตูบ้านถูกแรงดันน้ำและโคลนเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
854	20.444151	99.888344	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้นกระเบื้องแตกกรร	ปานกลาง	คสล.
964/2	20.441605	99.886513	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	น้ำท่วมกระเด็นน้ำ และฝนจากบ้านบนถนนไหลลง	ปานกลาง	คสล.
154/25	20.442438	99.884895	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง ประตู	ผนังแตก ประตูหลุดออกจาก ผ้าพลาสติก โดยโคลนบีบ	ปานกลาง	ไม้
304/2	20.439013	99.884430	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	ประตูบ้านไม้เปิด ผนังบ้านแตกหลุดจาก กำแพงรั้ว	ปานกลาง	คสล.
390	20.442350	99.888069	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง พื้น	กำแพงพังพื้นเปิดโคลน ข้าวของเสียหายหลุด	ปานกลาง	คสล.
417/3	20.441158	99.886459	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง พื้น	กระเบื้องเปิดโคลน ประตูเปิดโคลน ผนังร้าว เสา	ปานกลาง	คสล.
488/1	20.442451	99.887505	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น กำแพง	พื้นแตกเปิดโคลน กำแพงร้าว ประตูแตก	ปานกลาง	คสล.
774	20.444469	99.888588	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดไม้ถูกโคลนทับจนพังเสียหาย	ปานกลาง	ไม้
86/1	20.444384	99.882492	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นหลัง	พื้นหลังรื้อออกแล้ว	ปานกลาง	คสล.
51/1	20.444454	99.881012	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าไหม,พื้น	ผ้าและผนังพังทั้งแนว หลังคาชำรุดเล็กน้อย	ปานกลาง	คสล.
506	20.444165	99.883813	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	" พื้น,ผนัง	พื้นและผนังรื้อออกจากกริดหลังคายังคง	ปานกลาง	คสล.
38	20.444551	99.886353	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงบ้านแตกกรร	ปานกลาง	คสล.
355	20.443279	99.884277	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังไม้	ผนังไม้กับอิฐฉาบ หน้าเสาหลุด	ปานกลาง	คสล.
339	20.445126	99.884415	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูบ้านไม้ หน้าตารุงจกพัง	ปานกลาง	คสล.
307	20.442684	99.884247	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้า	ผ้าพัง	ปานกลาง	คสล.
297	20.443729	99.883736	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังบ้าน	ผนังบ้านแตกหักจากน้ำท่วมสูง	ปานกลาง	คสล.
229	20.44440	99.883087	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก	ผ้าพลาสติก กำแพงแตกหัก ถล่ม	ปานกลาง	คสล.
118/2	20.44552	99.88448	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังส่วนหลังบ้านพังทั้งหลังเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
11/1	20.444246	99.883965	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังรื้อชั่วคราว	ปานกลาง	คสล.
36	20.442728	99.875793	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผ้าพลาสติก		ปานกลาง	คสล.
389	20.443953	99.880508	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	โครงสร้างหลังคาเหล็กพัง	ปานกลาง	เหล็ก
390/1	20.443205	99.876160	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	โครงสร้าง	โครงสร้างหลังคาเหล็กพัง	ปานกลาง	เหล็ก
391/7	20.444124	99.880348	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	3	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังบ้าน	ผ้าเสียหายทั้งแนว ประตูบ้านเหล็กเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
397/5	20.444006	99.878761	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนังบ้าน	ชั้นล่างเสียหาย คานแตกร้าว	ปานกลาง	คสล.
403	20.444082	99.879311											

ภาพที่ 6 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายปานกลาง

ID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural	Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
102/1	20.442499	99.886871	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูโคมโคมดี หน้าข้างแตก	ปานกลาง	คสล.
115	20.441448	99.885185	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	บันไดไม้หักออก โคมยัดทองขึ้น	ปานกลาง	ศรีบุญศรี
138/6	20.441610	99.883530	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูเหล็กพัง หลังกระเบื้องเบื้องคราบโคลน	ปานกลาง	คสล.
138/9	20.441624	99.883621	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้น หัก	ปานกลาง	คสล.
141	20.444935	99.888641	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	เสาหัวรั้ว โคมยัดทองเข้า เสาหินหลังแตก	ปานกลาง	คสล.
143	20.441765	99.883698	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพง ดินขรุขระ	ปานกลาง	คสล.
149/9	20.443127	99.887619	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงอิฐยาวตามยาว	ปานกลาง	คสล.
151/1	20.441072	99.884911	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้นอิฐ	ปานกลาง	คสล.
153	20.441475	99.885338	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูเหล็ก พื้นโคลนทับ	ปานกลาง	คสล.
153/1	20.441196	99.885216	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	ประตูเหล็กหัก พื้นโคลน	ปานกลาง	คสล.
160/3	20.436504	99.884857	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังกำแพงอิฐยาวตามยาว ประตูบาน	ปานกลาง	คสล.
167	20.440540	99.884476	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเบื้องคราบโคลน หลังเบื้องคราบโคลน	ปานกลาง	คสล.
171/2	20.441465	99.887787	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตู	กำแพง ประตูพัง กำแพงแตก	ปานกลาง	คสล.
216	20.433837	99.886902	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องแตกเสียนานหนักมาก	ปานกลาง	คสล.
221/1	20.441727	99.884590	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงปูน พื้นอิฐ หัวรั้วแตกเป็นโคลน	ปานกลาง	คสล.
243/1	20.442173	99.884474	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงปูน พื้นอิฐ หัวรั้ว	ปานกลาง	คสล.
276/2-3	20.441931	99.886879	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูบานฉีกกรีดขาด พื้นเพดานหลุดแตก	ปานกลาง	คสล.
3/1	20.442865	99.887596	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนัง และ พื้นอิฐยาวทั้งหมดย และประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
334	20.441746	99.885567	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพง อิฐ หัวรั้วแตก กำแพง และประตูบานพัง	ปานกลาง	คสล.
34	20.444893	99.888588	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	และกำแพง	หัวรั้ว หัวรั้วแตก และประตูบานพัง กำแพงแตก	ปานกลาง	คสล.
356/1	20.443416	99.888075	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูเหล็ก	ประตูเหล็กหลุดออก กำแพงหัว	ปานกลาง	คสล.
367/6	20.443117	99.884979	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ระนาบ	ระนาบปูน กระเบื้องแตก	ปานกลาง	คสล.
387/10	20.443144	99.885117	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพง อิฐ หัวรั้วตามแนวยาว ประตูหลุดออกมา	ปานกลาง	คสล.
404/1	20.440447	20.440447	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง	หน้าต่างแตก ประตูหลุด	ปานกลาง	คสล.
405/3	20.440544	99.884560	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้น กำแพงกับพื้นเป็นโคลน	ปานกลาง	คสล.
406/1	20.440580	99.884583	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงอิฐยาวตามยาว หัวรั้วของเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
411	20.440493	99.884933	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หน้าต่าง	หน้าต่างหลุด ประตูงอจนหัก	ปานกลาง	คสล.
413/2	20.440802	99.885448	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้นกระเบื้อง	พื้นเบื้องแตกออกจนหมดทุกแผ่น	ปานกลาง	คสล.
42	20.444351	99.889137	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงปูน พื้นอิฐ หัวรั้วแตก	ปานกลาง	คสล.
425	20.437778	99.885551	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงปูนแตกเป็นบริเวณกลม หัวรั้วบด	ปานกลาง	คสล.
43	20.439159	99.884384	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	หลังคา	หลังคาพัง กำแพงหัวรั้วแตก	ปานกลาง	คสล.
436/15	20.440557	99.887093	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ประตูบาน	ประตูบานหลุดออกจนมาก กระเบื้องเบื้องโคลน	ปานกลาง	คสล.
436/17	20.440548	99.886627	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนังหลังคาสีหลุดออกมาก หัวรั้วยาวตามยาว	ปานกลาง	คสล.
443/7	20.439884	99.887123	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงปูน	ปานกลาง	คสล.
453/5	20.442095	99.886917	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บานกระจก	บานกระจกแตก ประตูไม้แตกหลุด	ปานกลาง	คสล.
469	20.442787	99.885529	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	เสาหิน	เสาหินแตก	ปานกลาง	คสล.
47	20.444212	99.889122	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ผนัง	ผนัง หัก	ปานกลาง	คสล.
476	20.442963	99.887451	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระเบื้อง	กระเบื้องปูพื้นหลุดแตกออก	ปานกลาง	คสล.
487	20.442766	99.887889	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนเป็นคราบโคลนแตกยาว	ปานกลาง	คสล.
494	20.443420	99.887428	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนเป็นโคลนขาวขุ่นเสียหาย	ปานกลาง	คสล.
504/1	20.442507	99.884369	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงสีลอกและแตกตามแนว	ปานกลาง	คสล.
504/2	20.442337	99.884445	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตกยาวตาม	ปานกลาง	คสล.
51	20.438555	99.885643	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	พื้น	พื้นเป็นคราบโคลน กำแพงแตก	ปานกลาง	คสล.
61	20.438477	99.886055	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	ฝา ประตู	ฝา ประตู ประตูแตกหัก เสาหัวรั้ว หัวรั้วแตก	ปานกลาง	คสล.
760	20.441099	99.885117	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตกตามแนวประตู กระเบื้องยาว	ปานกลาง	คสล.
761/1	20.441044	99.885048	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนหัวรั้วเปิด	ปานกลาง	คสล.
801	20.444956	99.888565	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนสีลอก	ปานกลาง	คสล.
809/2	20.444553	99.889336	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงเป็นโคลน	ปานกลาง	คสล.
81/1	20.43854	99.88796	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	กำแพงแตก หัวรั้ว	ปานกลาง	คสล.
815	20.443883	99.887903	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกยาวเป็นโคลน พื้นแตก	ปานกลาง	คสล.
818	20.440002	99.886780	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	บันได	กระเบื้องบันไดแตกออก กระเบื้อง	ปานกลาง	คสล.
859/1	20.443569	99.887688	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพงปูน	กำแพงปูนพัง ประตูแตกหักติดน้อย	ปานกลาง	คสล.
92/1	99.887726	99.887726	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กระด	พื้นกระจกแตก พื้นแตกยาว	ปานกลาง	คสล.
99	20.440096	99.884384	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/...	https://drive.google.com/...	กำแพง	พื้นกำแพงปูนกับพื้นหัวรั้วเปิด	ปานกลาง	คสล.

ภาพที่ 7 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายปานกลาง

Household	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Details	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
8/35	10.42645	99.89336	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/41zy_N5u28v9k9h9k9aVn/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/46	10.42726	99.89317	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/4y4V605GUC7wZ7W0nV9/https://drive.google.com/file/		ฉนวนกันความร้อน	ผนังร้าวร้าว,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/90	10.42733	99.89488	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/k2WtGg4_yY9L5_TbWv/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/34	10.42647	99.89343	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/75oQ7NubK7_8j9E1V9t-edo5SW7u/view?usp=drive_lm		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/187	10.42757	99.89286	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/7G30KVP7uAM8R9K9Gv2/https://drive.google.com/file/		ประตู,ผนัง	ประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/32	10.42662	99.89349	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/mYh9GduJnMfcr7HhM5A4G8/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของแตกหักแตกบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/30	10.42655	99.89352	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/7T65JABQW8C1CtUdDhN2C2p5oX8CAW/view?usp=drive_lm		พื้น	คราบน้ำเปื้อน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/102	10.42753	99.89202	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/8K8nzsnXITuQvMYWwRBL/https://drive.google.com/file/		ประตู,พื้น	วงกบประตูพัง,พ้กระเบื้องดิน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/39-40	10.42658	99.89304	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/BKH8B84HD358zC8B8dewr/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/29	10.42678	99.89366	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/9P0BNi_7R5J5v3Dm0BDC/https://drive.google.com/file/		พื้น,ผนัง	มีคราบน้ำเปื้อน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/111	10.42773	99.89268	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/A0Z9v4dhG6A6jGK514Pw/https://drive.google.com/file/		ประตู,ผนัง	วงกบประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/91	10.41301	99.91145	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1B1t2vD7H2_cT3Ag_v6enKv/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีคราบน้ำเปื้อน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/28	10.42679	99.89374	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/G27yVn7153ndmWwS24d/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/85	10.42736	99.89456	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/41CIA3h8K1CtUdDhN2C2p5oX8CAW/view?usp=drive_lm		ผนัง,ประตู	ประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/118	10.42784	99.89166	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/CK_KwfhMPEQM21M7d8/https://drive.google.com/file/		ประตู,ผนัง	ประตูบาน,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/95	10.42718	99.89439	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/3Crc63V9h3JAM2P5G9J2e/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/43	10.42642	99.89336	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1EW72Bm8-UTtE89-qN26G8vPBL1/view?usp=drive_lm		ผนัง	สิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/35	10.42897	99.89141	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/Z7z2FUPU1QkUwB8vO8Ri-B4QWbX0T/view?usp=drive_lm		ผนัง	สิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/88	10.427160	99.89436	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/V1F6h5Nt8A4MfMfuit_v5W/https://drive.google.com/file/		ประตู,ผนัง	ประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/81	10.42694	99.89439	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1F5hGc9Ct6A74WpRulogm4d5KxP8/view?usp=drive_lm		ผนัง	สิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/182	10.42667	99.89446	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/F1g9cF9E8vXmW_SUSC4d_0E2V9/view?usp=drive_lm		ประตู	วงกบประตู	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/252	10.42935	99.89098	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/36mG923mHhK8K9Cp14y/https://drive.google.com/file/		ประตู	วงกบประตู	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8-36	10.42685	99.89354	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1_09i-Q9K7CzKw9p9P5d8/https://drive.google.com/file/		พื้น	พื้นน้ำไปไหลลงเสียดาย	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/256	10.42955	99.89091	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/41t9kK9vQW_1Adh1Wt_c8/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/109	10.42628	99.894	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/131N7vc-5pQdQHDH2L-1zYv1W8h8/view?usp=drive_lm		ประตู	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/224	10.42966	99.8911	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1MAFYsrn4d71n7NspM3T-9s8BdW7F5/view?usp=drive_lm		ประตู	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/72	10.42707	99.89407	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1K4G6G5WacWwQ556p9Zk6d7V/view?usp=drive_lm		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/221	10.42939	99.8905	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/7K1P7vC97JW-ZcQ3zRHd8/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/243	10.42963	99.89109	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/41Kyu-hWZ4L4ei-QvD8r/https://drive.google.com/file/		ผนัง,ประตู	ประตูบาน,ผนังถลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/245	10.42973	99.89133	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/411W5f5fubhNk43VnV58/https://drive.google.com/file/		ผนัง,ประตู	ประตูบาน,ผนังถลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/75	10.42736	99.8941	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1cvRG08mq72N6x9jPN87NULvUy3m/view?usp=drive_lm		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/170	10.42885	99.89151	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1M2uqfndmqu2J2Z0V63/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/224	10.42907	99.89027	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1MAFYsrn4d71n7NspM3T-9s8BdW7F5/view?usp=drive_lm		ประตู	ประตูบานประตู	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/155	10.42602	99.89412	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1MHV_h0Hf5t5G6KqG6a7U/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/77	10.42743	99.89417	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1MogehENd8tghp8Sa0b9buck-wFzU/view?usp=drive_lm		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/234	10.42977	99.89071	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1NTS4T5T5TQd64DuD0_1/https://drive.google.com/file/		ผนัง	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/202	10.42851	99.8918	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1v6tKHzV5_VznpWwQuQn/https://drive.google.com/file/		ผนัง	ผนังถลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/237	10.42979	99.89069	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Qa2CkxvU9Q9p7Y9vOX3h/https://drive.google.com/file/		ประตู,ผนัง	ผนังถลอก,ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/64	10.42976	9.890564	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1PH1Exm-GGdMevag9vWp6Kf6_3f6G6/view?usp=drive_lm		ประตู	วงกบประตูเสียดายเล็กน้อย	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/61	10.42974	99.89061	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1PpOP1H7fU6qUdG3CZ3a9/https://drive.google.com/file/		ผนัง,วงกบประตู	สิ่งของแตก,วงกบประตู	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/58	10.42958	99.89055	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1QZpL5_n18R7v4d8B8f8Bf8v9PH2h/view?usp=drive_lm		ประตู	ประตูชำรุด	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/231	10.42933	99.89406	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1W1ZTYvWdH681UL1UCYDhE2F3/view?usp=drive_lm		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/300	10.42702	99.89378	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1XST12HfEOQ0ZB9Q2H1/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/232	10.42957	99.89057	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1XeeVqP0EUC7C0d6dZAK05S34oyn3/view?usp=drive_lm		ประตู,ผนัง	ประตูบาน,มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/233	10.42976	99.89065	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Y0h1g5SR5OR05m2u2M/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/9	10.42748	99.893	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1YomyWJ8E4dHfR6G0vNv/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของชำรุด	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/100	10.42713	99.89101	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1ZbwKw0m3M1DQ7Kxk1g/https://drive.google.com/file/		ผนัง	ผนังถลอก,ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/2	10.42768	99.89347	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Jy0-8RP_Xm7jFvYUaH/https://drive.google.com/file/		พื้น,ผนัง	การเปื้อนหลุดร่อน,สิ่งของหลุดลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/159	10.42653	99.89321	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1J_1emA3Y1E8b9CtUW3z/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/66	10.42754	99.89337	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1AuD3nqthDn3n_P8Wu-M9h9z43Hv-wqF/view?usp=drive_lm		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/260	10.42751	99.89262	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Ax9vYCOmgQ2Mh8hC60z8A5_3p9s/view?usp=charme		ประตู	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/5	10.4276	99.89334	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1arv9H1dMaix7ZdUv-v8h/https://drive.google.com/file/		ผนัง	คราบน้ำแตกเป็นหยด	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/173	10.42676	99.89286	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1k5hP4xvCtGg4d8r71g8/https://drive.google.com/file/		ผนัง,ประตู	สิ่งของแตก,ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/174	10.42679	99.89293	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1b5h0ZU7knng3m8sLspQ0zBHP8bba/view?usp=drive_lm		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/6	10.42755	99.89347	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1cd8g_1M5o7h8vD64yV/https://drive.google.com/file/		ผนัง	คราบน้ำแตกเป็นหยด	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/72	10.42707	99.89287	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1d0FvYv8BM9jK8p9dU57n/https://drive.google.com/file/		ผนัง,วงกบประตู	วงกบประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
416/1	10.4258	99.89191	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/41y4d8AfUwAST58993TYN/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/50	10.42748	99.89323	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/4FoN7WVAlUblPc3abYvGg/https://drive.google.com/file/		ฉนวนกันความร้อน	วงกบประตูพัง,สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/89	10.42706	99.89419	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Jv-7Wv558re23W5v4d7w/https://drive.google.com/file/		ผนัง,พื้น,ประตู	ผนังถลอก,ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/185	10.42714	99.8945	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1wWQnMv4V9fmd9XK0G/https://drive.google.com/file/		รั้ว	สีหลุดลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
444/2	10.42438	99.89385	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1vE3xxtWvDf6v4BPHD0t/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
8/8	10.42748	99.8934	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1evb185UT0Z-SU6v5Q9vQHG5fThK2/view?usp=drive_lm		ผนัง	สิ่งของแตก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
446/1	10.42436	99.89372	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1Rlv0wmwqEXHm64VHUV8-K55dH7ye8/view?usp=charme		ประตู	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
677/1	10.42484	99.89534	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1RvdZQoSL8o_MTmHf4pXONG3oXyP8F/view?usp=charme		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
506/2	10.42305	99.89526	6	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/1d8OnDx4ee4wbCtbtTuOPVz97mp5Mu/view?usp=charme		ผนัง	มีคราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
579/1	10.428331	99.89286	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	คราบน้ำที่ผนัง	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
75/2	10.435955	99.894234	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง,ประตู	คราบน้ำแตกเป็นหยด,ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
418	10.436102	99.894226	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
74	10.435780	99.894386	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
412	10.44248	99.8904	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของแตกหัก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
437	10.43303	99.89417	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	มีสิ่งของชำรุดในบริเวณรอบๆประตู 1 มม.	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
57	10.44218	99.89033	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		พื้น และผนัง	พื้นและผนังเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
181/1	10.43966	99.88957	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สีลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
362	10.43593	99.89454	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/1eYmLXYnzmblgW85n3F/		ผนัง	สิ่งของชำรุดบริเวณโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
73/1	10.43595	99.89475	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ประตูหลัก	ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
265	10.44198	99.88892	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
388/33	10.43961	99.88957	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/12oKHenBeVajH8vNAP9/		ผนัง	สิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
388/27	10.43959	99.88957	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ประตู	ประตูหลุด	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
388/25	10.43932	99.88949	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	บานเปิดหลุดหาย	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
388/24	10.43944	99.88961	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/1-0thh15nYd8z9iWq8t/		ผนัง	สีลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
364/2	10.44258	99.88863	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	คราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
517	10.43311	99.89076	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/13z9p9PB1Uj07VvYpYwJd/		ผนัง	ผนังเป็นโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
188/1	10.43965	99.88956	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/1t5-9c5FyEU83-ha1KOLb/		ผนัง	ผนังเป็นโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
336/1	10.44301	99.88876	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/https://drive.google.com/file/		ผนัง	สีลอก	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
516	10.43313	99.89047	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/14f86TfT98w5am7bWUj/		ผนัง	สิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
168/8	10.43913	99.88935	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/1h-xeR9AS7Wjg2-kPI8N/		ผนัง	สิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
168/5	10.43902	99.88924	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/13hMoZnWd55_Pdf_-vr2g/		ผนัง	สิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
168/9	10.43965	99.88953	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/https://drive.google.com/file/d/1gubd2rb4GMO0318TjU/		ผนัง	มีสิ่งของเป็นคราบน้ำโคลน	เล็กน้อย	ค.ส.ล.
168/18	10.43972	99.88934	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	/					

ภาพที่ 8 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseNo	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Det	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
189/13	20.43843	99.88972	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1kzsc0tP3Q9NCQjushs-0Ks/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
388/8	20.44024	99.88928	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
388/10	20.44023	99.88928	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สติก	เล็กน้อย	คคส.
147/59	20.44088	99.89052	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	กระเบื้องแผ่นเก่า	เล็กน้อย	คคส.
147/56	20.44082	99.89032	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	กระเบื้องแผ่นหนึ่งหลุด	เล็กน้อย	คคส.
676	20.44112	99.88934	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
316/1	20.44113	99.88934	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
5	20.44085	99.88928	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สติก	เล็กน้อย	คคส.
147/45	20.44052	99.89029	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ฝ้า	ฝ้าขาดน้ำ	เล็กน้อย	คคส.
147/40	20.44027	99.89022	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สติก	เล็กน้อย	คคส.
147/17	20.44109	99.88995	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ฝ้า	ฝ้าฟุ้ง1จุด	เล็กน้อย	คคส.
135	20.44298	99.88547	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/16	20.44093	99.8898	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สติก	เล็กน้อย	คคส.
147/14	20.44104	99.89033	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/7	20.44121	99.89038	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/62	20.44112	99.89037	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
389	20.44293	99.88523	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
688	20.44058	99.89024	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูหลุด	เล็กน้อย	คคส.
316	20.44057	99.8903	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูชน	เล็กน้อย	คคส.
147/24	20.44096	99.89028	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		บานเหล็ก,ฝ้า	บานเหล็กแตกและฝ้าขาดน้ำ	เล็กน้อย	คคส.
147/63	20.44117	99.89044	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	กระเบื้องแผ่นหนึ่งหลุด	เล็กน้อย	คคส.
147/22	20.44113	99.89019	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/31	20.44053	99.89029	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูขุ่น	เล็กน้อย	คคส.
147/6	20.44107	99.8905	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
387/4	20.44289	99.8852	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/4	20.44112	99.8905	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูขุ่น	เล็กน้อย	คคส.
147/67	20.44113	99.89048	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
387	20.44304	99.88505	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
147/3	20.44119	99.8905	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/68	20.44104	99.89045	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/1	20.44115	99.8907	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/21	20.44111	99.89054	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูหลุด	เล็กน้อย	คคส.
387/2	20.4434	99.88522	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/77	20.44118	99.89084	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/78-80	20.44125	99.89079	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น	พื้นถล่ม	เล็กน้อย	คคส.
367	20.44276	99.8849	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ผนังชั้นโกลน	เล็กน้อย	คคส.
147/75	20.44045	99.89088	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
364/2	20.44269	99.8846	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
102	20.43958	99.89114	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ผนังสีลอก	เล็กน้อย	คคส.
285/2	20.444752	99.88748	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
128	20.443021	99.88875	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		หลังคา	หลังคาหัก	เล็กน้อย	คคส.
333/10	20.441381	99.885475	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		รั้ว,ประตู	รั้วเหล็กหัก,ประตูช่องน้ำทิ้งเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
384/4	20.445172	99.888015	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูหลุด	เล็กน้อย	คคส.
814	20.443401	99.888588	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
152/1	20.443432	99.888634	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
244/5	20.441748	99.885162	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตูเหล็ก	ประตูเหล็กผิวยางสีลอก	เล็กน้อย	คคส.
244/4	20.441799	99.885231	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง,ประตู	วงกบประตูขุ่น	เล็กน้อย	คคส.
119/1	20.445066	99.888382	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	คคส.
150/1	20.441698	99.884895	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
38/2	20.442160	99.884515	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู,ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
172	20.442230	99.884262	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	คคส.
87	20.43689	99.89219	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น,ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	ครึ่งปูนครึ่งไม้
24/2	20.43802	99.89112	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
28	20.438536	99.891930	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น	กระเบื้องร้าว	เล็กน้อย	คคส.
134	20.436481	99.892647	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
147/21	20.441111	99.890152	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังถลอก	เล็กน้อย	คคส.
84	20.438564	99.893494	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
242/2	20.439404	99.889305	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	สีผนังริ้วถลอก	เล็กน้อย	คคส.
572/17	20.439957	99.889061	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		กำแพง	กำแพงร้าว	เล็กน้อย	คคส.
503	20.438732	99.892090	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
673	20.436691	99.891632	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ไม่เสียหาย	ไม่มีความเสียหาย	เล็กน้อย	คคส.
400/47	20.440628	99.883392	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
400/55	20.440563	99.883621	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ผนังปูนลอก	เล็กน้อย	คคส.
400/40	20.440548	99.883507	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
400/18	20.440563	99.883293	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ฝ้า	ฝ้าขาดน้ำเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
861	20.443241	99.886253	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น,ผนัง	ศาลาโคสน	เล็กน้อย	คคส.
472	20.442726	99.886543	12	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูบานารวมชำรุดใช้สั	เล็กน้อย	คคส.
96/1	20.442736	99.882454	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		พื้น	พื้นปูนโกลนถลอกน้อย	เล็กน้อย	คคส.
82	20.445442	99.884132	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ผนัง	กำแพงปูนร้าวบริเวณ	เล็กน้อย	คคส.
780	20.445160	99.884155	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		ประตู	ประตูวงกลม	เล็กน้อย	คคส.
7	20.444693	99.883102	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1w7dn9nGKs2P0Hv8E5K4/view		กำแพงร้าว	ผนังร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.

ภาพที่ 9 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Det	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
201/1	10.442402	99.883187	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1G8PvDTJg6NTPvW45u9/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอกกลาง ฐานบนผนังแตก	เล็กน้อย	คคค
196/2	10.445215	99.883766	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูกระจกบานเลื่อนเสียหาย	เล็กน้อย	คคค
183/3	10.442581	99.883575	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนังฉาบพื้น	ผนังฉาบพื้นแตกบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
180/2	10.441900	99.883453	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/17u7uobGd3ORWvY1Y12u5/view		ผนังฉาบพื้น	ไม่มีความเสียหายจากการที่ตะขากำ	เล็กน้อย	คคค
173/3	10.441533	99.883427	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1Q1u7uobGd3ORWvY1Y12u5/view		ไม้คานใต้ถุน	ไม้คานใต้ถุนหัก	เล็กน้อย	คคค
161	10.444935	99.880464	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอกกลาง กระจกบานเลื่อนแตก	เล็กน้อย	คคค
15	10.441457	99.883507	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1G5W6h1wuhvXTPtr1G5Qh/view		พื้น	พื้นบริเวณคอกกลาง	เล็กน้อย	คคค
139	10.442423	99.883667	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
137/1	10.441829	99.883652	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
127/2	10.442230	99.883255	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		เสา	เสาบริเวณคอกกลาง	เล็กน้อย	คคค
127	10.442265	99.883278	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กระเบื้อง	กระเบื้องเคลือบบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
126	10.442135	99.883369	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง พื้น	กำแพงคอกกลาง	เล็กน้อย	คคค
125/2	10.442013	99.883133	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
125	10.442009	99.883110	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอกกลาง	เล็กน้อย	คคค
112/1	10.442577	99.883193	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		บันได	บันไดบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
112	10.442467	99.883104	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		เสา	เสาบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
276	10.442658	99.882112	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น กำแพง	ผนังบริเวณคอก พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
33	10.442476	99.886734	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
9	10.443069	99.886605	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง ประตู	ผนังบริเวณคอก ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
17/1/1	10.441576	99.887634	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
176/1	10.441896	99.887833	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
195	10.443245	99.887039	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
217/1	10.441292	99.886574	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
364/3	10.442644	99.884697	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูคอกกลาง	เล็กน้อย	คคค
417/1	10.440796	99.886665	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
417/8	10.440948	99.886513	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
436	10.439898	99.88723	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กระถาง	กระถางน้ำบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
436/9	10.439955	99.88726	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
439/5	10.440722	99.887131	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
447	10.442055	99.887863	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
447/1	10.442001	99.887825	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
453/4	10.441776	99.88707	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
458	10.442379	99.886887	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
472/3	10.442385	99.886971	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
494	10.443441	99.887505	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
75	10.443449	99.886772	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
818/7	10.439779	99.886703	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
819/6	10.441223	99.886301	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
858	10.444876	99.888695	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
10	10.444950	99.888573	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น ผนัง	พื้นบริเวณคอก ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
101	10.440235	99.883934	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
105	10.444563	99.889136	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนังกำแพง	ผนังกำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
106	10.440956	99.885101	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนังกำแพง	ผนังกำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
106/1	10.440929	99.885040	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
110	10.440842	99.884872	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
115/2	10.441502	99.885399	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
117	10.444809	99.889053	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
118/8	10.444956	99.888573	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		พื้น	พื้นบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
127	10.442875	99.887976	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
129/2	10.440930	99.885764	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
137/7	10.437866	99.885254	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
134	10.440975	99.883003	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
140	10.442742	99.888024	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
145/1	10.437981	99.885124	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
154	10.440445	99.884628	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
155	10.440369	99.884544	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
16/8	10.444536	99.889160	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
184	10.445147	99.888046	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
209	10.440842	99.884880	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		เสา	เสาบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
214	10.438375	99.886577	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ประตู	ประตูบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
221	10.441851	99.884720	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
221/3	10.441744	99.884468	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กระเบื้อง	กระเบื้องบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
279	10.443943	99.889153	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
283	10.443989	99.888733	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
284	10.444500	99.887878	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
330	10.441259	99.883133	4	บ้านนา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
340	10.438778	99.884804	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
36/1	10.444465	99.888885	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		ผนัง	ผนังบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
364/2	10.442638	99.884682	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
39/3	10.438875	99.884491	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
40/2	10.440548	99.884506	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1wcf1IMt8I8v8vH4M4U8/view		กำแพง	กำแพงบริเวณคอก	เล็กน้อย	คคค
406/2	10.4405												

ภาพที่ 10 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Actual Damage Details	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
47/3	20.444393	99.889191	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง และ พื้น	ผนังเชื่อมตรานาโคลน พื้นเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
476/1	20.442857	99.887517	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบภายนอก	เล็กน้อย	คสล.
481/3	20.444042	99.888527	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบภายนอก	เล็กน้อย	คสล.
481/5	20.444244	99.888397	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตูบาน	ประตูบานเหล็กตีเชื่อม	เล็กน้อย	คสล.
483/1	20.443185	99.887568	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน ฉาบสีฟ้าออก	เล็กน้อย	คสล.
489/1	20.442656	99.887955	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
504	20.442492	99.884491	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน ฉาบสีฟ้าออก	เล็กน้อย	คสล.
51/4	20.438396	99.885315	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานฉาบปูน	เล็กน้อย	คสล.
53	20.438456	99.88694	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง และ พื้น	ผนังฉาบ พื้นฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
53/1-3	20.438063	99.887077	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง และ พื้น	ผนังฉาบ พื้นฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
55	20.438551	99.885803	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
55/4	20.438061	99.886139	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง และ ประตู	ผนังเชื่อมตรานาโคลน ประตูบานเหล็ก	เล็กน้อย	คสล.
564	20.443449	99.887727	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	หน้าต่าง กระเบื้อง	หน้าต่างฉาบ กระเบื้องเคลือบ	เล็กน้อย	คสล.
599	20.444475	99.889236	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบภายนอก	เล็กน้อย	คสล.
700	20.443113	99.886436	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
72	20.437778	99.885254	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตูชุด	ประตูชุด	เล็กน้อย	คสล.
74/2	20.443636	99.886856	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
744/4	20.443577	99.886971	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้น	พื้นเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
744/5	20.443607	99.886864	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพง ฝ้าเพดาน	กำแพงฉาบกระเบื้องภายนอก ฝ้าเพดานฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
767	20.444401	99.888669	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	เสาเข็ม พื้น	เสาเข็มฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
792	20.443393	99.887875	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพง ฝ้าเพดาน	กำแพงฉาบกระเบื้องภายนอก ฝ้าเพดานฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
804	20.441994	99.887077	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบภายนอก	เล็กน้อย	คสล.
809	20.443949	99.888534	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตู กำแพง	ประตูบานเหล็กฉาบปูน กำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
809/3	20.444435	99.889267	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพงบน	กำแพงปูนฉาบปูนฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
812/6	20.440002	99.886116	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพง	กำแพงปูนฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
851	20.441723	99.884438	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตู	ประตูบานเหล็ก	เล็กน้อย	คสล.
851/3	20.444355	99.889114	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตู กำแพง	ประตูบานเหล็ก กำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
853/4	20.444256	99.888233	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
856	20.444536	99.888535	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	เสาเข็ม	เสาเข็มฉาบปูน	เล็กน้อย	คสล.
86	20.442104	99.888199	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ประตู พื้น	ประตูบานเหล็ก พื้นเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
862	20.445063	99.888939	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพง กระเบื้อง	กำแพงฉาบปูนฉาบภายนอก กระเบื้องเคลือบ	เล็กน้อย	คสล.
870	20.443326	99.887667	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังฉาบปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
9/1	20.437756	99.884575	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเชื่อมตรานาโคลนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
92/17	20.438484	99.887970	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้น	พื้นเชื่อมตรานาโคลน กำแพงฉาบ	เล็กน้อย	คสล.
92/4	20.438250	99.887497	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้น ประตู	พื้นเชื่อมตรานาโคลน ประตูบานเหล็ก	เล็กน้อย	คสล.
935/2	20.441208	99.883530	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	กำแพง ประตู	กำแพง ประตูเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
94/2	20.439796	99.883659	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้นปูน	พื้นปูนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
94-94-1	20.439833	99.887359	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้นไม้	พื้นไม้เชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
96	20.444237	99.888260	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเชื่อมตรานาโคลนเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
98	20.439947	99.884071	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนัง	กำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน กระเบื้องเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
10	20.444950	99.888573	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้น ผนัง	พื้นเชื่อมตรานาโคลน ผนังเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
101	20.440235	99.883934	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	พื้น	พื้นเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
105	20.444563	99.889136	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนังกำแพง	ผนังกำแพงเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
106	20.440566	99.885101	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	ผนังกำแพง	ผนังกำแพงปูนเชื่อมตรานาโคลน พื้นเชื่อมตรานาโคลน	เล็กน้อย	คสล.
106/1	20.440929	99.885040	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_9K9z4gG_1/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1u3gk5Gxk21buc_				

ภาพที่ 11 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Details	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
473	20.442896	99.887337	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	เสาบ้าน กระเบื้อง	เสาบ้านแตกหักถล่มลง กระเบื้องหลุดตก	เล็กน้อย	คคส.
473/3	20.444393	99.889191	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง และ พื้น	หลังคาถล่มกระเบื้อง พื้นเรียบทรุดคราบน้ำ	เล็กน้อย	คคส.
476/1	20.442857	99.888517	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนร้าวตามแนวตรง	เล็กน้อย	คคส.
481/3	20.444042	99.886527	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนร้าวทั้งชั้น	เล็กน้อย	คคส.
481/5	20.444244	99.888397	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตูม้วน	ประตูม้วนลั่นกลอนน้อย	เล็กน้อย	คคส.
483/1	20.443185	99.887568	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
489/1	20.444266	99.887955	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าว	เล็กน้อย	คคส.
504	20.442492	99.884491	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าวเล็กน้อยตามแนวตรง	เล็กน้อย	คคส.
51/4	20.438396	99.885315	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานร้าวเป็นจุด	เล็กน้อย	คคส.
53	20.438456	99.886894	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง และ พื้น	หลังคาถล่ม พื้นแตกกว้าง	เล็กน้อย	คคส.
53/1-3	20.438063	99.887077	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง และ พื้น	หลังคา ร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
55	20.438551	99.885803	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่มกระเบื้อง	เล็กน้อย	คคส.
55/4	20.438061	99.886139	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง และ ประตู	หลังคาถล่มตาม ประตูบานบน	เล็กน้อย	คคส.
564	20.443449	99.887727	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หน้าต่าง ประตู	หน้าต่างลั่นกลอน กระเบื้องแตก	เล็กน้อย	คคส.
599	20.444475	99.889236	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าวตามแนวตรง	เล็กน้อย	คคส.
700	20.431113	99.886436	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่มกระเบื้อง	เล็กน้อย	คคส.
72	20.437778	99.885254	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู	ประตูพัง	เล็กน้อย	คคส.
744/2	20.443636	99.886656	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1EaP9rGJ35h8K5Cjcmj8J/view	https://drive.google.com/file/d/1EaP9rGJ35h8K5Cjcmj8J/view	หลัง	หลังคาถล่มกระเบื้อง	เล็กน้อย	คคส.
744/4	20.443577	99.886971	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้น	พื้นเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
744/5	20.443607	99.886864	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนร้าวตามแนวตรง	เล็กน้อย	คคส.
767	20.444001	99.888969	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	เสาบ้าน พื้น	เสาบ้านหักพัง พื้นเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
792	20.443393	99.887875	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
804	20.441994	99.887077	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนแตกร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
809	20.443499	99.888634	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู กำแพง	ประตูบานลั่นกลอน กำแพงเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
809/3	20.444435	99.889267	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพงปูน	กำแพงปูนร้าวเล็กน้อย	เล็กน้อย	คคส.
812/6	20.440002	99.886116	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพง	กำแพงแตกร้าว	เล็กน้อย	คคส.
851	20.441723	99.884438	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู	ประตูบานพัง	เล็กน้อย	คคส.
851/1	20.443355	99.889114	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู กำแพง	ประตูบานพัง กำแพงร้าว	เล็กน้อย	คคส.
853/4	20.444256	99.888233	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่มกระเบื้อง	เล็กน้อย	คคส.
856	20.444536	99.888535	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	เสาบ้าน	เสาบ้านหักพัง	เล็กน้อย	คคส.
86	20.442104	99.888199	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู พื้น	ประตูบานลั่นกลอน พื้นเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
862	20.445063	99.888939	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพง	กำแพงแตกร้าว	เล็กน้อย	คคส.
870	20.443326	99.887667	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่มกระเบื้อง	เล็กน้อย	คคส.
9/1	20.437756	99.884575	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
92/17	20.438484	99.887970	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้น	พื้นเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
92/4	20.438250	99.887497	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้น กระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเรียบทรุด ประตูบานบน	เล็กน้อย	คคส.
935/2	20.441208	99.883530	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพง ประตู	กำแพง ประตูพัง	เล็กน้อย	คคส.
94/2	20.439796	99.883659	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้นปูน	พื้นปูนเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
94-94.1	20.439833	99.883759	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้นปูน	พื้นปูนเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
96	20.444237	99.888260	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้นกระเบื้อง	พื้นกระเบื้องเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
98	20.439947	99.888260	10	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	กำแพง	กำแพงแตกร้าว	เล็กน้อย	คคส.
614	20.43714	99.89172	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ถนนประตู	ถนนประตูเรียบทรุด	เล็กน้อย	คคส.
312/2	20.438890	99.892548	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่ม	เล็กน้อย	คคส.
127	20.440466	99.891365	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	พื้น หลัง	พื้น หลังพัง	เล็กน้อย	คคส.
561/3	20.438875	99.892532	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่ม	เล็กน้อย	คคส.
400/46	20.440643	99.883331	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่ม	เล็กน้อย	คคส.
400/36	20.440567	99.883484	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	หลัง	หลังคาถล่ม	เล็กน้อย	คคส.
10/1	20.443199	99.875603	1	เวียงพางคำ	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	https://drive.google.com/file/d/1TgqK5G6k2tjhu_9K9v6g5_1/view	ประตู,หลัง	หลังคาถล่ม ประตูพัง	เล็กน้อย	คคส.
104													

ภาพที่ 12 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Details	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
437/3	20.43821	99.88758	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	หลังคาทรุดพังเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
443/1	20.44087	99.88701	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	หลังคาทรุดพังเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
450/4	20.44218	99.88795	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	หลังคาทรุดพังเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
462	20.44222	99.88655	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
466/2	20.44268	99.88556	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตู	ประตูเสียหาย	เล็กน้อย	คสล.
469/4	20.44239	99.88542	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	หลังคาทรุดพังเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
472/16	20.44262	99.88702	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง ประตู	หลังคาทรุดพังเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
481/7	20.45063	99.88937	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตูบาน	ประตูบานพัง กระจกแตก	เล็กน้อย	คสล.
485/1	20.44441	99.88612	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
742	20.44378	99.88651	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
774	20.44447	99.88846	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	คานาถาวร	คานาถาวร	เล็กน้อย	คสล.
812/3	20.44022	99.88645	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
819	20.44148	99.88619	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตูบานเสียหาย	ประตูบานทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
839	20.44232	99.88551	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตูบานพัง กระจกแตก	ประตูบานทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
84	20.44761	99.88914	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	า	ประตูบานทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
91	20.44965	99.88893	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตู	ประตูทรุดจากน้ำหนัก	เล็กน้อย	คสล.
798	20.443827	99.881088	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	หน้าต่าง	หน้าต่างกระจกแตก	เล็กน้อย	คสล.
392/3	20.441835	99.883759	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	โครงสร้าง	โครงสร้างบานโดยโครงสร้างจากน้ำหนัก	เล็กน้อย	คสล.
288	20.44271	99.892011	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	โครงสร้าง	โครงสร้างบานโดยโครงสร้างจากน้ำหนัก	เล็กน้อย	คสล.
288	20.44345	99.884216	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	โครงสร้าง	โครงสร้างบานโดยโครงสร้างจากน้ำหนัก	เล็กน้อย	ไม้
434	20.443678	99.889267	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	คานาถาวร	เล็กน้อย	คสล.
628	20.443348	99.875237	1	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	โครงสร้าง	คานาถาวร	เล็กน้อย	คสล.
775	20.443817	99.876724	1	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	2	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ 1-2 เซนติเมตร	เล็กน้อย	คสล.
56	20.44235	99.88998	2	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
151/3	20.441978	99.885521	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
316/1	20.441925	99.883476	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
277	20.442398	99.880615	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	คานาถาวร	คานาถาวร	เล็กน้อย	คสล.
276/1	20.44264	99.88204	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
266	20.444801	99.884102	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
157/1	20.445684	99.884338	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง	ผนังทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
140/1	20.442514	99.882378	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
108	20.44172	99.882057	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
02	20.445118	99.883362	7	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง หน้าต่าง	ผนังทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ หน้าต่างกระจกแตก	เล็กน้อย	คสล.
24	20.444017	99.887115	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตูบาน	ประตูบานทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
106/2	20.444725	99.88884	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	คานาถาวร	คานาถาวร	เล็กน้อย	คสล.
15	20.440465	99.886848	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น ประตู	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ ประตูกระจกแตก	เล็กน้อย	คสล.
176/5	20.442165	99.887779	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น ผนัง	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ ผนัง	เล็กน้อย	คสล.
22	20.44397	99.887146	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตู ผนัง	ประตูทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ ผนัง	เล็กน้อย	คสล.
231/1	20.444508	99.888649	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ประตู	ประตูทรุดจากน้ำหนัก	เล็กน้อย	คสล.
270/1	20.444551	99.888298	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	ผนัง เสา	ผนังทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ เสา	เล็กน้อย	คสล.
43	20.441664	99.88665	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ	เล็กน้อย	คสล.
436/10	20.44008	99.887207	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	https://drive.google.com/file/d/1v3u3l8f5u7m1fz8kxgA5Dh0iQ72/view?usp=sharing	พื้น ผนัง	พื้นทรุดเนื่องจากน้ำหนักของ ผนัง	เล็กน้อย	คสล.
436/14	20.440397	99.88726	10	แม่สา	แม่สา	เชียงใหม่	1						

ภาพที่ 13 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

Household	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Details	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
220	20.436311	99.889427	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง ปรุแตก	ผนังร้าวโดยรอบ ประตูบาน	เล็กน้อย	คต.
400/37	20.440727	99.883446	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ฝ้า	ฝ้าบานพับ	เล็กน้อย	คต.
400/29	20.440895	99.883560	2	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ฝ้า	ฝ้าบานพับ	เล็กน้อย	คต.
96/2	20.442162	99.884041	3	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น หน้าต่าง	หน้าต่างโคลนติด พื้นเดิมตามโคลน	เล็กน้อย	คต.
93	20.443771	99.883392	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	เสาของบ้าน	เสาของบ้านพังเสียหาย	เล็กน้อย	ครึ่งปูนครึ่งไม้
91/1	20.444897	99.883820	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	โพนความเสียหาย	โพนความเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
91	20.443947	99.883049	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูบานพับเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
88	20.444235	99.882835	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู หน้าต่าง	ประตูและหน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
82	20.444088	99.883559	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น	พื้นบด	เล็กน้อย	คต.
81	20.446014	99.884834	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	หน้าต่าง	หน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
792	20.444723	99.887192	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น	พื้นเดิมโคลน	เล็กน้อย	คต.
778	20.444693	99.886414	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	ผนังของบ้านแตกร้าว	เล็กน้อย	คต.
773/3	20.44437	99.882973	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
767	20.445101	99.884628	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนังบาน	ผนังบานภายในฉีกพัง	เล็กน้อย	คต.
765/16	20.445148	99.886353	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู ฝ้าบาน	ประตูและ ฝ้าร้าว	เล็กน้อย	คต.
74/1	20.443113	99.884537	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูหลุดจากบาน	เล็กน้อย	คต.
73	20.442940	99.883766	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู หน้าต่าง	บ	เล็กน้อย	คต.
72/5	20.444561	99.882782	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู หน้าต่าง	บ	เล็กน้อย	คต.
71/2	20.44444	99.884224	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1JCOHqYpKNdyarv_jf8/view	https://drive.google.com/file/d/1JCOHqYpKNdyarv_jf8/view	ประตูห้องน้ำประปา	ประตูหลุดทั้งวงวน	เล็กน้อย	คต.
71/1	20.44423	99.883797	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
71/2	20.443579	99.883766	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูวงวนหลุด	เล็กน้อย	คต.
690	20.45047	99.884567	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูวงวนหลุด	เล็กน้อย	คต.
69/2	20.445257	99.884644	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูวงวนหลุด	เล็กน้อย	คต.
69	20.444975	99.884445	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูเสียหาย ผนัง	ประตูเสียหายกระจัดกระจาย ผนังกำแพงร้าว	เล็กน้อย	คต.
67	20.443282	99.884175	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานหลุด	เล็กน้อย	คต.
655	20.444183	99.882408	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานร้าวหัก	เล็กน้อย	คต.
543	20.443682	99.883812	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	คานาโคลนสั่นคลอน	เล็กน้อย	คต.
532	20.444626	99.884521	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	โพนเสียหาย	โพนเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
521	20.442650	99.884521	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J03dGcARXWgGICRUPYOS/view	https://drive.google.com/file/d/1J03dGcARXWgGICRUPYOS/view	โพนเสียหาย	โพนเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
510	20.443214	99.883720	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1ZlEgHqjZ-MhXON5uK/view	https://drive.google.com/file/d/1ZlEgHqjZ-MhXON5uK/view	โพนเสียหาย	โพนเสียหาย	เล็กน้อย	คต.
51	20.444664	99.881119	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	สั่นคลอน	เล็กน้อย	คต.
501	20.445709	99.883957	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	สั่นคลอน	เล็กน้อย	คต.
43	20.445671	99.884758	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	ผนังฉีก	เล็กน้อย	คต.
40/1	20.442955	99.884193	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูแตกหัก	เล็กน้อย	คต.
373/1	20.445843	99.883980	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานร้าวหัก	เล็กน้อย	คต.
366/1	20.44595	99.88419	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	ผนังเดิมตามโคลน	เล็กน้อย	คต.
361	20.444049	99.883375	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานหัก	เล็กน้อย	คต.
349	20.444326	99.883476	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	หน้าต่าง	บานเกล็ดหน้าต่างหลุด	เล็กน้อย	คต.
346	20.443258	99.883629	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานแตก	เล็กน้อย	คต.
308	20.444336	99.886154	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ผนัง	ผนังฉีกขาด	เล็กน้อย	คต.
305	20.444275	99.886093	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานหลุด	เล็กน้อย	คต.
303	20.444127	99.883910	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น	พื้นเดิมของบ้านตามโคลนจากน้ำท่วม	เล็กน้อย	คต.
3/3	20.444632	99.883499	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น	พื้นเดิมตามโคลนจากน้ำท่วม	เล็กน้อย	คต.
296/1	20.444584	99.884193	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตูบาน	ประตูบานบิด	เล็กน้อย	คต.
268	20.445890	99.884811	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	หน้าต่าง ผนัง	หน้าต่างหลุด ผนังฉีก	เล็กน้อย	คต.
253/1	20.444141	99.884834	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	กระเบื้อง	กระเบื้องแตกเล็กน้อย	เล็กน้อย	คต.
25	20.444386	99.886223	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	พื้น	พื้นเดิมตามโคลนจากน้ำท่วม	เล็กน้อย	คต.
240/1	20.444437	99.883743	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1JzrhmuCMlR2B8W/view	https://drive.google.com/file/d/1JzrhmuCMlR2B8W/view	ผนัง	ผนังฉีก	เล็กน้อย	คต.
227/2	20.442680	99.884628	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู หน้าต่าง ฝ้าเพดาน	หน้าต่างตามโคลน	เล็กน้อย	คต.
226	20.442823	99.884697	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานเดิมโคลน	เล็กน้อย	คต.
224	20.443043	99.884315	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู หน้าต่าง	ประตู หน้าต่างเสียหายจากแรงสั่นไหว	เล็กน้อย	คต.
220/1	20.4455	99.88441	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	บันได	ขั้นบันไดแตกหักเล็กน้อย	เล็กน้อย	คต.
22/1	20.444902	99.884216	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ประตู	ประตูบานพับ	เล็กน้อย	คต.
215/1	20.44382	99.884239	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	https://drive.google.com/file/d/1N3X3B3a_NmHhJUEfWc/view	ฝ้า ปรุแตก	ฝ้าเพดานแตกเล็กน้อย ปรุแตก	เล็กน้อย	คต.

ภาพที่ 14 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย

HouseID	Latitude	Longitude	VillageNo	Subdistrict	District	Province	SDI	Picture1	Picture2	Structural Damage Det	Structural Damage Details	Damage level	ประเภทโครงสร้าง
123	20.454582	99.886712	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ประตู หน้าต่าง	หน้าต่างบานเกล็ดกระจก ประตูบาน	เล็กน้อย	ค.ส.
122	20.444281	99.883469	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ผนัง บานไ	ผนังกลก บานไ้ไม่เสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
12	20.442532	99.884254	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ประตู กระเบื้อง	ประตูหน้าต่างเสียหาย กระเบื้องฉาบพิศคล	เล็กน้อย	ค.ส.
118/1	20.445755	99.884094	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	กระเบื้อง ประตู	กระเบื้องฉาบฉีกแตก ประตูเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
110	20.444435	99.884331	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	หน้าต่าง ประตู	หน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
11	20.444357	99.883842	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	กระเบื้อง ประตู	ประตูเสียหาย พื้นกระเบื้องแตก	เล็กน้อย	ค.ส.
106/1	20.443655	99.884064	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ประตู	ประตูหน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
104	20.444462	99.884613	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ประตู	ประตูหน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
103/1	20.443822	99.883655	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ฉล็ดคกอย	ผนังหน้าต่างเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
1/ข	20.455915	99.886781	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	หน้าต่าง ประตู	หน้าต่าง บานไ้ เสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
1	20.440271	99.882095	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	2	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ผนัง	ฉิกรายน้ำโดยฉีฉีฉีฉีฉีฉีฉี	เล็กน้อย	ค.ส.
06	20.440897	99.882187	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ผนังบาน	ผนังบานประตูกระจกบานรเสียหาย	เล็กน้อย	ค.ส.
05	20.442715	99.883652	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	พื้นไม้ชั้น	พื้นไม้ชั้น	เล็กน้อย	ค.ส.
04	20.443031	99.884552	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ผนังชั้น	ผนังชั้น 1 กระจกจากกรรเข้าโดย	เล็กน้อย	ค.ส.
03	20.442886	99.884773	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	พื้นไม้	พื้นไม้บริเวณ ชั้น 1 ผนังชั้นบ้าน	เล็กน้อย	ค.ส.
02	20.442902	99.884552	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	พื้นไม้	พื้นไม้บริเวณ ชั้น 1 ผนังชั้นบ้าน	เล็กน้อย	ค.ส.
658	20.44581	99.88456	7	แม่สาย	แม่สาย	เชียงราย	1	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	https://drive.google.com/file/d/1J3mCaN8RGJwG5NSwGjg/view	ประตู	ประตูเปิดโดยฉีฉีฉีฉีฉี	เล็กน้อย	ค.ส.

ภาพที่ 15 ภาพแสดงข้อมูลใน Excel ที่มีความเสียหายเล็กน้อย



การทดสอบกำลังดึงคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา

Testing on the tensile strength of recycled aggregate concrete incorporated with water hyacinth fibers

นายธนกร ทองยิ้ม^{1*} นายอภิวิชญ์ สุยะนา² นางสาวพุทธิพร ฐานภุมมา³ นางสาวอารียา คำเขียน⁴ และรศ.ดร.วรเทพ แซ่ล้อง⁵

^{1,2,3,4} นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁵อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102802@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบศึกษาผลของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเสริมเส้นใยผักตบชวา โดยศึกษาด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติในอัตราส่วน 0% และ 100% ใช้เส้นใยผักตบชวาในอัตราส่วน 0.5% และ 1.0% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวมธรรมชาตินั้นมีคุณภาพดีกว่าใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และการเสริมเส้นใยผักตบชวาทำให้คอนกรีตรับกำลังแรงดึงได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเส้นใยผักตบชวามากขึ้น กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าลดลง

Abstract

This research aims to investigate the effects of using recycled concrete aggregate combined with water hyacinth fibers on the tensile strength of concrete. The test specimens were cylindrical concrete samples with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm. Recycled concrete aggregate was used to replace natural coarse aggregate at the ratios of 0% and 100%, while water hyacinth fibers were incorporated at 0.5% and 1.0% by weight of cement. The results indicate that concrete containing natural coarse aggregate exhibits better quality compared to that with recycled concrete aggregate. Nevertheless, the addition of water hyacinth fibers enhances the tensile strength of concrete; however, increasing the fiber content further leads to a reduction in tensile strength.

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรงสูงในการรับแรงอัด ความทนทาน และความสามารถในการขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญของคอนกรีตคือมีความเปราะ (Brittle) และมีกำลังรับแรงดึง (Tensile strength) ต่ำมาก ทำให้เกิดการแตกร้าวภายใต้แรงดึงได้ง่ายและรวดเร็ว [1] เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว การเสริมแรงด้วยวัสดุต่างๆ เช่น เหล็กเส้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มกำลังดึงและความเหนียวให้กับโครงสร้างคอนกรีต [2] ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา แนวคิดในการเสริมคอนกรีตด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete: FRC) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเส้นใยที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง ความเหนียว และควบคุมการขยายตัวของรอยร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ เส้นใยที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยสังเคราะห์ (เช่น โพลีโพรพิลีน ไนลอน) และเส้นใยแก้ว แต่เส้นใยเหล่านี้มักมีราคาสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตคอนกรีต [3] ประเทศไทยประสบปัญหาภัยพิบัติน้ำที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะผักตบชวา (Water hyacinth) ซึ่งแพร่กระจายอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำธรรมชาติ สร้างปัญหาในการเดินเรือ การชลประทาน และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ การกำจัดผักตบชวาในแต่ละปีต้องใช้งบประมาณและแรงงานจำนวนมาก การนำผักตบชวาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นวัสดุที่มีมูลค่าเพิ่ม จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการปัญหาดังกล่าวอย่างยั่งยืน [4] เส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก มีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจ เช่น มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงพอสมควร และมีราคาถูก การนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอนกรีตจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงดึงและความเหนียวของคอนกรีตได้ พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณขยะจากผักตบชวาและลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต อย่างไรก็ตาม



ก็ตาม การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยผักตบชวายังมีข้อจำกัดและต้องการงานวิจัยเพิ่มเติม โดยเฉพาะในด้านกำลังดึง ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องประเมินเพื่อศักยภาพในการนำไปใช้งานจริง ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของการใช้เส้นใยผักตบชวาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตต่อกำลังดึงของคอนกรีต เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติสำหรับงานก่อสร้างในอนาคต การพัฒนาและการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ มีความต้องการวัสดุก่อสร้างในปริมาณมหาศาล โดยเฉพาะ คอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม การผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของคอนกรีตนั้นก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากนี้ ปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบธรรมชาติสำหรับผลิตคอนกรีต เช่น หินและทราย ก็เป็นอีกหนึ่งความท้าทายที่สำคัญ ทำให้เกิดแนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติลง [6] หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมคือการนำ คอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมรีไซเคิล ในการผลิตคอนกรีตใหม่ ซึ่งไม่เพียงช่วยลดปริมาณขยะจากการรื้อถอนอาคาร แต่ยังช่วยลดความต้องการมวลรวมธรรมชาติอีกด้วย อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลอาจมีคุณสมบัติบางประการที่ด้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกำลังรับแรงดึง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้าง เพื่อให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง [7] การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การนำคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลมาใช้ร่วมกับการเสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติจากผักตบชวา จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจและมีศักยภาพในการสร้างสรรค์วัสดุก่อสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกำลังรับแรงดึง ซึ่งจะช่วยให้มูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการก่อสร้างได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทดสอบกำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่ผสมเส้นใยผักตบชวาในอัตราส่วนต่างๆ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแทนที่มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีตต่อกำลังดึงของคอนกรีต
3. เพื่อวิเคราะห์และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยผักตบชวาที่ใช้ในการเสริมกำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลและองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติกำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่เสริมด้วยเส้นใยผักตบชวา

2. เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เพิ่มมูลค่าให้กับผักตบชวาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน
4. สนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุศาสตร์ เพื่อสร้างสรรค์นวัตกรรมที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติกำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมผสมเส้นใยผักตบชวา โดยมีขอบเขตดังนี้

1. อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร้อยละ 0 และ 100 โดยปริมาตร
2. อัตราส่วนการใช้ผักตบชวาละเอียด 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ
3. อัตราส่วนการใช้ใยเคมีไฮดรอกไซด์สำหรับตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพ 0.75 ไมลาร์
4. ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลใช้ขนาด 3/4 นิ้ว
5. ตัวอย่างการทดสอบกำลังดึง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 15 x 30 ตารางเซนติเมตร ทำการทดสอบที่ 7 และ 28 วัน
6. ผักตบชวาได้มาจากอ่างเก็บน้ำที่มหาวิทยาลัยทางด้านประตูศรีโคมคำ
7. มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้จากตัวอย่างการทดสอบของโครงการ มีกำลังอัดอยู่ในช่วงปานกลาง 20-40 MPa
8. การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ตามมาตรฐาน ASTM C188-17 [8], ASTM C127-15[9], ASTM C128-22[10] และ ASTM C136-06[11]

1.5 แผนการทำงาน

แผนการดำเนินงานสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน				
	4	5	6	7	8
1.ศึกษาค้นคว้า และออกแบบส่วนผสม					
2.เตรียมวัสดุต่างๆเพื่อใช้ในการทำสอบ					
3.ทดสอบทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา					
4.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ					
5.จัดทำรูปเล่ม และนำเสนอรายงานผล					



2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบกำลังดึง (Tensile test) เป็นวิธีการทดสอบหาค่ากำลังดึงของคอนกรีต เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเหล็กเสริม ถึงแม้คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรง แต่การทราบค่ากำลังดึงจะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การหดตัว (Shrinkage) เป็นวิธีการทดสอบกำลังดึงผ่าซีก ใช้ตัวอย่าง คอนกรีตรูปทรงกระบอกวงวนนอนเพื่อรับแรงกดตามแนวแกนที่ส่งผ่านจาก แผ่นไม้อัดหนา 3 มม. กว้าง 25 มม. ก่อนตัวอย่างจะแตกในแนวตั้งตามเส้น ผ่านศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานกำลังดึงบนระนาบแนว แตกได้ การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีผ่าซีก ค่าที่ได้ จะสูงกว่าแรงดึงจริงของคอนกรีต ประมาณร้อยละ 15 % [12]

2.2 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทิดศักดิ์ สายสุทธิ [13] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำหวัเสาะเข็มเหลื่อใช้ นำมารีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบโดยการนำไปแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลตามมาตรฐาน B5 1881 ซึ่งใช้แบบหล่อเหล็กทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร จำนวน 180 ตัวอย่าง โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้เท่ากับ 210, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการบ่มคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่ออายุ การบ่ม 28 วัน จะมีค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยลดลงร้อยละ 3.75, 17.02, 19.37 และ 30.40 ตามลำดับ โดยที่มวลรวมรีไซเคิลจะมีคุณสมบัติทางกายภาพคือ มีรูปร่างเป็น เหลี่ยมผิวขรุขระและมีมอร์ต้าหุ้มเกาะผิวที่ไม่เรียบ คม รวมทั้งค่าความพรุน และการดูดน้ำยังมีค่ามากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติและความถ่วงจำเพาะยังมีค่าน้อยกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ซึ่งมวลรวมรีไซเคิลจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติส่งผลให้คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมกับการใช้งานประเภทงานพื้น, ถนน, งานพื้นทางเท้า หรืองานโครงสร้างอาคารที่พิกอาศัย

3.ระเบียบการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



หินแกรนิต #3/4



ทรายแม่น้ำ



มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล



ตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้วและเบอร์ 4



เส้นใยผักตบชวา



โซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย



เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกไม้
ปรับปรุงคุณภาพ



เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกไม้
ปรับปรุงคุณภาพ



เส้นใยผักตบชวาส่วนเนื้อปรับปรุง



เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุง

รูปที่ 2 เส้นใยผักตบชวาที่ใช้ในการทำวิจัย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุเบื้องต้น

คุณสมบัติ	C	S	NCA	RCA	HF
ความถ่วงจำเพาะ (GS)	3.15	2.59	2.69	2.46	0.1067
การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.72	0.88	6.51	5.425
ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)	1400	2576	2688	2453	0.46
ดัชนีความละเอียด (FM)	-	2.8	-	-	-



ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

หมายเหตุ : C คือ ปูนซีเมนต์; S คือ หินทราย; NCA คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ; RCA คือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; HF คือ ปริมาณผักตบชวา

ตัวอย่างส่วนผสม

HSMNO (1)

เมื่อ สัญลักษณ์ตัวแรก คือ ส่วนผสมที่ผสมเส้นใยผักตบชวา สัญลักษณ์ตัวที่สอง คือ ส่วนของผักตบชวาที่นำมาทำเส้นใย โดยประกอบด้วย S คือ ส่วนเปลือก และ I คือ ส่วนเนื้อ สัญลักษณ์ตัวที่สาม คือ การปรับปรุงคุณภาพเส้นใยผักตบชวา โดยประกอบด้วย M คือ ตัวอย่างเส้นใยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ และ O คือ ตัวอย่างเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ สัญลักษณ์ตัวที่สี่ คือ ส่วนของมวลรวมหยาบโดยประกอบด้วย N คือ ส่วนที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบธรรมชาติ และ R คือ ส่วนผสมที่ผสมด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และ สัญลักษณ์สุดท้าย คือ เปอร์เซ็นต์การใส่เส้นใยผักตบชวาในส่วนผสม โดย ประกอบด้วย O คือ ส่วนผสมที่ใส่เส้นใย 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในขณะที่ 1 คือ ส่วนผสมที่ใส่ผักตบชวา 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2)$$

เมื่อ : σ_t คือ กำลังดึงคอนกรีต (กก./ซม.²); P คือ แรงอัดประลัยที่กระทำต่อคอนกรีต (กก.); L คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ซม.); และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต (ซม.)

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L} = \frac{\delta}{0.15} \quad (3)$$

เมื่อ : ϵ คือ ความเครียดของคอนกรีต (กก./ซม.²); δ คือ การเปลี่ยนแปลงความยาว(มม.); L คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ซม.)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (4)$$

เมื่อ : E คือ Modulus of elasticity (E-modulus) หรือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมผักตบชวาแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ

เริ่มจากการเก็บผักตบชวาจากแหล่งน้ำ บริเวณหน้าประตูเวียงพะเยา แล้วนำมาล้างทำความสะอาด และนำมาขูดเส้นใยแยกเปลือก แลเนื้อ เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำไปอบในอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3

1. เก็บผักตบชวา
2. นำผักตบชวาไปล้างให้สะอาด
3. ปั่นเปลือกและเนื้อของผักตบชวาออกเป็นเส้น



4. นำผักตบชวาที่ปั่นเรียบร้อยแล้วไปอบในอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

5. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำออกมาตัด ความยาว 3.5 เซนติเมตร เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 3 การเตรียมผักตบชวาแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมผักตบชวาแบบปรับปรุงคุณภาพ

นำเส้นใยผักตบชวามาชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อทำการเตรียมเสร็จแล้ว นำน้ำ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกันในสารละลายจนหมด จึงนำเส้นใยผักตบชวามาใส่ แช่ไว้ 15 นาที แล้วจึงนำเส้นใยผักตบชวาออกมาใส่ผ้าขาวบางแล้วล้างด้วยน้ำเปล่า จนสีของน้ำเริ่มใส ไม่มีสีเขียว แล้วจึงนำไปอบในอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4

1. นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำ ด้วยอัตราส่วน น้ำ 7 kg ต่อเส้นใยผักตบ 1 kg และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75 โมลาร์ และนำผักตบชวาไปแช่ ระยะเวลา 15 นาที

2. นำผักตบชวาไปล้างน้ำสะอาดเป็นจำนวน 2 ถึง 3 ครั้ง แล้วจึงนำไปอบ



รูปที่ 4 การเตรียมผักตบชวาแบบปรับปรุงคุณภาพ



3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบกำลัง

1. เตรียมแบบหล่อ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทาน้ำมันหล่อลื่นในแบบหล่อเพื่อถอดออกง่าย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทาน้ำมันหล่อลื่นที่แบบหล่อ

2. ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้ โดยใช้เครื่องมือในการผสม ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การผสมคอนกรีตโดยเครื่องมือ

3. ตรวจสอบค่ายุบตัว (Slump test) 7.5 ซม. แต่ไม่เกิน ± 2.5 ซม. ก่อนที่จะนำไปหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การตรวจสอบค่ายุบตัว

4. เทคอนกรีตลงแบบหล่อ โดยแบ่งเททั้งหมด 3 ชั้น ในแต่ละชั้นใช้แท่งเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง ปาดผิวด้านบนให้เรียบเสมอขอบแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การใช้แท่งเหล็กกระทุ้ง

5. ปรับผิวด้านบนให้เรียบเสมอขอบแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การปรับผิวด้านตัวอย่างคอนกรีต

6. หลังหล่อเสร็จห่อด้วยแผ่นพลาสติกกันการสูญเสียน้ำ แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การห่อด้วยแผ่นพลาสติก

7. ครบ 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิมตัวเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 11



ที่ 11 การนำไปบ่มในน้ำปูนขาว

8. เมื่อบ่มคอนกรีตครบเวลานำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักหลังบ่มและวัดความกว้าง ความยาวของตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 12





รูปที่ 12 การวัดน้ำหนัก ความกว้างและความยาว

9. ทำการทดสอบกำลังแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การทดสอบแรงดึง

จากการทดสอบกำลังดึงคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใย ผักตบชวาพบว่า ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต และการเลือกใช้ผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ รวมถึงการใช้มวลรวมหยาบส่งผลต่อกำลังดึงของคอนกรีต โดยรวมนั้นคอนกรีตที่ผสมผักตบชวาแบบปรับปรุงคุณภาพจะมีกำลังดึงที่สูงกว่าแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ และผสมส่วนเปลือกให้กำลังดึงสูงกว่าส่วนเนื้อ อัตราส่วนผักตบชวา 0.5% ต่ำกว่า 1.0% อีกทั้งใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 0% มีคุณภาพดีกว่าการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 100% และระยะเวลาบ่ม 28 วันก็ให้กำลังดึงสูงสุดได้ต่ำกว่าวันที่ 7 วัน สังเกตว่าในการทดสอบของเนื้อและเปลือกไม่ปรับปรุงคุณภาพของตัวอย่าง HIONO (HF 0.5%, RCA 0%) และ HSOR1(HF 1.0%, RCA 100%) ให้กำลังดึงสูงกว่าเนื้อและเปลือกแบบปรับปรุงจากตัวอย่าง HIMNO(HF 0.5%, RCA 0%) HSMR1(HF 1.0%, RCA 100%) ในการบ่ม 28 วัน เนื่องมาจากตัวผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ อาจจะมีขนาดเส้นใยที่เล็กเกินไปจึงทำให้ตอนปรับปรุงคุณภาพผักตบชวาโดนกัดกร่อนจนเปื่อย พอนำไปอบเส้นใยผักตบชวาเลยมีลักษณะกรอบแทนที่จะมีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียว เลยทำให้คุณภาพและประสิทธิภาพของตัววัสดุลดลงนั่นเอง

4. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาผลของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลร่วมกับการเสริมเส้นใยผักตบชวาต่อกำลังดึงของคอนกรีต พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตนั้นมีความหลากหลายและสัมพันธ์กัน ทั้งระยะเวลาในการบ่ม ปริมาณเส้นใย ชนิดของเส้นใย รวมถึงชนิดของมวลรวมหยาบที่นำมาใช้

ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตมีผลโดยตรงและมีความสำคัญต่อกำลังดึงของคอนกรีต โดยผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอายุการบ่มจาก 7 วันเป็น 28 วัน ค่ากำลังดึงของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้การบ่มที่นานขึ้นยังช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการแตกร้าวได้ดีกว่าการบ่มในระยะสั้น

คุณภาพของเส้นใยผักตบชวาส่งผลต่อประสิทธิภาพของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย โดยเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ช่วยให้ความสามารถในการเพิ่มกำลังดึงและความเหนียวที่ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ แต่ว่าการปรับปรุงที่รุนแรงเกินไปอาจส่งผลให้เส้นใยบางส่วนมีลักษณะกรอบและเปราะมากขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพลดลงในบางกรณี จึงควรมีการเลือกใช้การปรับปรุงคุณภาพเส้นใยที่เหมาะสม เพื่อคงความเหนียวของเส้นใยและเพิ่มความสามารถในการเสริมแรงให้กับคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ชนิดของเส้นใยผักตบชวาก็มีผล โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นใยจากส่วนเปลือกให้ค่ากำลังดึงสูงกว่าเส้นใยจากส่วนเนื้อ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยเปลือกมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากกว่า จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเส้นใยจากส่วนเนื้อ

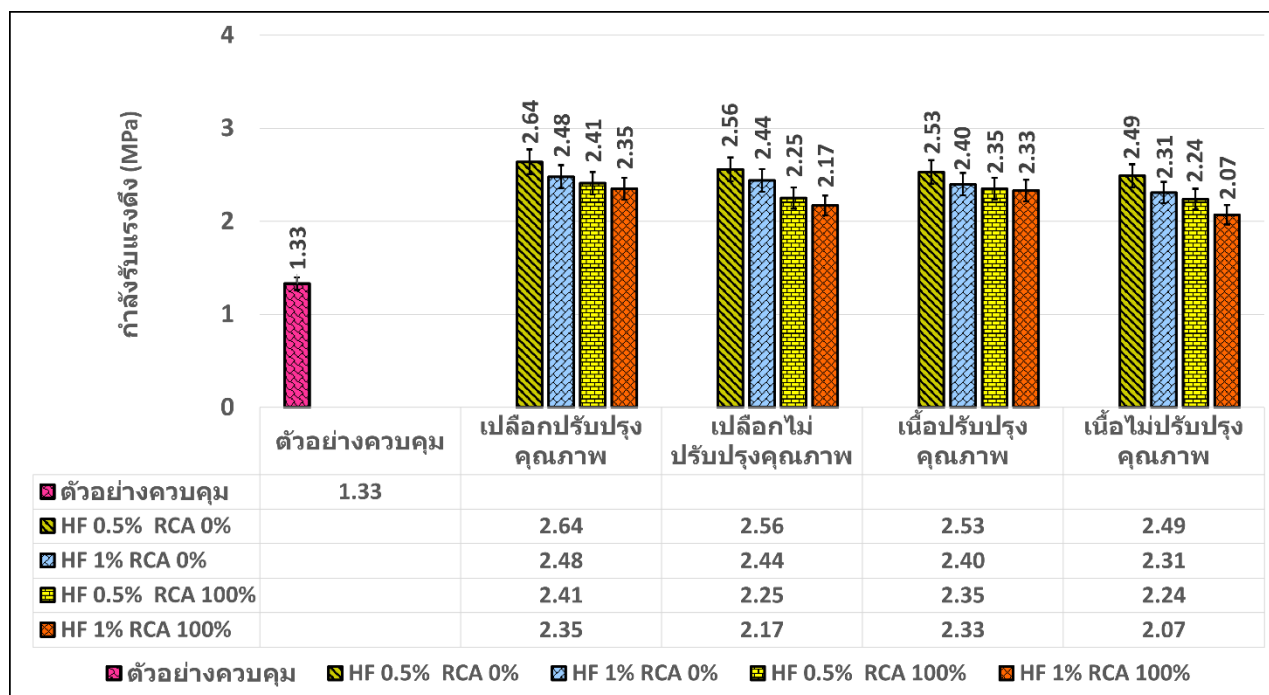
ปริมาณเส้นใยที่ใช้ผสมในคอนกรีตมีผลต่อกำลังแรงดึงของคอนกรีต โดยผลการวิจัยพบว่า การใช้เส้นใยในปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด สามารถเพิ่มค่ากำลังดึงได้สูงกว่าโดยเฉพาะตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติร่วมกับเส้นใยเปลือกที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HSMNO) ซึ่งให้ค่ากำลังดึงที่ 28 วันสูงถึง 2.71 MPa ขณะที่คอนกรีตควบคุมที่ไม่เสริมเส้นใยมีเพียง 1.65 MPa แสดงถึงการเพิ่มขึ้นเกือบ 65% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 1.0% กลับทำให้ค่ากำลังดึงเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอและเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ซึ่งทำให้ลดประสิทธิภาพในการรับแรง

การเลือกใช้มวลรวมหยาบมีผลต่อคอนกรีตอย่างมาก โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ (NCA) มีค่ากำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล (RCA) ในทุกกรณี เพราะ RCA มีลักษณะผิวขรุขระ มีความพรุนสูงและความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การใช้เส้นใยผักตบชวาร่วมกับ RCA ก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งถือเป็นแนวทางสำหรับการนำวัสดุเหลือใช้จากงานก่อสร้างกลับมาใช้ใหม่ เมื่อพิจารณาค่าความเหนียวและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยสามารถเพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ โดยเฉพาะตัวอย่าง HSMNO ซึ่งให้ค่าความเหนียวสูงถึง 12.2 KPa และค่า E-modulus 359 MPa ในขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าความเหนียวเพียง 4.6 KPa และ E-modulus เพียง 143 MPa แสดงว่าเส้นใยผักตบชวาสามารถทำหน้าที่เพิ่มความเหนียวและลดความเปราะของคอนกรีตได้ จากผลการทดสอบทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติร่วมกับเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และบ่มไว้ 28 วัน ซึ่งให้ค่ากำลังดึง ความเหนียว และมอดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดในบรรดาส่วนผสมทั้งหมด โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยผักตบชวาในคอนกรีตสามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังดึง ความเหนียว และความทนทานต่อการแตกร้าวได้จริง หากเลือกใช้ปริมาณและวิธีการปรับปรุงเส้นใยที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางสิ่งแวดล้อมและลดผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในงานก่อสร้างได้

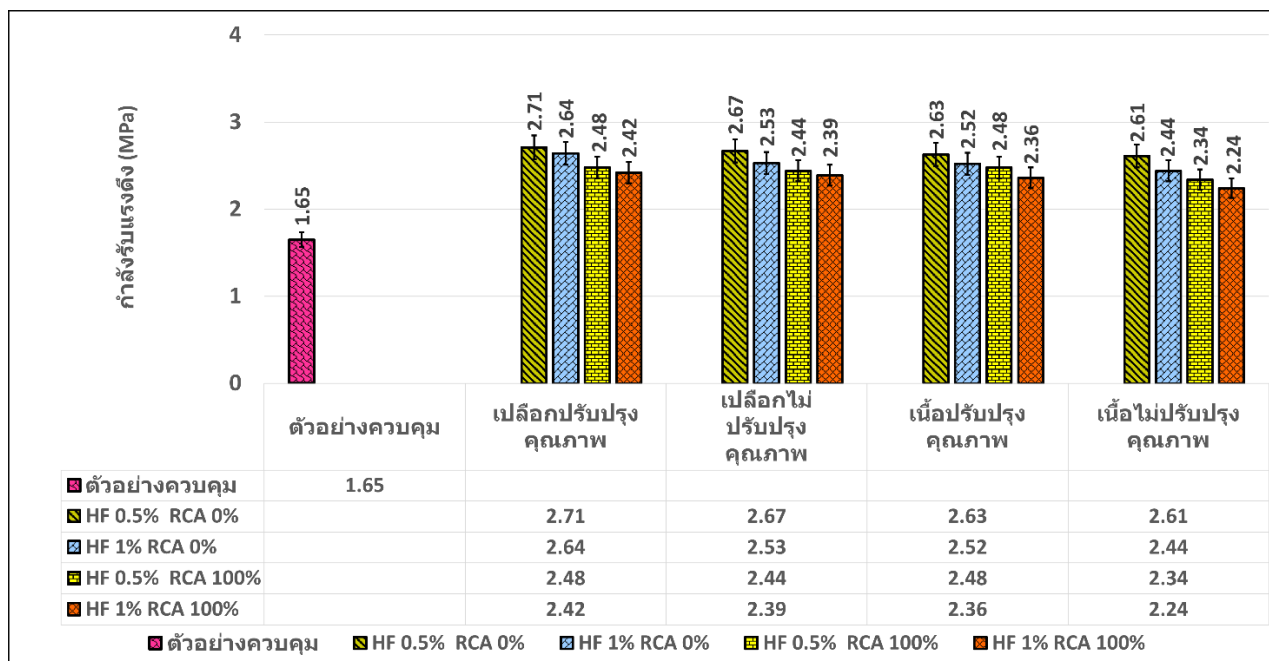


5. ผลการทดสอบ

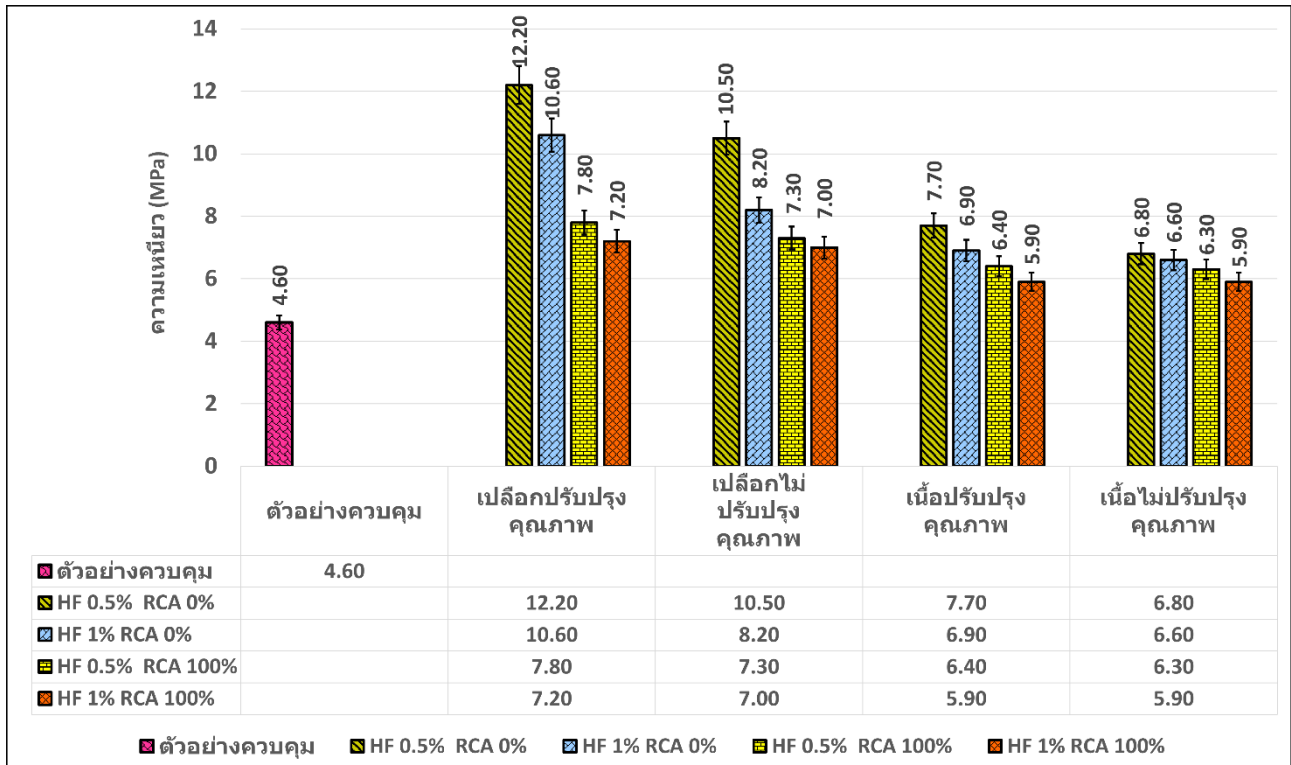
ในการทดสอบสามารถแสดงในภาคผนวก ก1 และ ก2 และรูปที่ 14 และ 15



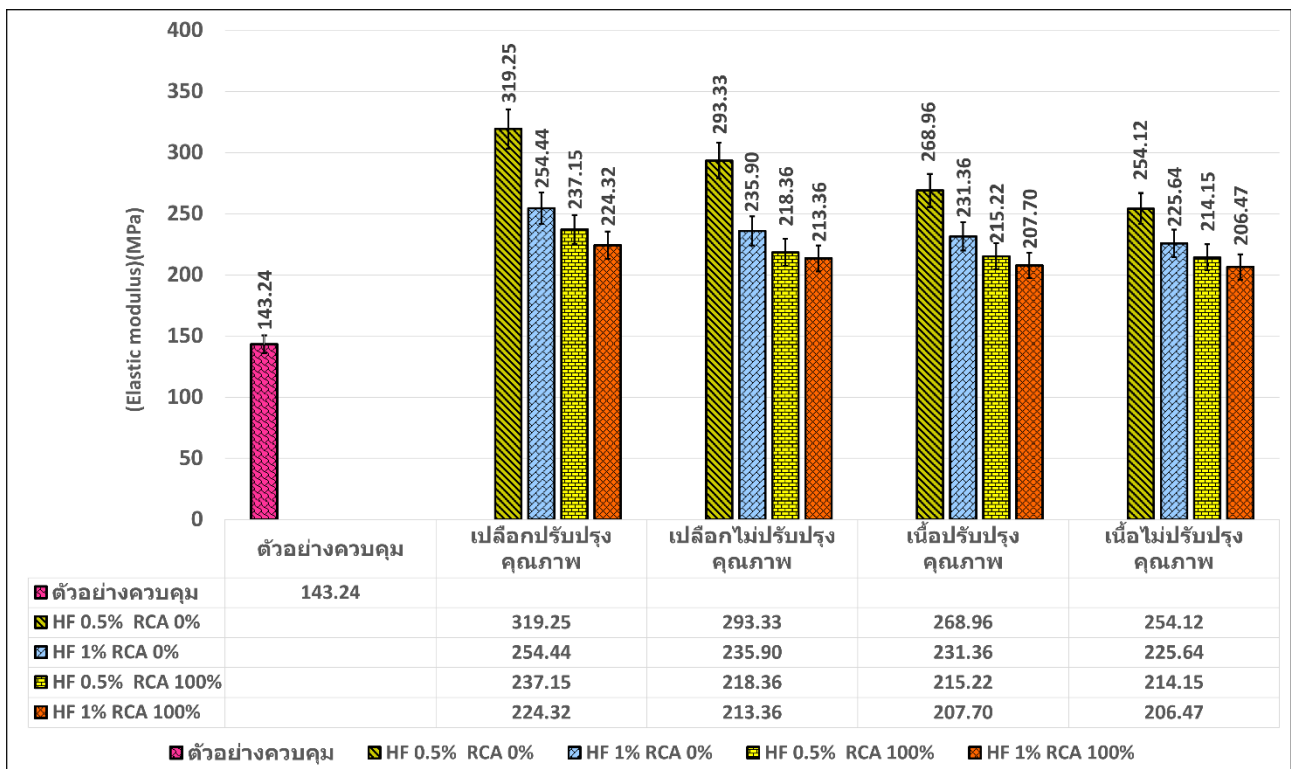
รูปที่ 14 การทดสอบกำลังดิ่งที่ 7 วัน



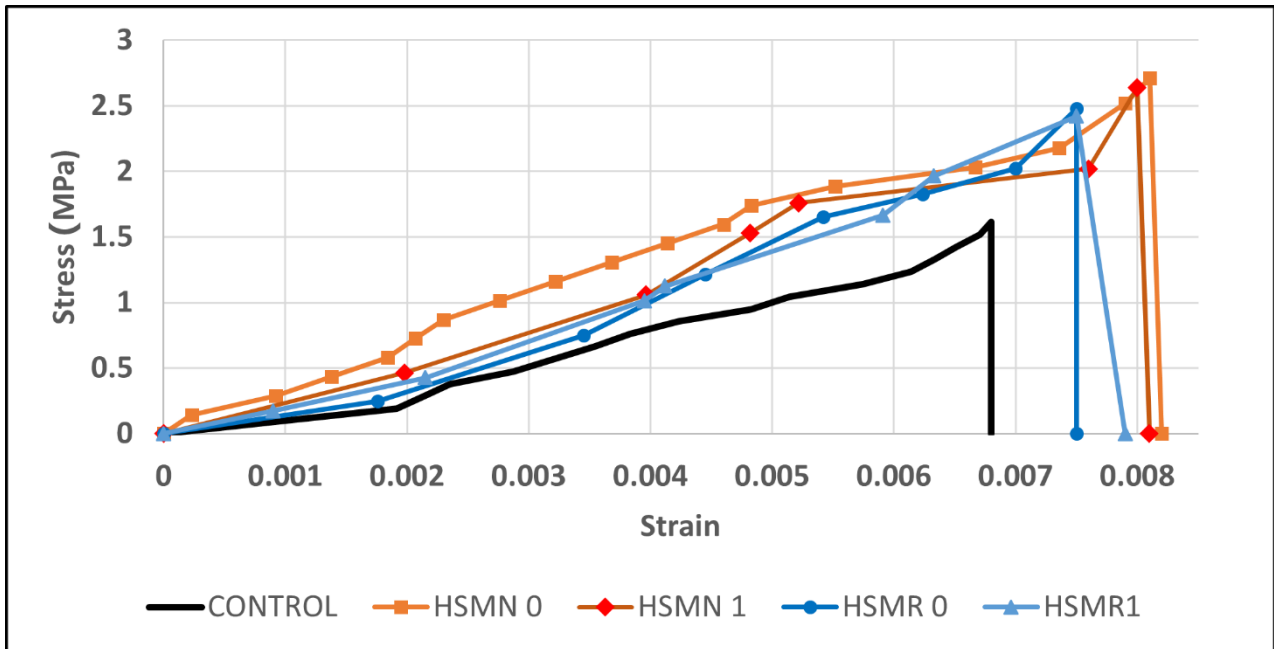
รูปที่ 15 การทดสอบกำลังดิ่งที่ 28 วัน



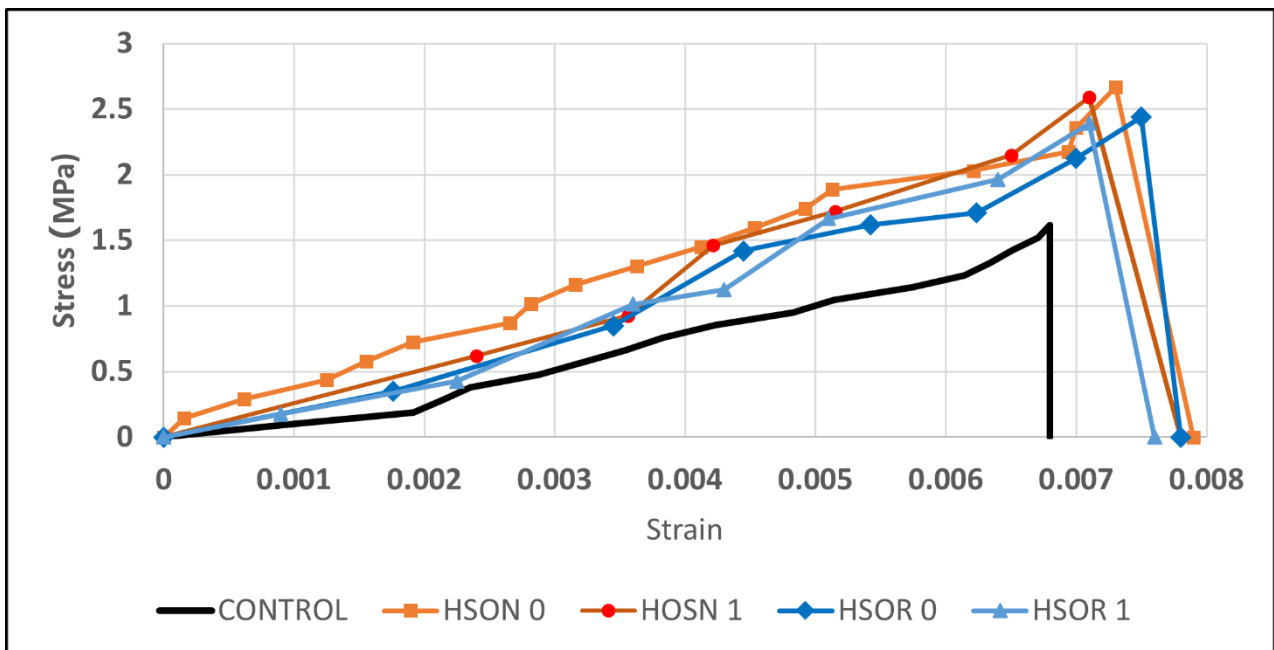
รูปที่ 16 ผลการทดสอบความเหนียวที่ 28 วัน



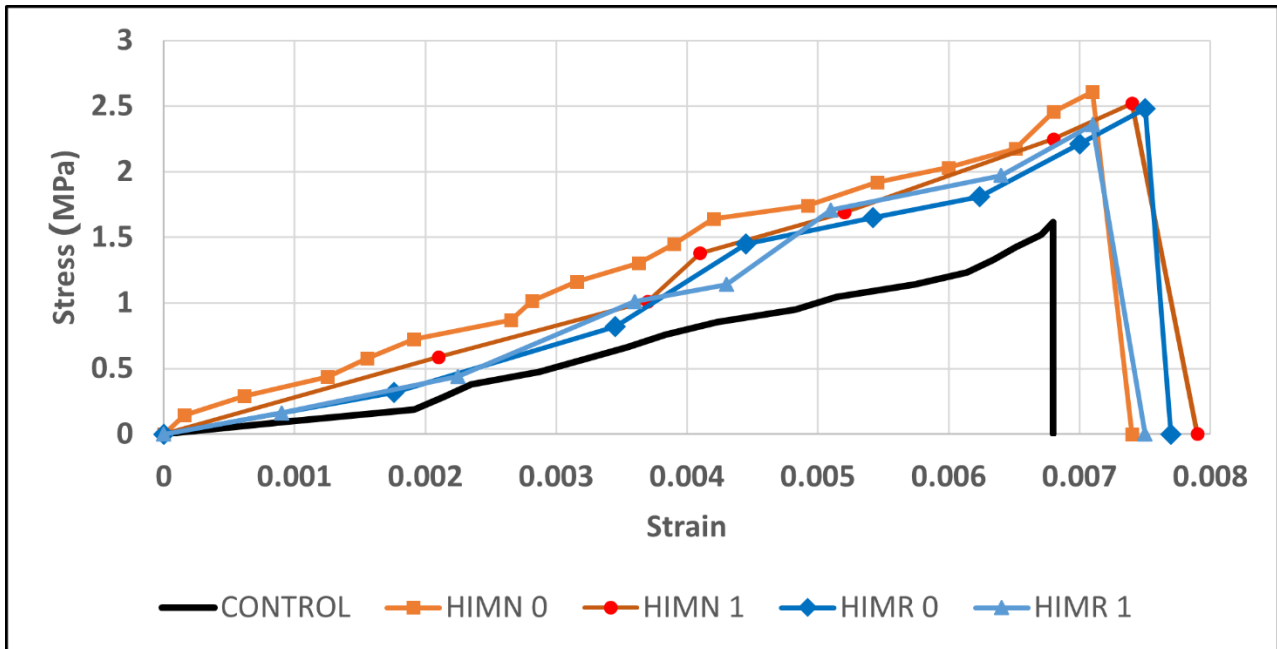
รูปที่ 17 ค่า Elastic modulus ของคอนกรีต



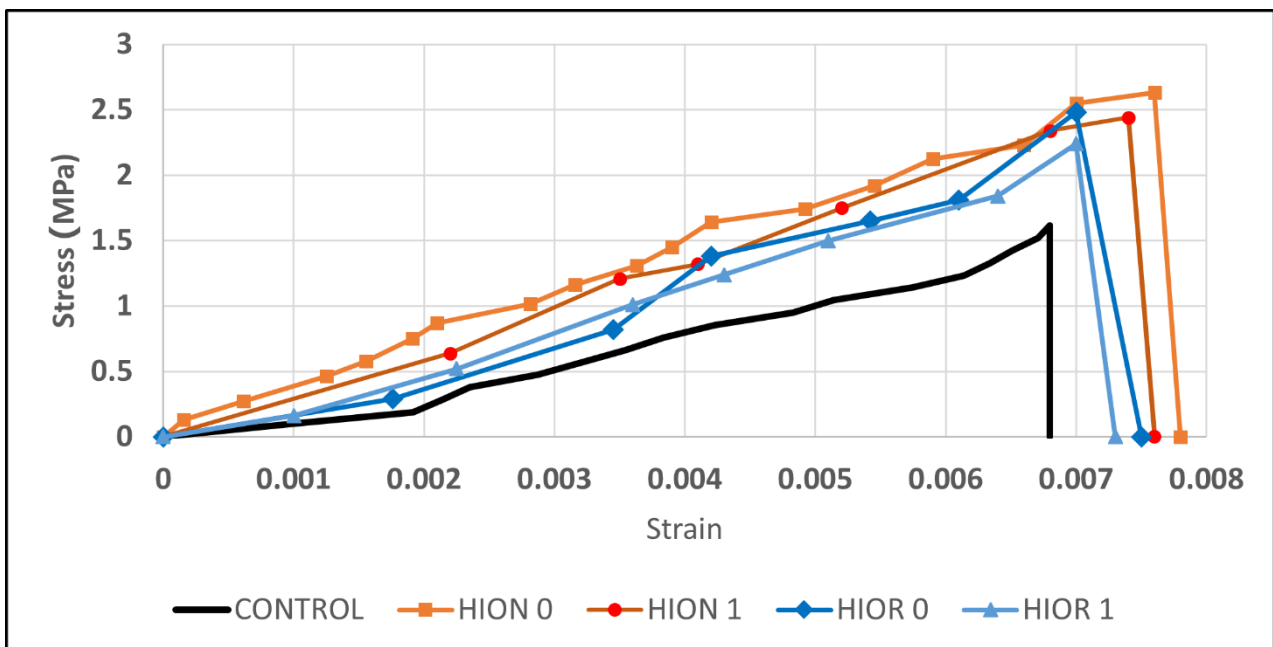
รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกไม่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยฝักตบขาวส่วนเนื้อปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยฝักตบขาวส่วนเนื้อไม่ปรับปรุงคุณภาพ



กิตติกรรมประกาศ

การตรวจสอบกำลังคานคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ มา โดยตลอดผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ในกลุ่มที่ช่วยกันค้นคว้า และจัดทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Li, V. C. (2002). Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 660–686.

[2] Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). Fiber reinforced concrete in civil engineering. *Construction and Building Materials*, 5(2), 89–97.

[3] Singh, N. B., & Sharma, A. (2018). Natural fibers reinforced concrete: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 172, 272–282.

[4] Siripattanakul-Ratpukdi, S., & Hongswat, P. (2012). Water hyacinth management in Thailand: An overview and the potential for utilization. *EnvironmentAsia*, 5(2), 69–79.

[5] Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31, 601–605.

[6] Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71–81.

[7] Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397–401.

[8] American Society for Testing and Material, ASTM C188-17: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.

[9] American Society for Testing and Material, ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.

[10] American Society for Testing and Material, ASTM C128-22: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.

[11] American Society for Testing and Material, ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

[12] American Society for Testing and Material, ASTM C 496-96 : Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 273-276.

[13] เทิดศักดิ์ สายสุทธิ. 2555. RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต, น.1-11. ในรายการประชุมแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน, นครปฐม.



ภาคผนวก

ตารางที่ ก1 ตารางค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง ณ 7 วัน

ลำดับ	รายการ	slump	น้ำหนัก	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)	(cm)	(m ²)	(m)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
1	CONTROL	8.50	11.49	15.00	30.00	0.018	0.0053	2167.34	1.32	1.33
			11.45	15.00	30.00	0.018	0.0053	2159.79	1.33	
			11.42	15.00	30.00	0.018	0.0053	2154.13	1.33	
2	HSMN 0	7.00	12.42	15.00	30.00	0.018	0.0053	2342.76	2.69	2.69
			12.41	15.00	30.00	0.018	0.0053	2340.87	2.69	
			12.37	15.00	30.00	0.018	0.0053	2333.33	2.64	
3	HSMN 1	7.60	11.64	15.00	30.00	0.018	0.0053	2195.63	2.48	2.48
			11.76	15.00	30.00	0.018	0.0053	2218.27	2.51	
			11.52	15.00	30.00	0.018	0.0053	2173.00	2.46	
4	HSMR 0	7.50	11.67	15.00	30.00	0.018	0.0053	2201.29	2.40	2.41
			11.78	15.00	30.00	0.018	0.0053	2222.04	2.43	
			11.69	15.00	30.00	0.018	0.0053	2205.06	2.41	
5	HSMR 1	8.20	11.67	15.00	30.00	0.018	0.0053	2201.29	2.35	2.35
			11.75	15.00	30.00	0.018	0.0053	2216.38	2.35	
			11.78	15.00	30.00	0.018	0.0053	2222.04	2.36	
6	HSON 0	7.40	12.21	15.00	30.00	0.018	0.0053	2303.15	2.55	2.56
			12.33	15.00	30.00	0.018	0.0053	2325.78	2.56	
			12.33	15.00	30.00	0.018	0.0053	2325.78	2.56	
7	HSON 1	7.20	12.18	15.00	30.00	0.018	0.0053	2297.49	2.44	2.44
			12.10	15.00	30.00	0.018	0.0053	2282.40	2.42	
			12.15	15.00	30.00	0.018	0.0053	2291.83	2.43	
8	HSOR 0	7.50	11.69	15.00	30.00	0.018	0.0053	2205.06	2.25	2.25
			11.77	15.00	30.00	0.018	0.0053	2220.15	2.26	
			11.67	15.00	30.00	0.018	0.0053	2201.29	2.25	
9	HSOR 1	8.00	11.64	15.00	30.00	0.018	0.0053	2195.63	2.18	2.17
			11.69	15.00	30.00	0.018	0.0053	2205.06	2.19	
			11.54	15.00	30.00	0.018	0.0053	2176.77	2.16	



ตารางที่ ก1 (ต่อ) ตารางค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง ณ 7 วัน

ลำดับ	รายการ	slump	น้ำหนัก	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)	(cm)	(m ²)	(m)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
10	HIMN 0	7.30	12.35	15.00	30.00	0.018	0.0053	2329.56	2.52	2.53
			12.41	15.00	30.00	0.018	0.0053	2340.87	2.53	
			12.41	15.00	30.00	0.018	0.0053	2340.87	2.53	
11	HIMN 1	7.50	12.04	15.00	30.00	0.018	0.0053	2271.08	2.35	2.40
			12.12	15.00	30.00	0.018	0.0053	2286.17	2.38	
			12.14	15.00	30.00	0.018	0.0053	2289.94	2.41	
12	HIMR 0	8.00	11.84	15.00	30.00	0.018	0.0053	2233.36	2.34	2.35
			11.86	15.00	30.00	0.018	0.0053	2237.13	2.35	
			11.87	15.00	30.00	0.018	0.0053	2239.02	2.36	
13	HIMR 1	7.70	11.85	15.00	30.00	0.018	0.0053	2235.24	2.33	2.33
			11.62	15.00	30.00	0.018	0.0053	2191.86	2.31	
			11.75	15.00	30.00	0.018	0.0053	2216.38	2.33	
14	HION 0	7.10	12.31	15.00	30.00	0.018	0.0053	2322.01	2.49	2.49
			12.29	15.00	30.00	0.018	0.0053	2318.24	2.48	
			12.25	15.00	30.00	0.018	0.0053	2310.69	2.47	
15	HION 1	6.40	11.97	15.00	30.00	0.018	0.0053	2257.88	2.31	2.31
			11.89	15.00	30.00	0.018	0.0053	2242.79	2.31	
			11.82	15.00	30.00	0.018	0.0053	2229.58	2.30	
16	HIOR 0	7.93	11.70	15.00	30.00	0.018	0.0053	2206.95	2.23	2.24
			11.76	15.00	30.00	0.018	0.0053	2218.27	2.24	
			11.78	15.00	30.00	0.018	0.0053	2222.04	2.25	
17	HIOR 1	8.20	11.61	15.00	30.00	0.018	0.0053	2189.97	2.06	2.07
			11.48	15.00	30.00	0.018	0.0053	2165.45	2.07	
			11.48	15.00	30.00	0.018	0.0053	2165.45	2.07	



ตารางที่ ก2 ตารางค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง ณ 28 วัน

ลำดับ	รายการ	Slump	น้ำหนัก	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)	(cm)	(m ²)	(m)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
1	CONTROL	8.50	11.47	15.00	30.00	0.018	0.0053	2163.56	1.64	1.65
			11.46	15.00	30.00	0.018	0.0053	2121.68	1.65	
			11.48	15.00	30.00	0.018	0.0053	2165.45	1.66	
2	HSMN 0	7.00	12.36	15.00	30.00	0.018	0.0053	2331.44	2.71	2.71
			12.39	15.00	30.00	0.018	0.0053	2337.10	2.72	
			12.36	15.00	30.00	0.018	0.0053	2331.44	2.71	
3	HSMN 1	7.60	11.65	15.00	30.00	0.018	0.0053	2197.52	2.65	2.64
			11.63	15.00	30.00	0.018	0.0053	2193.74	2.64	
			11.62	15.00	30.00	0.018	0.0053	2191.86	2.63	
4	HSMR 0	7.50	11.90	15.00	30.00	0.018	0.0053	2244.67	2.49	2.48
			11.84	15.00	30.00	0.018	0.0053	2233.36	2.48	
			11.85	15.00	30.00	0.018	0.0053	2235.24	2.48	
5	HSMR 1	8.20	11.79	15.00	30.00	0.018	0.0053	2223.93	2.43	2.42
			11.76	15.00	30.00	0.018	0.0053	2218.27	2.41	
			11.75	15.00	30.00	0.018	0.0053	2216.38	2.41	
6	HSOR 0	7.40	12.40	15.00	30.00	0.018	0.0053	2338.99	2.67	2.67
			12.38	15.00	30.00	0.018	0.0053	2335.22	2.65	
			12.52	15.00	30.00	0.018	0.0053	2361.62	2.68	
7	HSOR 1	7.20	12.21	15.00	30.00	0.018	0.0053	2303.15	2.50	2.53
			12.17	15.00	30.00	0.018	0.0053	2295.60	2.53	
			12.17	15.00	30.00	0.018	0.0053	2295.60	2.53	
8	HSOR 0	7.50	11.77	15.00	30.00	0.018	0.0053	2220.105	2.44	2.44
			11.73	15.00	30.00	0.018	0.0053	2212.61	2.41	
			11.77	15.00	30.00	0.018	0.0053	2220.15	2.44	
9	HSOR 1	8.00	11.52	15.00	30.00	0.018	0.0053	2173.00	2.39	2.39
			11.50	15.00	30.00	0.018	0.0053	2169.22	2.38	
			11.51	15.00	30.00	0.018	0.0053	2171.11	2.39	



ตารางที่ ก2 (ต่อ) ตารางค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง ณ 28 วัน

ลำดับ	รายการ	slump	น้ำหนัก	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)	(cm)	(m ²)	(m)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
10	HIMN 0	7.30	12.42	15.00	30.00	0.018	0.0053	2342.76	2.62	2.61
			12.41	15.00	30.00	0.018	0.0053	2340.87	2.59	
			12.38	15.00	30.00	0.018	0.0053	2335.22	2.61	
11	HIMN 1	7.50	12.08	15.00	30.00	0.018	0.0053	2278.63	2.50	2.52
			12.22	15.00	30.00	0.018	0.0053	2305.04	2.53	
			12.14	15.00	30.00	0.018	0.0053	2289.94	2.52	
12	HIMR 0	8.00	11.76	15.00	30.00	0.018	0.0053	2218.27	2.48	2.48
			11.77	15.00	30.00	0.018	0.0053	2220.15	2.48	
			11.77	15.00	30.00	0.018	0.0053	2220.15	2.48	
13	HIMR 1	7.70	11.88	15.00	30.00	0.018	0.0053	2240.90	2.36	2.36
			11.85	15.00	30.00	0.018	0.0053	2235.24	2.35	
			11.82	15.00	30.00	0.018	0.0053	2229.58	2.36	
14	HION 0	7.10	12.40	15.00	30.00	0.018	0.0053	2338.99	2.44	2.44
			12.31	15.00	30.00	0.018	0.0053	2322.01	2.43	
			12.46	15.00	30.00	0.018	0.0053	2350.31	2.44	
15	HION 1	6.40	11.91	15.00	30.00	0.018	0.0053	2246.56	2.33	2.34
			12.06	15.00	30.00	0.018	0.0053	2274.85	2.36	
			11.92	15.00	30.00	0.018	0.0053	2248.45	2.34	
16	HIOR 0	8.20	11.78	15.00	30.00	0.018	0.0053	2222.04	2.35	2.34
			11.74	15.00	30.00	0.018	0.0053	2214.49	2.34	
			11.69	15.00	30.00	0.018	0.0053	2205.06	2.33	
17	HIOR 1	8.20	11.46	15.00	30.00	0.018	0.0053	2161.68	2.23	2.24
			11.49	15.00	30.00	0.018	0.0053	2167.34	2.24	
			11.56	15.00	30.00	0.018	0.0053	2180.54	2.25	



ตารางที่ ก3 สรุปค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง 7 และ 28 วัน

ส่วนผสม	กำลังดึง (MPa)		ความเหนียว (MPa)	E (MPa)
	7 วัน	28 วัน	28 วัน	28 วัน
CONTROL	1.33	1.65	4.60	143.24
HSMN 0	2.69	2.71	12.20	319.25
HSMN 1	2.48	2.64	10.60	254.44
HSMR 0	2.41	2.48	7.80	237.15
HSMR 1	2.35	2.42	7.20	224.32
HSOON 0	2.56	2.67	10.50	293.33
HSOON 1	2.44	2.53	8.20	235.90
HSOR 0	2.25	2.44	7.30	218.36
HSOR 1	2.17	2.39	7.00	213.36
HIMN 0	2.53	2.61	7.70	268.96
HIMN 1	2.40	2.52	6.90	231.36
HIMR 0	2.35	2.48	6.40	215.22
HIMR 1	2.33	2.36	5.90	207.70
HION 0	2.49	2.63	6.80	254.12
HION 1	2.31	2.44	6.60	225.64
HIOR 0	2.24	2.34	6.30	214.15
HIOR 1	2.07	2.24	5.90	206.47



ตารางที่ ก4 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

No.	Mix symbol	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	NCA (kg/m ³)	RCA (kg/m ³)	HF (kg/m ³)	V (m ³)	จำนวน ตัวอย่าง
1	CONTROL	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0	0.005	12
2	HSMN 0	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1002	0.005	12
3	HSMN 1	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1998	0.005	12
4	HSMR 0	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1002	0.005	12
5	HSMR 1	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1998	0.005	12
6	HSOR 0	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1002	0.005	12
7	HSOR 1	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1998	0.005	12
8	HSOR 0	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1002	0.005	12
9	HSOR 1	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1998	0.005	12
10	HIMN 0	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1002	0.005	12
11	HIMN 1	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1998	0.005	12
12	HIMR 0	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1002	0.005	12
13	HIMR 1	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1998	0.005	12
14	HION 0	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1002	0.005	12
15	HION 1	20.00	12	52.2558	54.4146	0	0.1998	0.005	12
16	HIOR 0	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1002	0.005	12
17	HIOR 1	20.00	12	52.2558	0	50.103	0.1998	0.005	12



การทดสอบกำลังดัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา

Testing on the Flexural Strength of Recycled Aggregate Concrete Incorporated with Water Hyacinth Fibers

นายญาณภัทร จันท์คำ¹ นายณภัทร ประดับ² นายวันอดิษฐ์ วัฒนกะมา³ นายอดิสร บัวพันธ์⁴ และ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง⁵

^{1,2,3,4} นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁵ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบกำลังดัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา โดยใช้เสริมเส้นใยในคอนกรีตในอัตราส่วน 0.5% และ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์โดยใช้ความยาวของเส้นใยผักตบชวา 3 cm และการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลแทนมวลรวมหยาบ ในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อศึกษาประสิทธิภาพแรงดัดด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วน 0% และ 100% และใช้เวลาบ่มคอนกรีต 28 วัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของเส้นใยผักตบชวาต่อกำลังดัดในคอนกรีต ผลสรุปพบว่าการนำเส้นใยของผักตบชวามาผสมคอนกรีตรับแรงดัดได้ดีกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเส้นใยของผักตบชวา

Abstract

This research aims to investigate the flexural strength of recycled aggregate concrete reinforced with water hyacinth fibers. The fibers were incorporated into the concrete at proportions of 0.5% and 1% by weight of cement, with a fiber length of 3 cm. Recycled coarse aggregates were used to replace natural coarse aggregates at replacement levels of 0% and 100%. The specimens were cured for 28 days to examine the influence of water hyacinth fibers on the flexural strength of the concrete. The results indicate that incorporating water hyacinth fibers enhances the flexural performance of concrete compared to the mix without fibers.

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการนำวัสดุที่เป็นมลพิษทางน้ำและวัสดุเหลือทิ้งนำมาต่อยอดพัฒนาปรับปรุงให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากผักตบชวาพบเห็นได้เป็นจำนวนมากและไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ ผู้จัดทำจึงเล็งเห็นถึงแนวทางการกำจัดผักตบชวามาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในด้านการก่อสร้าง แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มลภาวะจากผักตบชวา

จากการศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับผักตบชวาพบว่าหลาย ๆ วิจัยมีข้อกำหนดและขอบเขตหลายอย่าง เช่น การนำผักตบชวามาทดสอบโดยไม่ได้แยกส่วนเนื้อกับเปลือกและการนำผักตบชวามาทดสอบโดยไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ [1]

การนำคอนกรีตที่ถูกใช้งานแล้วมาใช้ใหม่แทนมวลรวมหยาบไม่เพียงมีผลดีต่อมลภาวะทางอากาศ และใช้เส้นใยผักตบแทนเส้นใยไฟเบอร์ แต่ยังช่วยลดต้นทุนในธุรกิจก่อสร้างจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในงานวิศวกรรมในอนาคตที่องค์กรส่วนใหญ่เริ่มหันมาสนใจนวัตกรรมหรือแนวคิดที่ช่วยลดภาวะโลกร้อน จากผลการทดสอบพบว่าการรับกำลังของคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณวัสดุแทนที่ใช้ [2]

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังดัดของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาการเสริมด้วยเส้นใยผักตบชวาในอัตราส่วนต่างๆ ต่อกำลังดัดของคอนกรีต
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนต่างๆ ของผักตบชวาต่อการนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมกำลังในคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. อัตราส่วนของการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล คือ ร้อยละ 0 และ 100 โดยปริมาตร
2. อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวา คือ ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ



3. ส่วนที่ใช้ในการทำเส้นใยผักตบชวา คือ ส่วนเปลือกและส่วนเนื้อของผักตบชวา

4. เส้นใยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ผ่านการแช่สาร NaOH ที่ 0.75 M

5. ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตซีเมนต์ที่ใช้ คือ ขนาด 3/4 นิ้ว มวลรวมคอนกรีตซีเมนต์ที่ใช้มีกำลังอยู่ในช่วงปานกลาง คือ 20 – 40 MPa

6. ขนาดตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดเป็นคาน $15 \times 15 \times 50$ cm³ ทำการทดสอบที่ 28 วัน

7. การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยตามมาตรฐาน ASTM C188-17 [3], ASTM C127-15 [4], ASTM C128-22 [5], ASTM C136-06 [6] และ ASTM C150-07 [7]

8. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C78 [8]

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการพัฒนากำลังอัดในคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยผักตบชวาและมวลรวมคอนกรีตซีเมนต์

2. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากรายงานนี้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ในทางก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. เป็นการรณรงค์ให้เกิดการนำวัสดุที่เป็นมลพิษทางน้ำหรือขยะเหลือทิ้งกลับมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ส่งผลให้เกิดการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในอนาคต

1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินการ แสดงได้ดังตารางที่ 1

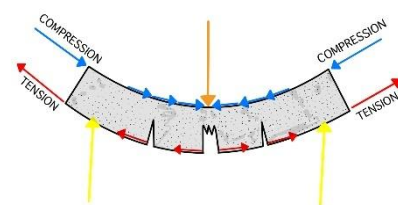
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
1. การศึกษาค้นคว้าและออกแบบส่วนผสม										
2. เตรียมวัสดุต่างๆเพื่อในการทดสอบ										
3. การผสมคอนกรีตและการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต										
4. สรุปละแวกวิเคราะห์ผลการทดลอง										
5. จัดทำรูปเล่มและนำเสนอรายงานผล										

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของส่วนผสมคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักหรืออาจสำคัญที่สุดที่กำหนดคุณภาพและคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวเนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อรูพรุนของคอนกรีตและคอนกรีตที่ดีควรเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นและแน่นหนาที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นจะต้องเตรียมโดยใช้น้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แต่ต้องมีน้ำเพียงพอเพื่อให้แร่ธาตุซีเมนต์มีความชื้นและจัดการได้อย่างเหมาะสม อัตราส่วนที่ต่ำกว่าทำให้มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้นแต่ส่วนผสมอาจทำงานและขึ้นรูปได้ยากขึ้น การทำงานสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารพลาสติกไซเซอร์หรือสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์อัตราส่วนที่สูงขึ้นทำให้ส่วนผสมคอนกรีตไหลลื่นเกินไปส่งผลให้คอนกรีตแข็งตัวมีรูพรุนและมีคุณภาพต่ำ พฤติกรรมของคานต่อปริมาณเหล็กเสริมเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่แตกต่างหากปริมาณเหล็กเสริมมากคานจะรับโมเมนต์ได้มากแต่มีค่าการแอ่นตัวต่ำซึ่งหมายความว่าคานวิบัติในขณะที่แอ่นตัวน้อย เมื่อคานแอ่นตัวน้อยก็จะไม่แสดงรอยร้าวให้เห็นก่อนวิบัติซึ่งจะเป็นการวิบัติอย่างฉับพลันไม่มีรอยร้าวเตือนล่วงหน้า พฤติกรรมแบบนี้เรียกว่าคานวิบัติแบบเปราะหรือภาษาที่วิศวกรโยธาใช้คือการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure) หากคานมีเหล็กเสริมน้อยจะเห็นว่าคานสามารถต้านทานโมเมนต์ได้น้อยแต่มีค่าการแอ่นตัวสูงซึ่งหมายความว่าคานแอ่นตัวมากก่อนจะวิบัติ ในกรณีนี้คานจะแอ่นและเกิดรอยร้าวเตือนให้ผู้อาศัยอพยพหนีได้ก่อน วิศวกรโยธาเรียกว่าการวิบัติแบบนี้ว่าการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปราโมทย์ วีรานุกูล และคณะ [9] ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรออกแบบบล็อกปูพื้นภายนอกอาคารเพื่อลดอุณหภูมิ โดยนำกากกับฟางข้าวซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติ มาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 หินปูน และน้ำ เป็นวัสดุชั้นที่ 1 ในอัตราส่วนต่างๆ ส่วนวัสดุผิวชั้นที่ 2 ใช้ปูนซีเมนต์ขาวชนิดผสมซิลิกา หินเกล็ดสีเหลืองทอง #4 น้ำ มาผลิตเป็นบล็อกปูพื้นสองชั้น และทำการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังอัด ตาม



มาตรฐาน มอก. 827-2531 และทดสอบคุณสมบัติผิวหน้าเทียบกับศิลาแลง, หินทราย, คอนกรีตบล็อกประสาน, หินอ่อนและหินแกรนิต พบว่า บล็อกปูพื้นภายนอกอาคาร มีคุณสมบัติผิวหน้าต่ำกว่าวัสดุปูพื้นอื่นๆ แม้จะกำลังอัดไม่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา และคณะ [10] ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมเส้นใยของผักตบชวา (AAC-WHF) โดยนำเอาเส้นใยของลำต้นผักตบชวามาผสมกับคอนกรีตมวลเบา พบว่าการใช้เส้นใยของผักตบชวาแทนที่ทรายบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0.75 มีส่วนให้ความต้านทานแรงดัด และความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น และมีค่าการดูดซึมน้ำสูง จากผลการทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1505-2541 พบว่าสัดส่วนผสมแทนที่ทรายร้อยละ 0.75 ผ่านเกณฑ์โดยจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ G4 และ ACC-WHF มีคุณสมบัติเป็นวัสดุของอาคารสีเขียว (Green building attributes) จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

3. ระเบียบวิจัย

ระเบียบวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย



เส้นใยผักตบชวาส่วนเนื้อไม่ปรับปรุงคุณภาพ



เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกไม่ปรับปรุงคุณภาพ



เส้นใยผักตบชวาส่วนเนื้อปรับปรุงคุณภาพ



เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ



คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลขนาด 3/4 นิ้ว (RCA)



หินแกรนิต ขนาด 3/4 นิ้ว



ปูนซีเมนต์ไฮบริด



ทราย



โหลเดิมไฮดรอกไซด์



น้ำ

รูปที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตัวอย่างส่วนผสม

HSMNO

(1)

เมื่อ สัญลักษณ์ตัวแรก H คือ ส่วนผสมที่ผสมเส้นใยผักตบชวา; สัญลักษณ์ตัวที่สอง คือ ส่วนของผักตบชวาที่นำมาทำเส้นใยโดยประกอบด้วย S คือ ส่วนเปลือก และ I คือ ส่วนเนื้อ; สัญลักษณ์ตัวที่สาม คือ การปรับปรุงคุณภาพเส้นใยผักตบชวาโดยประกอบด้วย M คือ ตัวอย่างเส้นใยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ และ O คือ ตัวอย่างเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ; สัญลักษณ์ตัวที่สี่ คือ ส่วนของมวลรวมหยาบโดยประกอบด้วย N คือ ส่วนที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบธรรมชาติ และ R คือ ส่วนผสมที่ผสมด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; และสัญลักษณ์สุดท้าย คือ เปอร์เซ็นต์การใส่เส้นใยผักตบชวาในส่วนผสม โดยประกอบด้วย 0 คือ ส่วนผสมที่ใส่เส้นใย 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในขณะที่ 1 คือ ส่วนผสมที่ใส่ผักตบชวา 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

1. ชนิดไม่ปรับปรุงคุณภาพ

1.1 ส่วนเนื้อ ขูดเป็นฝอยด้วยแปรงขัดทองเหลืองใส่ถาดแล้วอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศา 24 ชั่วโมง

1.2 ส่วนเปลือก ขูดเป็นฝอยด้วยแปรงขัดทองเหลืองใส่ถาดแล้วอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศา 24 ชั่วโมง



ขั้นตอน 1.1

ขั้นตอน 1.2



รูปที่ 4 การเตรียมผักตบชวาชนิดไม่ปรับปรุงคุณภาพ



2. ชนิดปรับปรุงคุณภาพ

2.1 ส่วนเนื้อ ขุดเป็นฝอยด้วยแปรงขัดทองเหลืองน้ำไปแชในน้ำผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 3% ของน้ำ 100 ml แชไว้ 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง แล้วจึงนำไปตากแดดด้วย อุณหภูมิ 105 องศา 24 ชั่วโมง

2.2 ส่วนเปลือก ขุดเป็นฝอยด้วยแปรงขัดทองเหลืองน้ำไปแชในน้ำผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 3% ของน้ำ 100 ml แชไว้ 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง แล้วจึงนำไปตากแดดด้วย อุณหภูมิ 105 องศา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 การเตรียมผักตบชวาชนิดปรับปรุงคุณภาพ

3. มวลรวมหยาบ

3.1 มวลรวมหยาบธรรมชาติ นำไปแชน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว

3.2 มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล นำไปแชน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว



รูปที่ 6 การเตรียมมวลรวมหยาบ

4.1 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

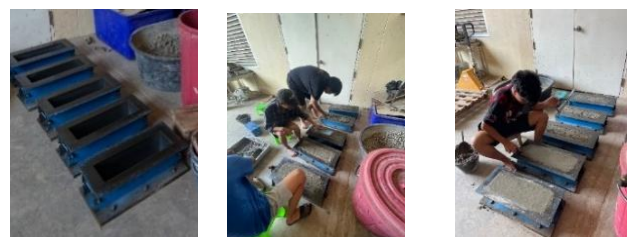
1. นำแบบที่ทำความสะอาดแล้วทามันบริเวณผิวสัมผัสคอนกรีตให้ทั่ว เพื่อป้องกันคอนกรีตติดแบบ
2. นำเครื่องมือทดสอบการยุบตัว เครื่องไม่ปูน และช้อนตัก ผิดพรหมน้ำให้มีความชื้นที่ผิววัสดุ
3. เปิดเครื่องไม่ปูน แล้วเริ่มเทส่วนผสม ทราย, ปูน, เส้นใยผักตบชวาความยาว 3 cm, หิน, มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และน้ำลงในไม่ตามลำดับ
4. เมื่อไม่ปูนผสมจนคอนกรีตเริ่มเป็นเนื้อเดียวกัน
5. ตักคอนกรีตใส่อุปกรณ์ทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งและทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต ค่าการยุบตัวที่ได้ควรอยู่ระหว่าง 5 – 10 cm



รูปที่ 7 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

4.2 การเทคอนกรีตใส่แบบหล่อรูปคาน

1. ทามันบริเวณที่ผิวด้านในแบบหล่อบางๆ
2. ทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อ ตัวอย่างคานรูปทรงขนาด 15x15x50 cm³ จากนั้นใช้เหล็กกระทุ้งคอนกรีต จำนวน 25 ครั้ง ให้สม่ำเสมอทั่วหน้าตัด
3. เทคอนกรีตชั้นที่ 2 ให้กระทุ้งลึกลงไปในชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 cm. เพื่อให้เนื้อคอนกรีตชั้นบนชั้นล่างเป็นเนื้อเดียวกันชั้นที่ 3 ใช้วิธีการเหมือนกับชั้นที่ 2
4. เมื่อกระทุ้งแต่ละชั้นเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ใช้แท่งเหล็กเคาะแบบด้านนอกเบาๆ จำนวน 10 – 15 ครั้ง เพื่อปิดรูที่เกิดจากเหล็กกระทุ้งหรือไล่ฟองอากาศขนาดใหญ่
5. หลังจากกระทุ้งและเคาะชั้นสุดท้ายให้ใช้เหล็กกระทุ้งวางพาดบนขอบแบบรูปทรงกระบอกจากนั้นปาดคอนกรีตส่วนเกินทิ้งไปแล้วทิ้งไว้ประมาณ 15 นาทีเพื่อปาดผิวหน้าให้เรียบ



รูปที่ 8 ขั้นตอนเทคอนกรีตใส่แบบหล่อรูปคาน

6. หลังจากหล่อคอนกรีตลงสู่แบบและตกแต่งผิวหน้าเรียบร้อยแล้วรอกคอนกรีตแข็งตัวแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตไปแชในบ่อที่มีน้ำสะอาดจนครบ 28 วัน



7. เมื่อครบ 28 วันนำตัวอย่างคานคอนกรีตขึ้นจากน้ำแล้วตากให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างคานที่แห้งแล้วมาวัดขนาดและแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันโดยเว้นระยะขอบไม่ต่ำกว่า 1 นิ้ว
8. ชั่งน้ำหนักและนำไปทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 [8]
9. นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการรับแรงดัดของมวลรวมคอนกรีตไร้เซิล



รูปที่ 9 การบ่มคอนกรีต

4.3 การทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต

4.4.1 เครื่องมือและวิธีการทดสอบกำลังดัด

1. การเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์

- 1.1 นำตัวอย่างคานคอนกรีตมาวัดระยะทำเครื่องหมายที่จุดกึ่งกลางของคานหรือจุดที่จะให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนจุดกึ่งกลางคานโดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 45 cm. ทำเครื่องหมายไว้เป็นจุดสำหรับวางบนฐานที่รองรับ
- 1.2 วางคานคอนกรีตไว้บนแท่นรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน
- 1.3 ติดตั้ง Load cell และเซนเซอร์วัดการยืด (Strain gauge หรือ LVDT)
- 1.4 ใช้แม่แรงไฮดรอลิกแบบ SIMPLEX ควบคุมการส่งแรงขึ้นไปยังกระบอกกด

2. การติดตั้งกระบอกกด

- 2.1 ปรับตำแหน่งหัวกดให้ตรงกับ จุดกึ่งกลางของคาน เพื่อให้เกิดการกระจายแรงอย่างเหมาะสม
- 2.2 หัวกดในภาพเป็นแบบมีลักษณะปลายแหลม เพื่อให้แรงกดรวมเป็นจุดเดียวตรงกลาง
- 2.3 คานที่ใช้ทดสอบมักมีการทำเครื่องหมายไว้ที่จุดกลาง และตำแหน่งที่ติดตั้ง

3. การเริ่มกดและบันทึกข้อมูล

- 3.1 ค่อยๆ บีบแม่แรงไฮดรอลิกให้แรงกดเพิ่มขึ้นทีละน้อย
- 3.2 ขณะเดียวกันให้บันทึกค่ากำลัง (Force) และค่าการโก่งตัวของคาน (Deflection) จากเครื่องวัด
- 3.3 สังเกตพฤติกรรมของคาน เช่น การแตกร้าว เสียง หรือการเปลี่ยนรูป

4. การหยุดทดสอบ

- 4.1 หยุดกดเมื่อคานหัก หรือเมื่อแรงถึงค่าที่กำหนด
- 4.2 จดบันทึกค่าสูงสุดของแรงและการโก่งตัวที่เกิดขึ้น
- 4.3 ถอดอุปกรณ์ออก และตรวจสอบรอยร้าวของคาน

จุดสังเกต

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ต้องติดตั้งอย่างแน่นหนา เพื่อความปลอดภัย
2. การกดต้องทำอย่างช้าๆ และต่อเนื่อง เพื่อให้ค่าที่ได้แม่นยำ
3. การอ่านค่าแรงและการโก่งตัวอาจเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (2)$$

เมื่อ

σ = โมดูลัสการแตกร้าว

M = โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้น

C = ระยะห่างจากแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของคานคอนกรีต
หรือมีค่าครึ่งหนึ่งของความลึก (d/2)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีต = $\frac{bd^3}{12}$

b = ความกว้างของคอนกรีต (cm)

d = ความหนาของคอนกรีต (cm)



รูปที่ 10 วิธีการทดสอบกำลังดัด

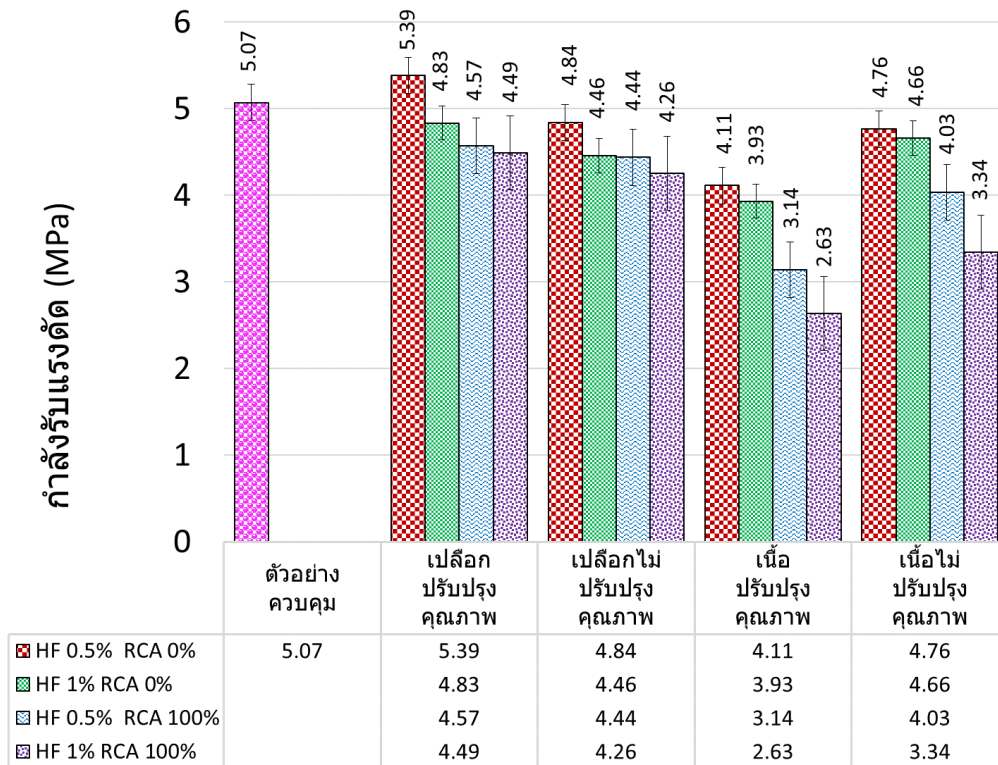
5. ผลการศึกษา

จากการทดสอบพบว่า อัตราส่วนผสมที่ผสมเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกแบบปรับปรุงคุณภาพที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติจะรับแรงดัดได้มากที่สุดและมีความเหนียวมากที่สุด เนื่องจากส่วนผสมมีความเหนียวเมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับสารโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงมีความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่ส่วนเนื้อของเส้นใยผักตบชวาจากกราฟจะสังเกตได้ว่าส่วนเนื้อที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพจะรับแรงดัดได้ดีกว่าส่วนเนื้อแบบปรับปรุงคุณภาพเกิดจากการนำส่วนเนื้อไปผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เนื้อจึงมีความและ เปื่อย จึงรับแรงดัดได้น้อยกว่าส่วนเนื้อแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ ส่วนผสมที่ผสมมวลรวมหยาบธรรมชาติจะสามารถรับกำลังแรงดัดได้ดีกว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลเนื่องจากโครงสร้างภายในมวลรวมหยาบทั้งสองต่างกันอย่างชัดเจน

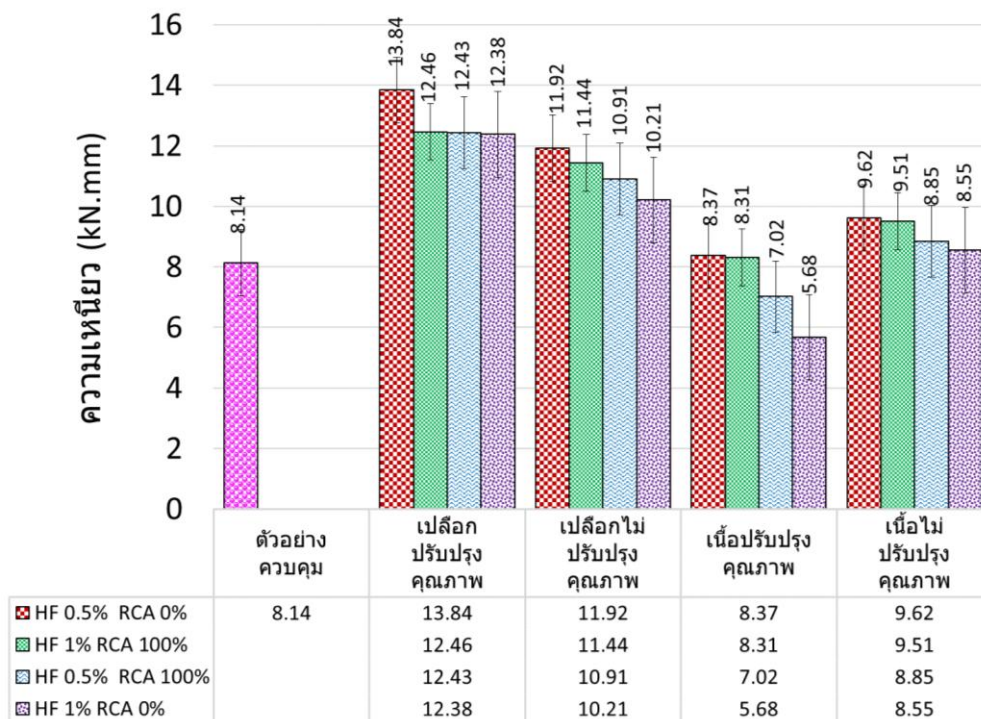


ความสัมพันธ์ระหว่างแรง (Force) และการกระจัด (Displacement)

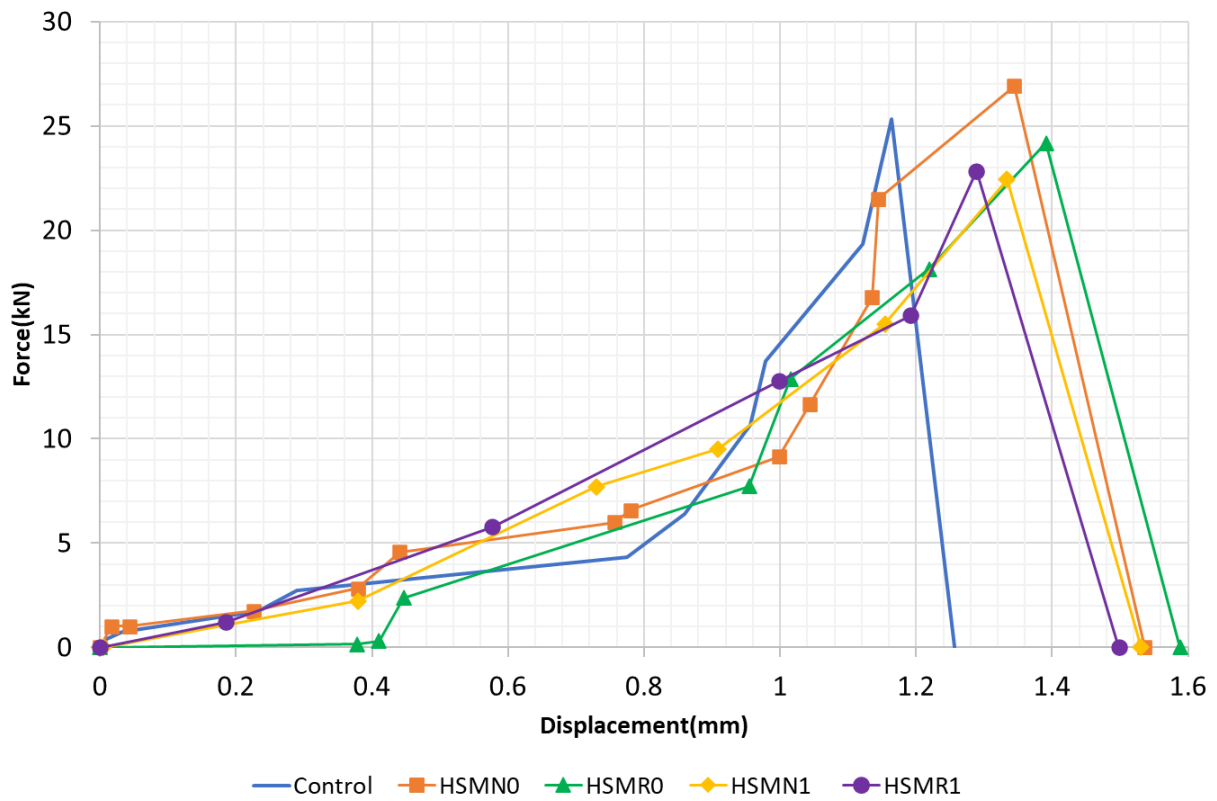
ภาคผนวก ข1 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด ณ 28 วัน และ กราฟ



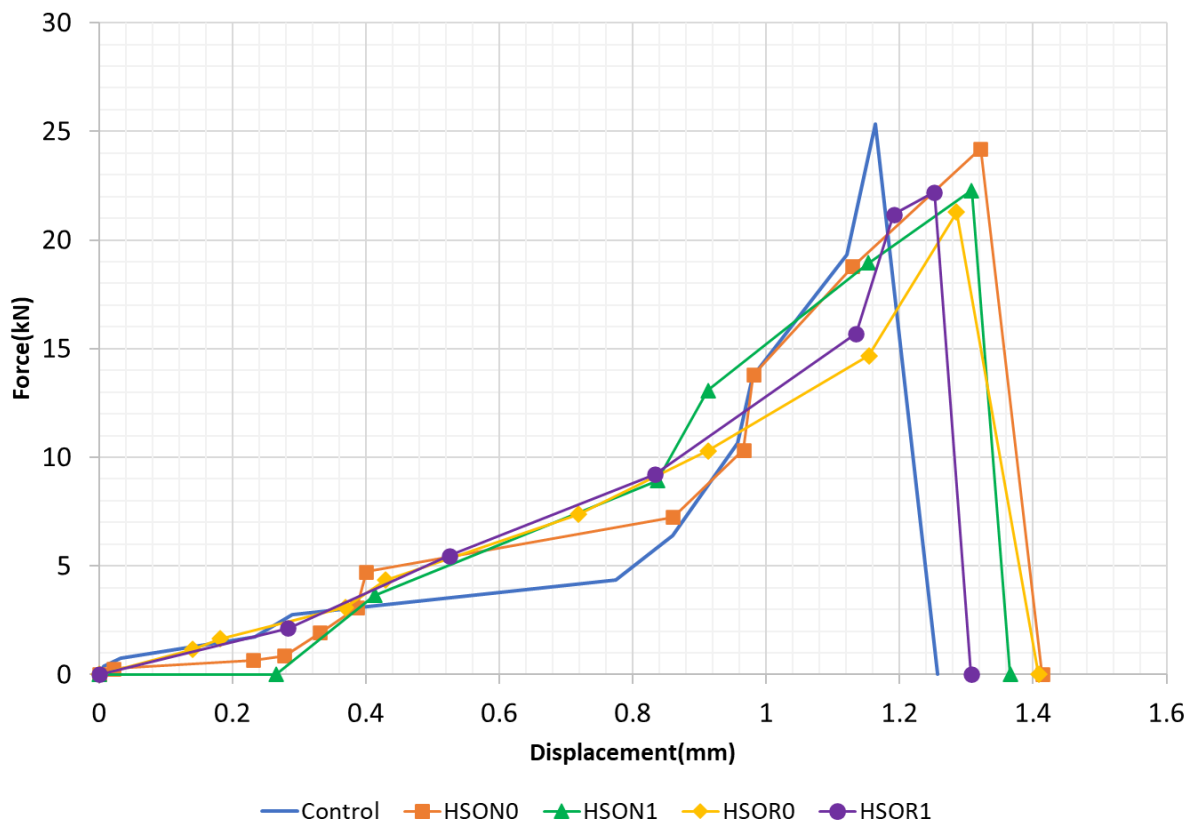
รูปที่ 11 ผลการทดสอบกําลังดัดที่ 28 วัน



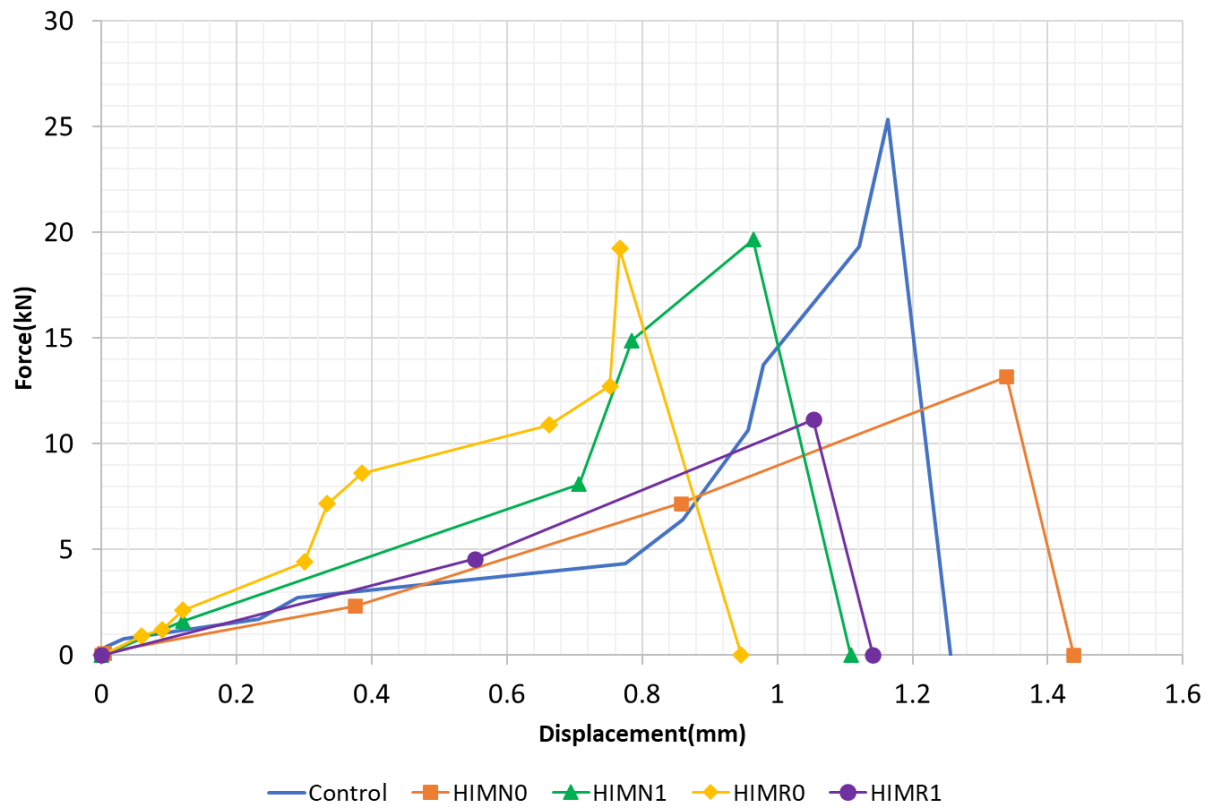
รูปที่ 12 ผลการทดสอบความเหนียวที่ 28 วัน



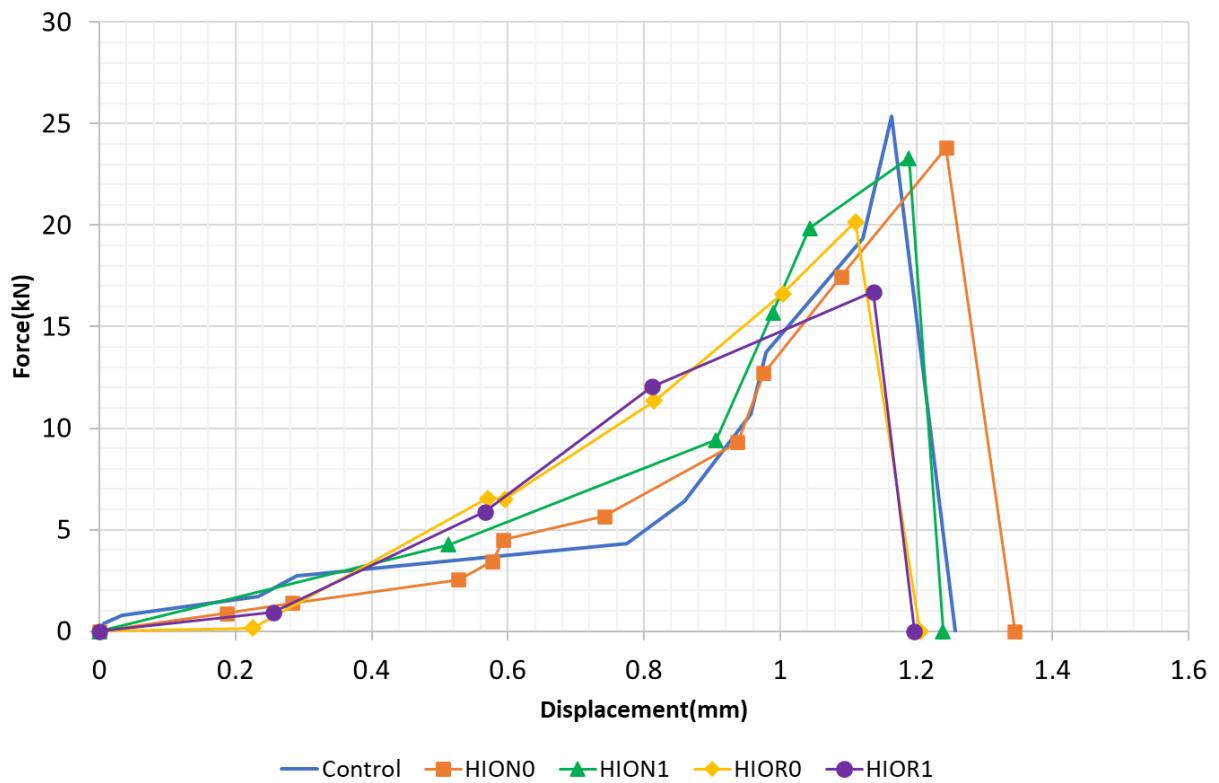
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด ของเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด ของเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกไม่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด ของเส้นใยผักตบชวาส่วนเนื้อปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด ของเส้นใยผักตบชวาส่วนเนื้อไม่ปรับปรุงคุณภาพ



6. วิจารณ์ผลการศึกษา

การใช้เส้นใยผักตบชวาพบว่าการใช้เส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ ที่สัดส่วน 0.5% ช่วยเพิ่มกำลังดัดของคอนกรีตได้จริง แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุธรรมชาติที่มีมากในท้องถิ่นอย่างไรก็ตาม หากเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไป อาจส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ เกิดการรวมตัวเป็นก้อน (Balling effect) และทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) การแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 100% ส่งผลให้กำลังดัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี เนื่องจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล มีความพรุนและดูดซึมน้ำมากกว่าแต่การผสมเส้นใยผักตบชวาช่วยชดเชยความอ่อนแอของมวลรวมรีไซเคิล ได้บางส่วน ซึ่งเป็นแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ พฤติกรรมการแตกร้าวและความเหนียวของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยมีพฤติกรรมการแตกร้าวที่ช้าลงและแสดงลักษณะเหนียวตัวก่อนแตกหัก ช่วยลดการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อความปลอดภัยของโครงสร้างแต่ยังควรศึกษาผลกระทบในระยะยาว เช่น การทนทานต่อการกัดกร่อนและการเสื่อมสภาพ

7. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการเสริมเส้นใยผักตบชวาในคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด ณ อายุ 28 วัน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- 1.การเสริมเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ 0.5% ช่วยเพิ่มค่ากำลังดัดของคอนกรีต
- 2.การใช้มวลรวมรีไซเคิล (RCA) แทนมวลรวมหยาบธรรมชาติในสัดส่วน 100% ส่งผลต่อค่ากำลังดัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ แต่เมื่อเสริมด้วยเส้นใยผักตบชวาสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้บางส่วน
- 3.เส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ผลลัพธ์ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยช่วยเพิ่มความเหนียว ลดการวิบัติแบบเปราะ และส่งเสริมพฤติกรรมเหนียวตัวก่อนแตกหัก
- 4.คอนกรีตที่ผสมเส้นใยผักตบชวาส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพ มีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าคอนกรีตปกติ สามารถดูดซับพลังงานก่อนแตกหักได้มากกว่า
- 5.การใช้เส้นใยผักตบชวาในคอนกรีตไม่เพียงเพิ่มสมบัติเชิงกล แต่ยังเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในงานก่อสร้าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิชาติ จิรัฐติยางกูว. 2532. คอนกรีตเสริมผักตบชวา. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] กุลวดี ปิตติวิทยากุลโสภาคย์ วิศิษฎ์ศักดิ์ และ ญักรีย์ ศรีดารานนท์. 2567. การพัฒนาแผนคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมจากผักตบชวา. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [3] ASTM C188-17, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, USA, 2023.

[4] ASTM C127- 15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, USA, 2004.

[5] ASTM C128- 22, Standard Test Method for Relative (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, USA, 20203.

[6] ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

[7] ASTM C150- 07, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, USA, 2012.

[8] ASTM C78 , Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-point Loading), ASTM International, USA, 2010.

[9] ปราโมทย์ วีรานุกูล, จักรวัฒน์ เรืองแรงกุล, สัจจะชาญ พรหมะลิ, และ ประชุม คำพุฒ. 2554. การพัฒนาวัสดุอาคารจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อการประหยัดพลังงาน และลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[10] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์, และโยธิน อึ้งกุล. (2555). การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำผสมเส้นใยของผักตบชวา. กรุงเทพมหานคร : มหาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาคผนวก ก1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

No.	Mix symbol	C (kg)	W (kg)	S (kg)	NCA (kg)	RCA (kg)	HF (kg)	V (m ³)	จำนวน ตัวอย่าง
1	Control	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.00	0.01	5
2	HSMNO	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.11	0.01	5
3	HSMN1	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.22	0.01	5
4	HSMR0	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.11	0.01	5
5	HSMR1	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.22	0.01	5
6	HSNO	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.11	0.01	5
7	HSNO1	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.22	0.01	5
8	HSOR0	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.11	0.01	5
9	HSOR1	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.22	0.01	5
10	HIMNO	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.11	0.01	5
11	HIMN1	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.22	0.01	5
12	HIMR0	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.11	0.01	5
13	HIMR1	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.22	0.01	5
14	HION0	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.11	0.01	5
15	HION1	21.67	13	56.61	58.95	0.00	0.22	0.01	5
16	HIOR0	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.11	0.01	5
17	HIOR1	21.67	13	56.61	0.00	54.28	0.22	0.01	5

หมายเหตุ C = ปูนซีเมนต์ไฮบริด , W = น้ำ , S = ทราย , NCA = คอนกรีตมวลรวมหยาบ , RCA = คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล , V = ปริมาตร



ภาคผนวก ข1 ตารางค่าเฉลี่ยกำลังอัด ณ 28 วัน

ลำดับ	Mix Symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ลึก	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความ หนาแน่น	กำลังรับ แรงอัด	กำลังรับ แรงอัด เฉลี่ย	ค่าการ ยุบตัว
		(kg)	(cm)			(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
1	Control	27.15	15.20	15.10	50.00	760.00	0.01	0.31	5.03	5.07	8.50
		27.19	14.97	14.98	50.00	748.50	0.01	0.30	5.18		
		26.92	15.10	15.12	50.00	755.00	0.01	0.31	5.00		
2	HSMNO	26.50	15.12	15.05	50.00	762.50	0.01	0.30	5.47	5.39	6.20
		26.80	14.98	15.14	50.00	749.00	0.01	0.30	5.51		
		27.00	15.10	14.92	50.00	755.00	0.01	0.30	5.18		
3	HSMN1	26.48	15.21	15.13	50.00	756.00	0.01	0.30	4.12	3.72	9.20
		26.29	15.09	14.97	50.00	754.50	0.01	0.30	4.44		
		26.47	14.99	14.95	50.00	749.50	0.01	0.30	2.61		
4	HSMR0	25.63	14.98	15.11	50.00	749.00	0.01	0.29	4.99	4.83	7.80
		25.77	15.23	15.16	50.00	761.50	0.01	0.30	4.90		
		25.80	15.17	15.14	50.00	785.50	0.01	0.30	4.61		
5	HSMR1	25.34	15.20	14.92	50.00	760.00	0.01	0.29	4.67	4.57	9.00
		24.66	14.97	14.99	50.00	748.50	0.01	0.28	4.29		
		25.04	15.16	15.17	50.00	758.00	0.01	0.29	4.74		
6	HSO00	27.15	15.12	15.14	50.00	756.00	0.01	0.31	4.15	4.84	6.10
		26.92	14.89	15.16	50.00	744.50	0.01	0.30	4.83		
		27.39	14.95	14.99	50.00	747.50	0.01	0.31	5.54		
7	HSO01	26.33	15.17	15.11	50.00	758.50	0.01	0.30	4.13	4.46	6.30
		26.25	15.09	15.00	50.00	754.50	0.01	0.30	4.68		
		26.35	15.05	15.12	50.00	752.50	0.01	0.30	4.56		
8	HSO00	25.82	14.98	14.98	50.00	749.00	0.01	0.29	4.07	4.26	8.00
		25.86	14.87	15.09	50.00	743.50	0.01	0.29	4.43		
		25.61	15.17	15.11	50.00	758.50	0.01	0.29	4.27		
9	HSO01	25.50	15.19	14.98	50.00	759.50	0.01	0.29	4.26	4.44	6.70
		25.49	15.20	15.11	50.00	760.00	0.01	0.29	4.50		
		25.47	15.10	14.92	50.00	755.00	0.01	0.29	4.56		
10	HIMNO	26.33	15.12	14.96	50.00	756.00	0.01	0.30	2.55	2.63	6.90
		26.45	14.89	15.14	50.00	744.50	0.01	0.30	3.10		
		26.26	14.92	15.17	50.00	746.00	0.01	0.30	2.25		



ภาคผนวก ข1(ต่อ) ตารางค่าเฉลี่ยกำลังอัด ณ 28 วัน

ลำดับ	Mix Symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ลึก	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความ หนาแน่น	กำลังรับ แรงอัด	กำลังรับ แรงดัด เฉื่อย	ค่าการ ยุบตัว
		(kg)	(cm)			(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
11	HIMN1	26.06	15.10	15.12	50.00	755.00	0.01	0.30	3.04	3.93	7.20
		26.14	15.06	15.16	50.00	753.00	0.01	0.30	4.38		
		26.22	15.07	15.13	50.00	753.50	0.01	0.30	4.38		
12	HIMR0	25.97	15.00	14.96	50.00	750.00	0.01	0.29	4.19	4.11	7.50
		26.08	14.96	14.95	50.00	748.00	0.01	0.29	4.19		
		26.06	14.99	15.14	50.00	749.50	0.01	0.30	3.95		
13	HIMR1	25.32	15.09	15.00	50.00	754.50	0.01	0.29	2.86	3.14	5.80
		25.38	15.05	15.11	50.00	752.50	0.01	0.29	2.98		
		25.23	14.97	15.12	50.00	748.50	0.01	0.29	3.59		
14	HION0	26.93	15.11	14.95	50.00	755.50	0.01	0.30	4.96	4.76	6.00
		26.91	14.87	14.99	50.00	743.50	0.01	0.30	4.49		
		26.94	15.20	15.10	50.00	760.00	0.01	0.31	4.84		
15	HION1	26.16	14.83	15.14	50.00	746.50	0.01	0.30	4.56	4.66	8.00
		26.17	15.14	15.16	50.00	757.00	0.01	0.30	4.74		
		26.24	14.98	14.98	50.00	749.00	0.01	0.29	4.68		
16	HIOR0	25.39	14.86	14.95	50.00	743.00	0.01	0.28	3.95	4.30	6.40
		25.52	15.09	15.15	50.00	754.50	0.01	0.29	3.40		
		25.50	15.03	15.07	50.00	751.50	0.01	0.29	4.74		
17	HIOR1	25.07	14.87	15.09	50.00	743.50	0.01	0.28	4.13	3.34	6.20
		25.19	15.15	15.00	50.00	757.50	0.01	0.29	3.04		
		25.16	14.96	14.96	50.00	748.00	0.01	0.28	2.86		



การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา

Testing on the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete Incorporated with Water Hyacinth Fibers

นายธีรภัทร พุทธิมา^{1*} นายธนกร พงศ์ธาดาท² นายธนโชติ สังข์วงศ์³ นายพิทวัส ปาระมี⁴ และ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง⁵

^{1,2,3,4}คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101924@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่ผสมเส้นใยผักตบชวา โดยผักตบชวาเป็นวัชพืชน้ำที่สร้างปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งการก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ลดประสิทธิภาพระบบชลประทาน ขัดขวางการคมนาคมทางน้ำ และส่งผลกระทบต่อสมดุลระบบนิเวศ การนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นวัสดุผสมเสริมจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาดังกล่าว ในการทดลองนี้ได้ใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลแทนมวลรวมหยาบธรรมชาติในปริมาณ 0% และ 100% โดยปริมาตร และ ผสมเส้นใยผักตบชวาในปริมาณ 0.5% และ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยผ่านการปรับปรุงคุณภาพเส้นใยผักตบชวากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.75 M ผลการทดสอบพบว่า การผสมเส้นใยผักตบชวาทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณและชนิดของเส้นใย อย่างไรก็ตาม เส้นใยผักตบชวามีส่วนช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวในเนื้อคอนกรีต แสดงให้เห็นทั้งข้อจำกัดและศักยภาพในการใช้เส้นใยผักตบชวาเป็นวัสดุผสมเสริมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาคอนกรีตอย่างยั่งยืน

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength of recycled aggregate concrete incorporating water hyacinth fibers. Water hyacinth is an aquatic weed that causes significant environmental problems, including water pollution, reduced irrigation efficiency, obstruction of waterway transportation, and disruption of ecological balance. Utilizing water hyacinth fibers as an additive material offers a potential approach to mitigating these issues. In this study, recycled coarse aggregates were used to replace natural coarse aggregates

at 0% and 100% by volume, while water hyacinth fibers were incorporated at 0.5% and 1% by weight of cement. The fibers were treated with a 0.75 M sodium hydroxide solution to enhance their quality. The test results revealed that the addition of water hyacinth fibers reduced the compressive strength of concrete depending on the type and content of the fibers. However, the fibers contributed to improved bonding within the concrete matrix, indicating both the limitations and potential of water hyacinth fibers as an eco-friendly supplementary material for sustainable concrete development.

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากผักตบชวาก่อให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวข้องทางด้านมลพิษทางน้ำ ด้านการชลประทาน ด้านคมนาคมทางน้ำ และระบบนิเวศดังแสดงในรูปที่ 1 จึงเห็นว่าผักตบชวาสามารถนำมาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติมในคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล ซึ่งช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม [1]



รูปที่ 1 ปัญหาจากผักตบชวา

การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากเศษวัสดุก่อสร้างเก่า เช่น เศษคอนกรีตที่ทุบจากสิ่งก่อสร้างเก่า หรือ ก้อนตัวอย่าง



คอนกรีตที่เลือกจากการทดสอบ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดการใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลช่วยประหยัดต้นทุนและลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ [2] จึงเป็นที่มาของการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น อุณหภูมิสูงหรือความชื้นสูง จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาและ ปรับปรุงการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลให้เหมาะสมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีต รีไซเคิล ต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยผักตบชวาที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนเปลือกและส่วนเนื้อของผักตบชวาที่ใช้นำมาเป็นเส้นใยเสริมกำลังต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีต รีไซเคิลร้อยละ 0 และ 100 โดยปริมาตร ตามลำดับ
2. อัตราส่วนการใช้เส้นใยผักตบชวาร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตามลำดับ
3. อัตราส่วนการใช้ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.75 M
4. ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลใช้ขนาด 3/4 นิ้ว
5. ตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 15x30 cm² ทำการทดสอบที่ 7 และ 28 วัน
6. ผักตบชวาได้จากอ่างเก็บน้ำในมหาวิทยาลัยทางด้านประตู ศรีโคมคา
7. มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีกำลังอัดอยู่ในช่วงปานกลาง 20-40 MPa
8. การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยตามมาตรฐาน ASTM C188-17 [3], ASTM C127-15 [4], ASTM C128-22 [5] และ ASTM C136-06 [6]
9. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-23 [7]

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
2. ทราบถึงประสิทธิภาพอัตราส่วนการใช้เส้นใยผักตบชวาต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

3. ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้ไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.75 M เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผักตบชวา ต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เป็นการรณรงค์การกำจัดมลพิษทางน้ำและระบบนิเวศ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในอนาคต

1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานโครงการวิจัยสามารถแสดงได้ดัง

ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1.ศึกษาค้นคว้าและออกแบบส่วนผสม								
2.เตรียมวัสดุต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดสอบ								
3.ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวา								
4.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง								
5.จัดทำรูปเล่มและนำเสนอรายงานผล								

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีกำลังอัดหมายถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อแรงอัด โดยในกรณีของคอนกรีต กำลังอัดถือเป็นตัวชี้วัดสมบัติเชิงกลที่สำคัญของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งกำหนดจากความสามารถของคอนกรีตในการรับแรงในแนวดิ่งจนกระทั่งเกิดการแตกหักหรือเสียรูปถาวร ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกระบวนการไฮเดรชันที่ส่งผลต่อการแข็งตัวและพัฒนาากำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ การบ่มคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น การควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตอายุของคอนกรีตก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วง 28 วันแรก ซึ่งเป็นระยะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป [8] อีกทั้งชนิดของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมก็มีผลโดยตรงต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต มวลรวมธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่แตกต่างกัน ส่งผล



ต่อประสิทธิภาพของคอนกรีตในการรับแรงอัด การทดสอบกำลังอัดนิยมทำโดยการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์หรือทรงกระบอก ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและงานก่อสร้าง เพื่อประเมินสมบัติเชิงกลและความสามารถในการต้านทานแรงอัดของคอนกรีต [2]

3. ระเบียบการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ทราย



หินขนาด 3/4 นิ้ว



ผักตบชวา



มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลขนาด 3/4 นิ้ว

รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

จากการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 โดยอาศัยมาตรฐาน ASTM C188-17 [3], ASTM C127-15 [4], ASTM C128-22 [5] และ ASTM C136-06 [6]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

คุณสมบัติ	C	S	NCA	RCA	HF
ความถ่วงจำเพาะ (SG)	3.15	2.59	2.69	2.46	0.1067
การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.72	0.88	6.51	5.425
ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)	1,400	2,579	2,688	2,453	0.46
ดัชนีความละเอียด (FM)	-	2.8	-	-	-

หมายเหตุ: C คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์; S คือ ทราย NCA คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ; RCA คือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; HF คือ เส้นผักตบชวา

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนเตรียมเส้นใยผักตบชวาแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ

1. เก็บผักตบชวา
2. นำผักตบชวาไปล้างน้ำให้สะอาด
3. ปั่นลอกเปลือกผักตบชวาทิ้ง เพื่อแยกส่วนที่ใช้ในการทดลอง
4. ชูดผักตบชวาให้เป็นเส้น
5. นำผักตบชวาที่ชูดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 115 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ตัดเส้นใยผักตบชวาที่อบแล้วให้มีความยาว 3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



ส่วนเนื้อของผักตบชวา



ส่วนเปลือกของผักตบชวา



3.2.3 การทดสอบกำลังอัด

1. เตรียมส่วนคอนกรีตตามอัตราส่วนในตารางที่ 3 แล้ว
นำมาผสมในเครื่องโม้ ดังแสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 3 การเตรียมเส้นใยผักตบชวาแบบไม่ปรับปรุง
คุณภาพ

3.2.2 ขั้นตอนเตรียมเส้นใยผักตบชวาแบบปรับปรุงคุณภาพ

1. นำเส้นใยผักตบชวาไปแช่น้ำผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่ความเข้มข้น 0.75 M เป็นเวลา 30 นาที
2. เมื่อแช่ครบตามเวลาแล้วนำเส้นใยผักตบชวาไปล้างน้ำ 5
รอบ
3. นำเส้นใยผักตบชวาไปอบที่อุณหภูมิ 115 ± 5 องศา
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเตรียมเส้นใยผักตบชวาแบบปรับปรุง
คุณภาพ



รูปที่ 5 การผสมคอนกรีตโดยเครื่องโม้

2. ทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump test) ตาม
มาตรฐาน ASTM C143-78 [9] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงขั้นตอนการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต



3. ทาน้ำมันเคลือบแบบและนำคอนกรีตเข้าแบบโดยแบ่งเป็น 3 ชั้นแต่ละชั้นใช้แท่งเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง แล้วใช้ค้อนยางทุบรอบ ๆ แบบเพื่อให้ช่องว่างน้อยที่สุด แล้วทำการรื้อแบบเพื่อรักษาความชื้น แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงขั้นตอนการนำคอนกรีตเข้าแบบ

4. เมื่อทิ้งไว้ในแบบครบ 24 ชั่วโมง ให้นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำหนักและวัดความกว้างและความยาวก่อนบ่มแล้วจึงนำไปบ่มในบ่อบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงการบ่มคอนกรีต

5. เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำหนักหลังบ่มและวัดความกว้างและความยาวของตัวอย่างคอนกรีตแล้วจึงนำไปทดสอบแบบไม่ทำลายโดยเครื่อง Ultra-sonic ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตแบบไม่ทำลาย

6. นำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังอัดที่เครื่อง (Universal Testing Machine: UTM) ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงการทดสอบกำลังอัด

7 บันทึกข้อมูลเพื่อจัดทำรายงาน

ส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใย ผักตบชวาในโครงการนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3 โดยสัญลักษณ์ส่วนผสมสามารถนิยามได้ดังนี้

HSMNO

(1)

เมื่อสัญลักษณ์ตัวแรก คือ ส่วนผสมเส้นใยผักตบชวา; สัญลักษณ์ตัวสอง คือ ส่วนของผักตบชวาที่นำมาทำเส้นใยโดยประกอบด้วย S คือ ส่วนเปลือก และ I คือ ส่วนเนื้อ; สัญลักษณ์ตัวสาม คือ การปรับปรุงคุณภาพเส้นใยผักตบชวา โดยประกอบด้วย M คือ ตัวอย่างเส้นใยที่ปรับปรุงคุณภาพ และ O คือ ตัวอย่างเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ; สัญลักษณ์ตัวสี่ คือ ส่วนผสมมวลรวมหยาบ โดยประกอบด้วย N คือ ส่วนผสมที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบธรรมชาติ และ R คือ ส่วนผสมที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบคอนกรีต รีไซเคิล; และ สัญลักษณ์สุดท้าย คือ เปอร์เซ็นต์การใส่ผักตบชวาในส่วนผสม โดยประกอบด้วย 0 คือ ส่วนผสมที่ไม่ใส่เส้นใย 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในขณะที่ 1 คือ ส่วนผสมที่ใส่เส้นใย 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

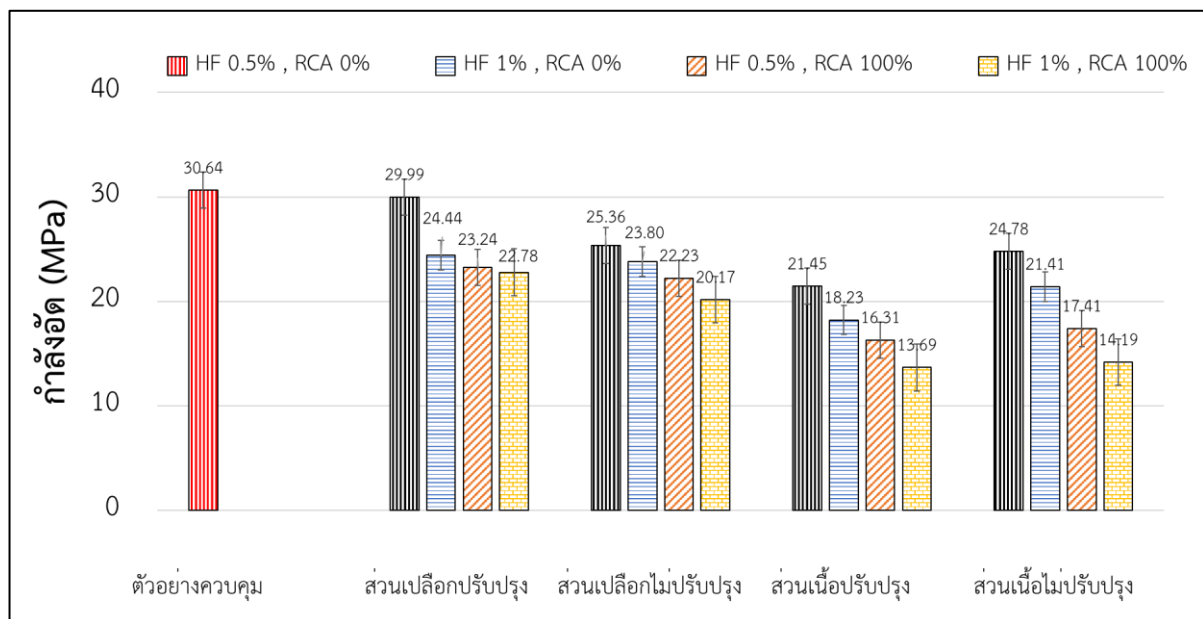


ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล

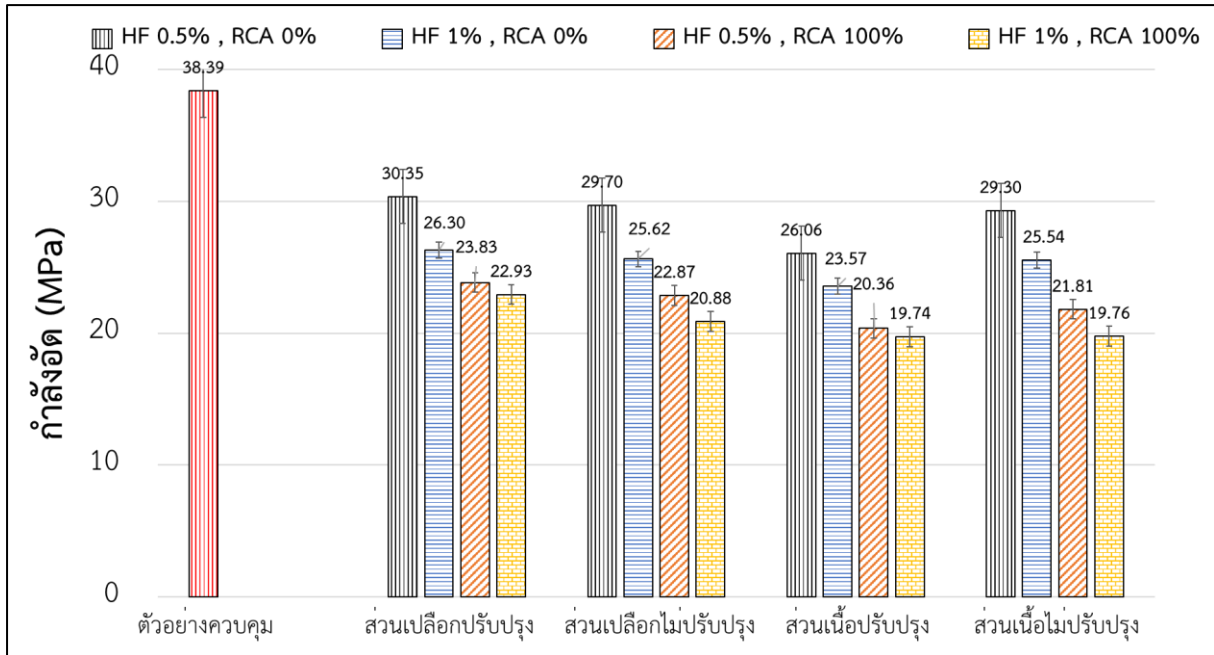
NO.	Mix symbol	C(kg/m ³)	W(kg/m ³)	S(kg/m ³)	NCA(kg/m ³)	RCA(kg/m ³)	HF(kg/m ³)
1	Control	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.00
2	HSMN0	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.10
3	HSMN1	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.20
4	HSMR0	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.10
5	HSMR1	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.20
6	HSN0	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.10
7	HSN1	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.20
8	HSOR0	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.10
9	HSOR1	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.20
10	HIMN0	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.10
11	HIMN1	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.20
12	HIMR0	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.10
13	HIMR1	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.20
14	HION0	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.10
15	HION1	20.00	12.00	52.26	54.41	0.00	0.20
16	HIOR0	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.10
17	HIOR1	20.00	12.00	52.26	0.00	50.10	0.20

หมายเหตุ: C คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์; S คือ ทราย NCA คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ; RCA คือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; HF คือ เส้นใยเหล็ก

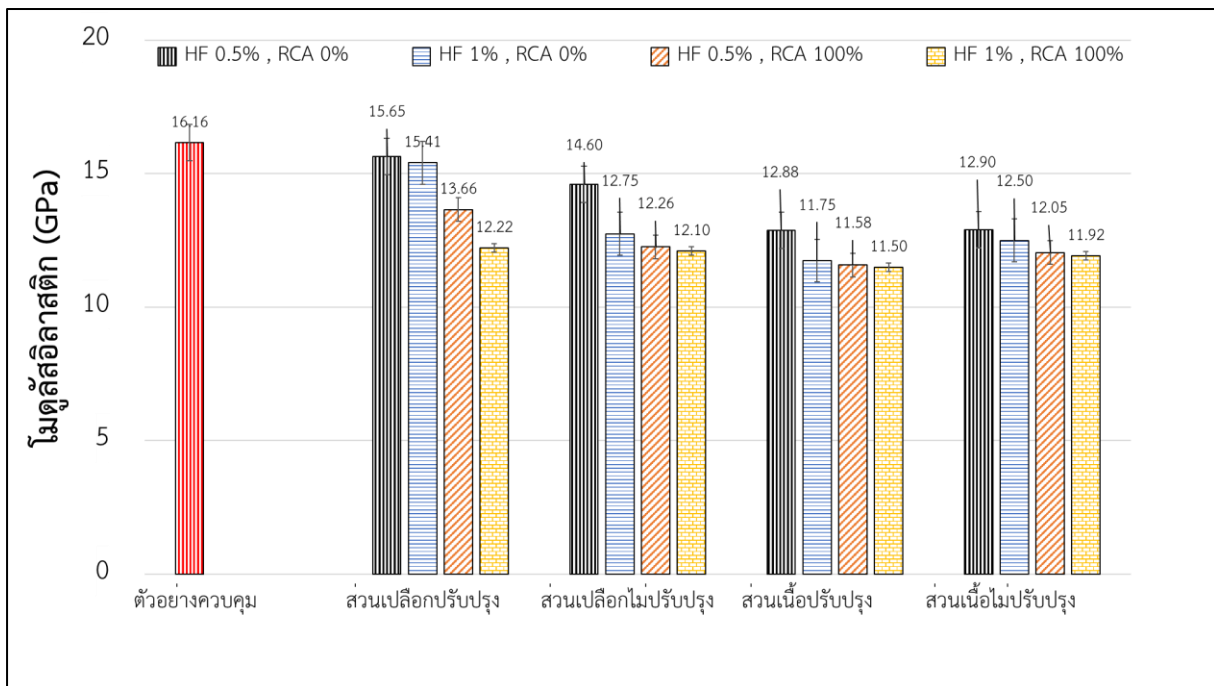
ผลการทดสอบ



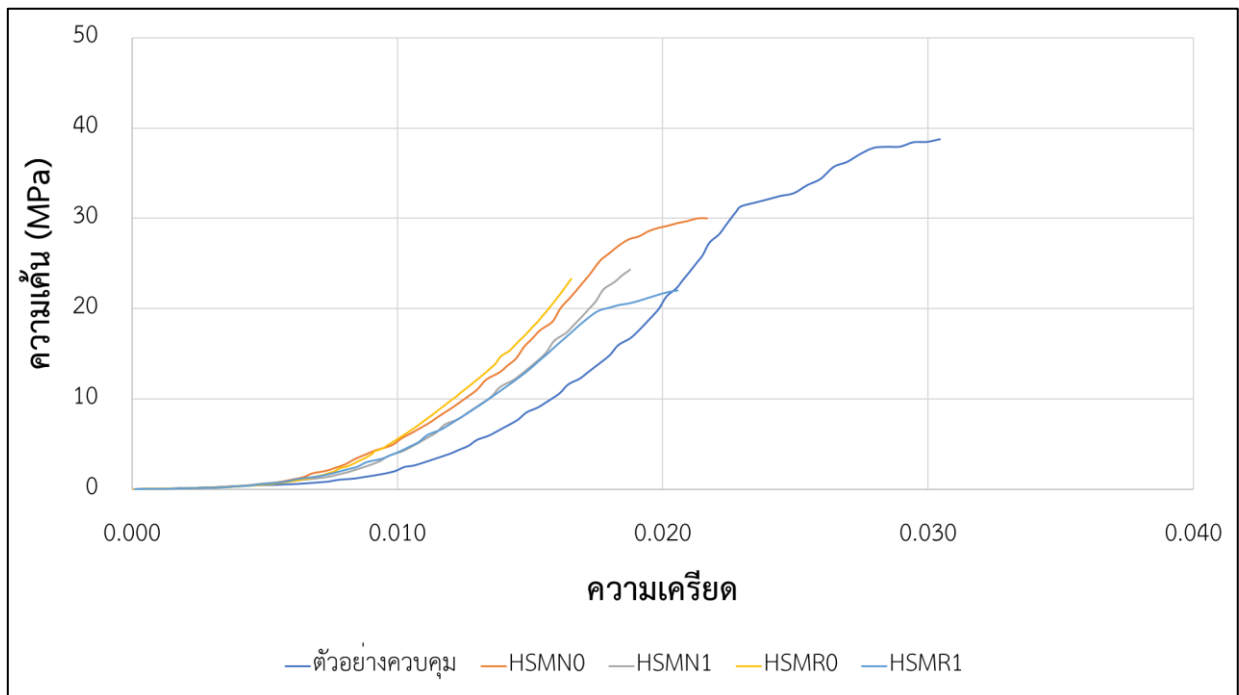
รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดที่ 7 วัน



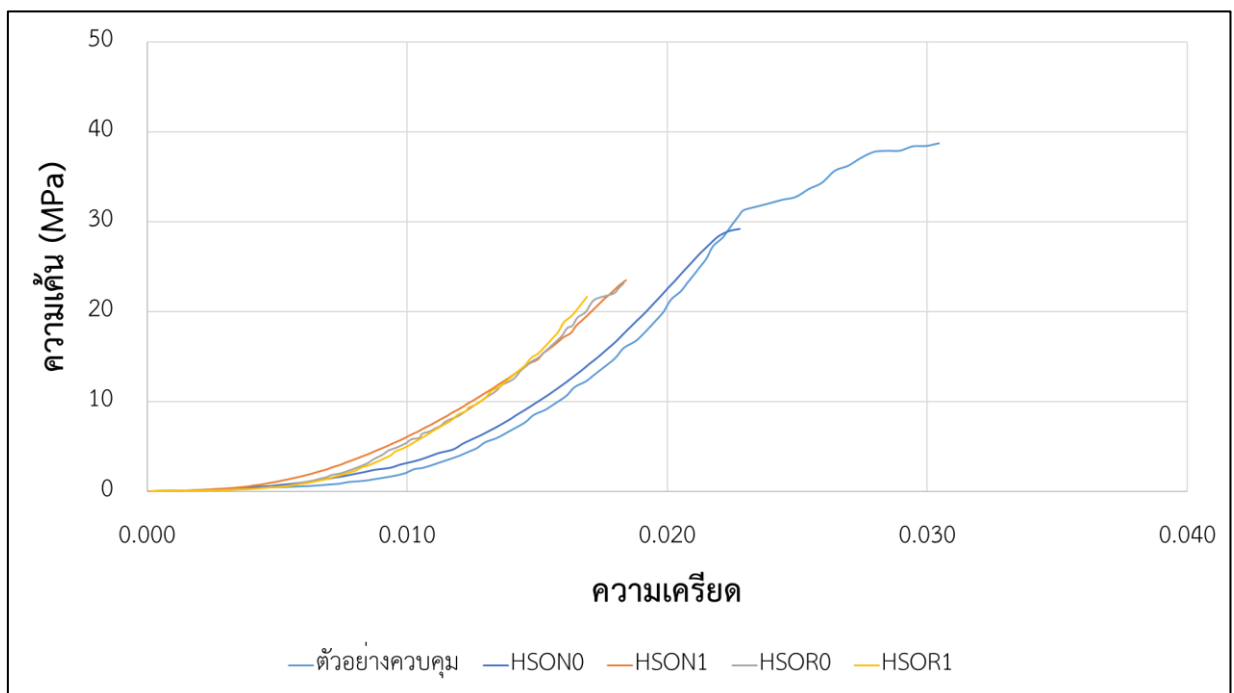
รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดที่ 28 วัน



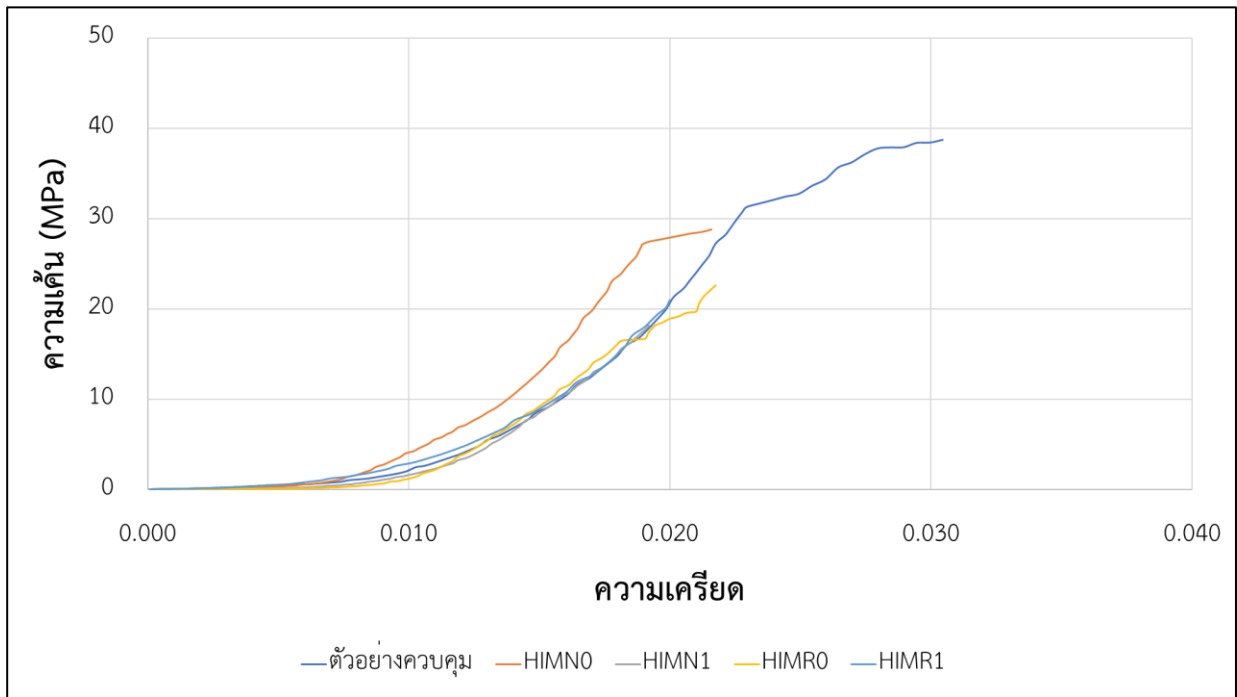
รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ 28 วัน (จากการทดสอบ Ultra sonic)



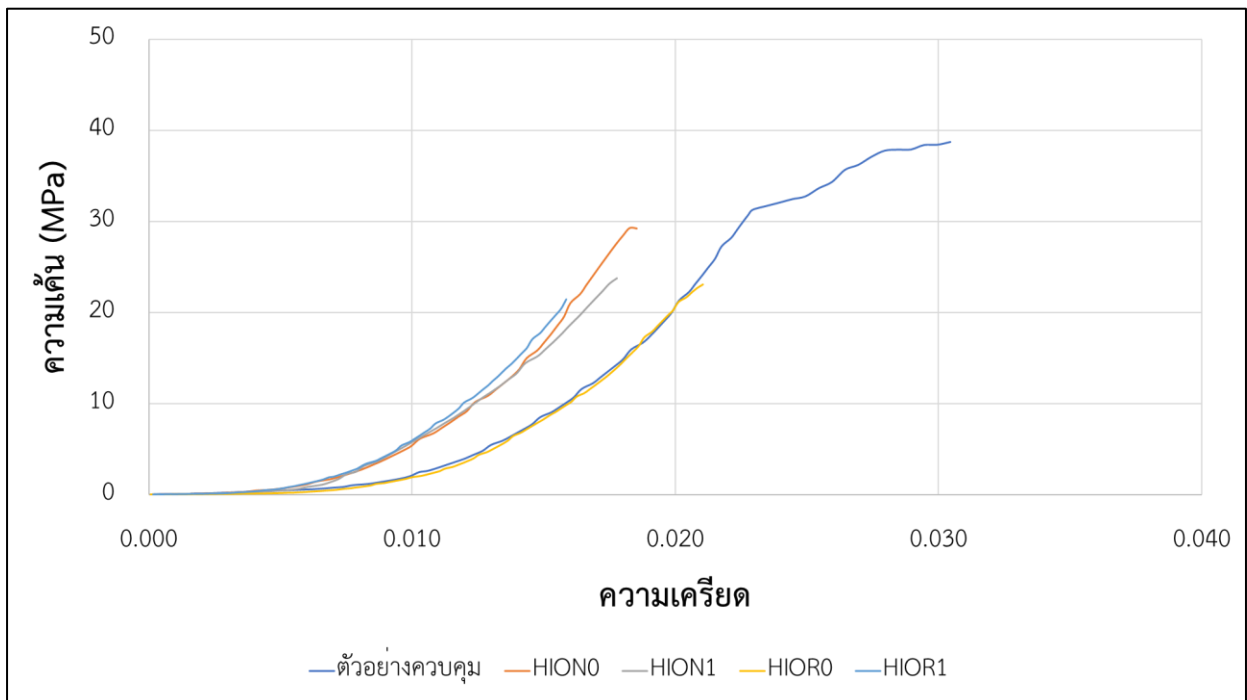
รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และ ความเครียด ตัวอย่างการทดสอบ
ส่วนเปลือกปรับปรุงคุณภาพที่ 28 วัน



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และ ความเครียด ตัวอย่างการทดสอบส่วนเปลือกไม่ปรับปรุง
คุณภาพที่ 28 วัน



รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ตัวอย่างการทดสอบ
ส่วนเนื้อปรับปรุงคุณภาพที่ 28 วัน



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ตัวอย่างการทดสอบ
ส่วนเนื้อไม่ปรับปรุงคุณภาพที่ 28 วัน



ตารางที่ 4 แสดงกำลังอัดเฉลี่ยและโมดูลัสยืดหยุ่น

ตัวอย่าง	กำลังเฉลี่ย (MPa)		โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa) จากการทดสอบ Ultra-sonic
	7 วัน	28 วัน	28 วัน
Control	30.64	38.39	16.16
HSMN0	29.99	30.35	15.65
HSMN1	24.44	26.30	15.41
HSMR0	23.24	23.83	13.66
HSMR1	22.78	22.93	12.22
HSON0	25.36	29.70	14.60
HSON1	23.80	25.62	12.75
HSOR0	22.23	22.87	12.26
HSOR1	20.17	20.88	12.10
HIMN0	21.45	26.06	12.88
HIMN1	18.23	23.57	11.75
HIMR0	16.31	20.36	11.58
HIMR1	13.69	19.74	11.50
HION0	24.78	29.30	12.90
HION1	21.41	25.54	12.50
HIOR0	17.41	21.81	12.05
HIOR1	14.19	19.76	11.92

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยผักตบชวาส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต การใช้เส้นใยผักตบชวา ส่วนปรับปรุงคุณภาพในอัตราส่วนที่ 0.5% และ 1% ส่งผลต่อกำลังอัดสูงสุดซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าในส่วนเปลือกแบบปรับปรุงคุณภาพจากตัวอย่าง HSMN0 (ส่วนผสม HF 0.5%, RCA 0%) ให้ผลค่ากำลังอัดที่สูงกว่าส่วนเปลือกแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ จากตัวอย่าง HSON0 (ส่วนผสม HF 0.5%, RCA 0%) ทั้งในวันที่ 7 และ 28 ซึ่งกำลังอัดใน 7 วันจะต่างกันอยู่ที่ 16.72% และ กำลังอัดใน 28 วัน จะต่างกันอยู่ที่ 2.17% ดังแสดงในตารางที่ 4

ซึ่งในการทดสอบของส่วนเนื้อแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ จากตัวอย่าง HION0 (HF 0.5%, RCA 0%) ให้ผลค่ากำลังอัดที่สูงกว่าส่วนเนื้อแบบปรับปรุงคุณภาพจากตัวอย่าง HIMN0 (HF 0.5%, RCA 0%) ทั้งในวันที่ 7 และ 28 ซึ่งกำลังอัดใน 7 วันจะต่างกันอยู่ที่ 14.41% และ กำลังอัดใน 28 วัน จะต่างกันอยู่ที่ 11.70% ดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องมาจากขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพทำให้เส้นใยผักตบชวามีลักษณะเปียกไม่เป็นเส้นใย ส่งผลให้

ส่วนเนื้อแบบปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพลดลง และ สูญเสียประสิทธิภาพในการนำมาทำเป็นวัสดุในส่วนผสมของคอนกรีตจากผลการทดสอบที่ 7 และ 28 วันพบว่าได้จากการใช้ส่วนผสม HF 1%, RCA 100% ในส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวาทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12

บทสรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติผสมเส้นใยผักตบชวา เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยที่เส้นใยผักตบชวาแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ ส่วนเปลือกแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ ส่วนเปลือกแบบปรับปรุงคุณภาพ ส่วนเนื้อแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ และ ส่วนเนื้อแบบปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ประเภท ให้ผลค่ากำลังอัดที่ลดลง โดยตัวอย่าง HSMN0 ให้ผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดในวันที่ 7 และ 28 อยู่ที่ 29.99 และ 30.35 MPa ตามลำดับ และ ตัวอย่าง HIMR1 ให้ผลการทดสอบกำลังอัดต่ำที่สุดในวันที่ 7 และ 28 อยู่ที่ 13.69 และ 19.74 MPa ตามลำดับ เนื่องจากการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวาส่งผลให้กำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ให้ผลการทดสอบอยู่ที่ 30.64 MPa และ 38.39 MPa ในเวลา 7 วัน และใน 28 วัน ตามลำดับ

สรุปได้ว่าการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเส้นใยผักตบชวามีประสิทธิภาพมากพอในการนำมาทดแทนมวลรวมหยาบธรรมชาติ กำลังอัดที่ได้ยังอยู่ในใช้งานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย เช่น นำมาเป็นวัสดุรองพื้นทาง และ เป็นส่วนผสมในงานโครงสร้างที่ไม่รับน้ำหนักมาก ถือเป็นการนำวัสดุรีไซเคิลและวัสดุทางธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางวิศวกรรมอย่างยั่งยืน



เอกสารอ้างอิง

- [1] สมพงษ์ พิริยานต์. (2562). *การศึกษาและพัฒนาการผลิตแท่งแผงกั้นจราจรจากการผสมยางธรรมชาติ ด้วยอนุภาคจากการบดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วและเส้นใยผักตบชวา* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ]. จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.
- [2] ไพฑูรย์ นาแสง. (2566). *การใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ]. จังหวัดขอนแก่น.
- [3] ASTM International. (2023). *ASTM C188-17: Standard test method for density of hydraulic cement*. ASTM International.
- [4] ASTM International. (2004). *ASTM C127-15: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.
- [5] ASTM International. (2023). *ASTM C128-22: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate*. ASTM International.
- [6] ASTM International. (2015). *ASTM C136-06: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International.
- [7] ASTM International. (2023). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C39/C39M-23). ASTM International.
- [8] พนารัตน์ แสงปัญญา. (2563). *การศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยอัตราส่วนผสมเดียวกัน* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยรามคำแหง]. กรุงเทพมหานคร.
- [9] ASTM International. (1978). *ASTM C143-78: Standard test method for slump of hydraulic cement concrete*. ASTM International.



ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 7 วัน

ลำดับ	Mix symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	Slump test
		(kg)	(cm)		(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
1	Control	12.57	15.05	29	177.89	0.52	6.48	323.52	30.64	6.9
		12.43	14.85	30	173.20	0.52	6.46	300.34		
		12.44	15.4	28	186.27	0.52	6.49	313.30		
2	HSMN0	12.2	15.09	31	178.84	0.55	6.76	305.76	29.99	9.1
		12.33	14.98	27.8	176.24	0.49	6.04	301.67		
		12.39	15.2	31	181.46	0.56	6.97	310.05		
3	HSMN1	12.25	15.03	29	177.42	0.51	6.30	255.84	24.44	7.7
		12.11	15.12	31	179.55	0.56	6.74	248.59		
		12.12	15.01	28	176.95	0.50	6.00	243.29		
4	HSMR0	11.56	15.02	30	177.19	0.53	6.14	241.68	23.24	7.1
		11.74	15.01	32	176.95	0.57	6.65	233.86		
		11.79	15.1	32	179.08	0.57	6.76	235.32		
5	HSMR1	11.15	15.45	30.1	187.48	0.56	6.29	233.78	22.78	7.6
		11.07	15.7	30.1	193.59	0.58	6.45	238.76		
		11.22	15.15	30.1	180.27	0.54	6.09	224.19		
6	HSON0	12.26	15.05	29.8	177.89	0.53	6.50	259.79	25.36	7.2
		12.42	15.7	29.8	193.59	0.58	7.17	253.11		
		12.32	15.5	29.7	188.69	0.56	6.90	262.91		
7	HSON1	12.19	15.08	30	178.60	0.54	6.53	264.16	23.80	6.9
		12.14	15.09	29.8	178.84	0.53	6.47	215.05		
		12.22	15.03	30	177.42	0.53	6.50	248.69		
8	HSOR0	11.94	15.07	29.5	178.37	0.53	6.28	226.91	22.23	6.0
		11.97	14.99	29.8	176.48	0.53	6.30	231.86		
		11.94	15.02	29.8	177.19	0.53	6.30	221.32		
9	HSOR1	11.6	15.05	29.5	177.89	0.52	6.09	216.39	20.17	7.1
		11.78	15.04	30	177.66	0.53	6.28	203.25		
		11.73	15.11	29.9	179.32	0.54	6.29	197.46		
10	HIMN0	12.09	15.14	31	180.03	0.56	6.75	215.59	21.45	5.5
		12.01	15	30	176.71	0.53	6.37	223.38		
		12.09	15.06	32	178.13	0.57	6.89	217.16		



ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 7 วัน (ต่อ)

ลำดับ	Mix symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	Slump test
		(kg)	(cm)		(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
11	HIMN1	11.51	15.02	30	177.19	0.53	6.12	188.13	18.23	7.7
		11.57	15.08	30.3	178.60	0.54	6.26	187.94		
		11.48	15.06	30	178.13	0.53	6.13	181.59		
12	HIMR0	11.28	15.05	30	177.89	0.53	6.02	163.24	16.31	8.8
		11.32	15.07	30.1	178.37	0.54	6.08	165.72		
		11.37	15.05	30.1	177.89	0.54	6.09	169.99		
13	HIMR1	11.38	15.21	30.1	181.70	0.55	6.22	137.45	13.69	8.2
		11.28	15.11	30	179.32	0.54	6.07	143.45		
		11.48	15.13	30.2	179.79	0.54	6.23	137.91		
14	HION0	12.3	14.99	27	176.48	0.48	5.86	265.27	24.78	6.4
		12.29	14.97	29	176.01	0.51	6.27	255.11		
		12.31	14.97	29	176.01	0.51	6.28	237.62		
15	HION1	12.06	14.97	28	176.01	0.49	5.94	211.62	21.41	6.8
		12.05	14.95	29	175.54	0.51	6.13	224.15		
		12.07	14.96	30	175.77	0.53	6.36	219.27		
16	HIOR0	11.85	15.15	29.7	180.27	0.54	6.34	175.69	17.41	8.7
		11.74	15.05	29.8	177.89	0.53	6.22	182.97		
		11.8	15.02	29.8	177.19	0.53	6.23	173.78		
17	HIOR1	11.67	15.03	28	177.42	0.50	5.80	144.83	14.19	7.5
		11.72	15.12	29	179.55	0.52	6.10	147.03		
		11.71	15.01	30	176.95	0.53	6.22	142.18		



ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

ลำดับ	Mix symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	Slump test
		(kg)	(cm)		(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
1	Control	12.49	15.25	29.8	182.65	0.54	6.80	385.01	38.39	6.9
		12.45	15.05	29	177.89	0.52	6.42	390.57		
		12.54	15.15	30.5	180.27	0.55	6.89	398.73		
2	HSMN0	12.39	15.05	30	177.89	0.53	6.61	320.58	30.35	9.1
		12.28	15.03	30	177.42	0.53	6.54	302.73		
		12.47	15.05	31	177.89	0.55	6.88	305.16		
3	HSMN1	12.29	15.12	30.2	179.55	0.54	6.66	268.78	26.30	7.7
		12.23	15.07	30.1	178.37	0.54	6.57	282.39		
		12.32	15	30	176.71	0.53	6.53	253.26		
4	HSMR0	11.51	15.01	30	176.95	0.53	6.11	240.55	23.83	7.1
		11.71	15.11	30.3	179.32	0.54	6.36	240.21		
		11.59	15.11	30.1	179.32	0.54	6.26	248.26		
5	HSMR1	11.15	15.11	30.1	179.32	0.54	6.02	205.32	22.93	7.6
		11.31	15.05	30.2	177.89	0.54	6.08	243.59		
		11.12	15.14	30.2	180.03	0.54	6.05	252.52		
6	HSON0	12.28	15.2	28.8	181.46	0.52	6.42	279.42	29.70	7.2
		12.36	15.16	29	180.50	0.52	6.47	304.79		
		12.33	14.97	30	176.01	0.53	6.51	324.40		
7	HSON1	12.18	15.1	29.9	179.08	0.54	6.52	268.61	25.62	6.9
		12.15	15.01	29.9	176.95	0.53	6.43	262.78		
		12.09	15.11	29.8	179.32	0.53	6.46	252.34		
8	HSOR0	11.98	15.07	30	178.37	0.54	6.41	230.25	22.87	6.0
		12.02	15.02	29.9	177.19	0.53	6.37	220.99		
		11.82	15.05	29.8	177.89	0.53	6.27	248.35		
9	HSOR1	11.69	15.07	29	178.37	0.52	6.05	118.23	20.88	7.1
		11.69	15.05	30.1	177.89	0.54	6.26	259.03		
		11.64	15.45	30	187.48	0.56	6.55	261.57		
10	HIMN0	12.33	15.02	31.5	177.19	0.56	6.88	274.37	26.06	5.5
		12.2	15.05	31	177.89	0.55	6.73	258.46		
		12.25	15.18	30	180.98	0.54	6.65	264.47		



ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ	Mix symbol	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	กำลังอัด	กำลังอัดเฉลี่ย	Slump test
		(kg)	(cm)		(cm ²)	(m ³)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(cm)
11	HIMN1	11.49	15.05	29.9	177.89	0.53	6.11	245.62	23.57	7.7
		11.5	15.06	29.7	178.13	0.53	6.08	254.34		
		11.63	15.02	30	177.19	0.53	6.18	220.95		
12	HIMR0	11.28	15.05	30.1	177.89	0.54	6.04	208.36	20.36	8.8
		11.32	15.01	30.2	176.95	0.53	6.05	205.37		
		11.39	15.13	30.2	179.79	0.54	6.18	209.16		
13	HIMR1	11.58	15.1	30.1	179.08	0.54	6.24	202.15	19.74	8.2
		11.44	11.09	29.9	96.59	0.29	3.30	200.18		
		11.4	15.05	30	177.89	0.53	6.08	201.43		
14	HION0	12.31	15.12	30	179.55	0.54	6.63	291.11	29.30	6.4
		12.3	15.05	30	177.89	0.53	6.56	304.96		
		12.38	15.11	30.1	179.32	0.54	6.68	300.17		
15	HION1	12.23	15.11	30.2	179.32	0.54	6.62	263.36	25.54	6.8
		12.19	15.14	29.9	180.03	0.54	6.56	261.28		
		12.16	15.09	30	178.84	0.54	6.52	256.61		
16	HIOR0	11.81	15.01	30.1	176.95	0.53	6.29	204.58	21.81	8.7
		11.81	15.02	29.8	177.19	0.53	6.24	228.35		
		11.74	15	30	176.71	0.53	6.22	234.20		
17	HIOR1	11.78	15.11	29.7	179.32	0.53	6.27	202.41	19.76	7.5
		11.74	15.03	29.7	177.42	0.53	6.19	200.59		
		11.89	15.15	30	180.27	0.54	6.43	201.58		



การศึกษาโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าถ่านหิน

โดยเทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทนชัน

Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Cement Paste containing Fly Ash Monitoring by Sorption Measurements and Micro-indentation

นายอนรรฆ โชติวิช¹ นางสาวจุฑามาศ นกน่วม¹ นางสาวรินรดา ศรีเพ็ชร¹ และปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ²

¹ นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102789@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าถ่านหินเคลือบด้วยแคลเซียมสูง โดยประเมินผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กำหนดให้ตัวอย่างซีเมนต์เฟสมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 30 และ 50 โดยน้ำหนัก แล้วบ่มซีเมนต์เฟสในสภาวะปิดผนึก ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนร่วมกับทดสอบปริมาณน้ำซีเมนต์เฟส เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของโพรงขนาดเล็ก ส่วนสมบัติเชิงกลใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน ทำการทดสอบซีเมนต์เฟสที่อายุ 7 14 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า การผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 ทำให้โพรงคาพิวลาไรขนาดใหญ่มีปริมาณลดลง ส่วนโพรงประเภท interlayer space และ gel pore มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 ทำให้โพรงคาพิวลาไรขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซีเมนต์เฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสการคืบที่ต่ำกว่าซีเมนต์เฟสควบคุม ในขณะที่ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสการคืบที่สูงกว่าซีเมนต์ควบคุมที่อายุ 60 วัน

Abstract

This study investigates the micropore characteristics and creep behavior of cement paste incorporating fly ash, aiming to evaluate the effects of partial replacement of Portland cement with fly ash on the material's microstructure and mechanical properties. Cement paste specimens were prepared with varying fly ash replacement levels and cured for predetermined periods. The micropore structure was analyzed using nitrogen (N₂) adsorption to determine specific surface area, total pore volume, and pore size distribution. Mechanical properties at the microscale and creep behavior were examined through micro-indentation testing to

determine hardness, reduced elastic modulus, and time-dependent deformation under constant load. The results indicate that an appropriate replacement level of fly ash reduces the proportion of large pores while increasing the fraction of small pores, leading to a denser microstructure. Furthermore, fly ash incorporation was found to decrease the creep rate compared to ordinary cement paste, demonstrating the potential of fly ash as a supplementary cementitious material to enhance both durability and mechanical performance.

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวัสดุพอลิโพรพิลีนเสริม (Supplementary Cementitious Materials: SCMs) ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มสมบัติของวัสดุซีเมนต์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า เป็นหนึ่งในวัสดุ SCMs ที่ใช้แพร่หลาย เนื่องจากมีปฏิกิริยาปอลิโพรพิลีน ความละเอียดของอนุภาค และความสามารถในการปรับปรุงโครงสร้างโพรงให้ละเอียดขึ้น การผสมเถ้าถ่านหินในซีเมนต์เฟสสามารถมีผลต่อการบ่มการไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลและสมรรถนะระยะยาวของวัสดุ

การศึกษาลักษณะโพรงระดับจุลภาคมีความสำคัญ เนื่องจากความพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนมีอิทธิพลต่อความแข็งแรง ความทนทาน และพฤติกรรมการเสียดสีของวัสดุ เทคนิคการดูดซับแก๊ส เช่น การดูดซับแก๊สไนโตรเจน เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือในการหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุน เพื่อประเมินผลของการผสมเถ้าถ่านหินต่อการปรับปรุงโครงสร้างโพรงของวัสดุซีเมนต์ นอกจากโครงสร้างโพรงแล้ว การเสียดสีกับเวลา หรือ “การคืบ” (creep) ของวัสดุซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของโครงสร้างการทดสอบไมโครอินเดนเทนชัน



(micro-indentation) เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์สมบัติเชิงกลในระดับจุลภาค เช่น ความแข็ง และโมดูลัสยืดหยุ่น พร้อมทั้งติดตามพฤติกรรมการคืบภายใต้ภาวะคงที่ได้อย่างแม่นยำ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณต่าง ๆ ต่อโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคและพฤติกรรมการคืบของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซและไมโครอินเดนเทนชัน ผลการศึกษาเป็นข้อมูลเชิงลึกที่ช่วยอธิบายบทบาทของเถ้าถ่านหินต่อการเพิ่มสมบัติความทนทานและสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์ เพื่อสนับสนุนการใช้งานก่อสร้างอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณต่าง ๆ ต่อโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption)
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงกลระดับจุลภาคและพฤติกรรมการคืบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน (micro-indentation)
3. เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคกับสมบัติเชิงกลและการคืบของซีเมนต์เพสต์
4. เพื่อเสนอข้อมูลเชิงวิชาการที่สนับสนุนการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุผสมเสริมซีเมนต์ในการเพิ่มสมบัติความทนทานและความแข็งแรงของวัสดุ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหินแม่เมาะ (แคลเซียมสูง) จังหวัดลำปาง และเถ้าถ่านหิน BLCP (แคลเซียมต่ำ) จังหวัดระยอง โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio) เท่ากับ 0.55 และ 0.4 โดยจะใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0,15,30 และ 50 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0,15,30 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด $3 \times 13 \times 300$ มิลลิเมตรและทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 สูง 30 มิลลิเมตร พอครบ 1 วัน จะทำการแกะออกจากแบบหล่อ และบ่มในสภาพปิดผนึก (Sealed condition) ซึ่งไม่มีการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างตัวอย่างกับสิ่งแวดล้อม เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยคงความชื้นที่อยู่ภายในซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปฏิกิริยาปอร์ตโซลานได้ต่อเนื่อง จากนั้นศึกษาโครงสร้างโพรงระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้เทคนิคการดูดซับและ ไมโครอินเดนเทนชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ต้องการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน
2. การศึกษาโพรงระดับจุลภาคและพฤติกรรมการคืบเพื่อปรับปรุงความทนทานของคอนกรีต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีโครงสร้างภายในซับซ้อน ประกอบด้วยเฟสไฮเดรชันหลัก ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยโพรงหลายระดับ ได้แก่ เจลโพร์ (gel pores) ขนาดนาโนเมตร, เมโซโพร์ (mesopores) และแคปิลลารีโพร์ (capillary pores) ขนาดไมโครเมตร ขนาดและการกระจายของโพรงเหล่านี้มีผลต่อสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง การซึมผ่านน้ำ และพฤติกรรมการคืบ (creep) ของวัสดุ การคืบในซีเมนต์เพสต์เกิดจากหลายกลไก ทั้งการเสียรูปแบบเวลาของ C-S-H, การเคลื่อนย้ายของน้ำในโพรงขนาดเล็ก, และการเปลี่ยนแปลงเคมีในระยะยาว ปริมาณและโครงข่ายของโพรงระดับจุลภาคมีบทบาทสำคัญในการควบคุมอัตราการคืบ เนื่องจากมีผลต่อการกระจายความเค้นและการไหลของน้ำในโครงสร้าง การใช้เถ้าถ่านหิน (fly ash) เป็นวัสดุเสริมซีเมนต์เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพราะช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และปรับปรุงสมบัติระยะยาวของวัสดุ เถ้าถ่านหินทำงานสองทาง ได้แก่ (1) filler effect ที่ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคทำให้โครงสร้างหนาแน่นขึ้น และ (2) pozzolanic reaction ที่เถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เพื่อสร้าง C-S-H เพิ่มเติม ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาณโพรงเมื่อเวลาผ่านไป เทคนิคการดูดซับก๊าซ (adsorption) เช่น การดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ (N_2 adsorption) ร่วมกับการวิเคราะห์แบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) สามารถใช้วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและการแจกแจงขนาดโพรงในช่วงนาโนเมตรได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่เทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน (micro-indentation) สามารถใช้วัดสมบัติเชิงกลระดับจุลภาค เช่น ความแข็ง (hardness) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus) และการคืบเฉพาะที่ (indentation creep) เพื่อเชื่อมโยงโครงสร้างโพรงกับสมบัติเชิงกลของวัสดุ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ippei Maruyama, Yukiko Nishioka, Go Igarashi, Kunio Matsui
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างจุลภาคและมวลรวมในปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้งครั้งแรก

Shatabdi Mallicka, M.B. Anoopb, K. Balaji Raob
การเคลื่อนตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอย - การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- 3.1.1 แบบหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ขนาด $13 \times 3 \times 300$ มิลลิเมตร จำนวน 10 ช่อง
- 3.1.2 โต๊ะสั่นคอนกรีต
- 3.1.3 ฟิสิกส์โวลติคลอโรด
- 3.1.4 เทปกระดาษ



3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- 3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 3.2.2 เล้าถ่านหินบดละเอียด (FA)
- 3.2.3 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ความถ่วงจำเพาะ	
น้ำ	1
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.11
เล้าถ่านหินแคลเซียมสูง	2.49
เล้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ	2.11

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ก่อนเริ่มทำการผสมตัวอย่างวัสดุทุกชนิดจะถูกนำไปเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิคงที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากันจากนั้นนำวัสดุมาชั่งตามสัดส่วนที่ทำการออกแบบไว้และผสมในหม้อผสมมอร์ตาร์โดยทำการผสมที่ความเร็วต่ำเป็นเวลา 3 นาที ตามด้วยการผสมด้วยมือเพื่อให้วัสดุที่อยู่ด้านล่างหม้อผสมเข้ากันจากนั้นผสมด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นนำส่วนผสมเทใส่ภาชนะสแตนเลสและทำการผสมด้วยมือทุก 30 นาที จนกว่าจะไม่เกิดการเยิ้ม (Bleeding)

ส่วนผสมที่จะถูกนำไปหล่อในแบบหล่อขนาด $13 \times 3 \times 300$ มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น และ แบบหล่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความสูง 30 มิลลิเมตร จำนวน 25 ชิ้น โดยแบบหล่อจะถูกคลุมด้วยฟิล์มโพลีไวนิลคลอไรด์ 3 ชั้น แล้วทำการหุ้มด้วยผ้าชุบน้ำบิดหมาดจากนั้นหุ้มด้วยฟิล์มโพลีไวนิลคลอไรด์ 3 ชั้นเพื่อควบคุมการสูญเสียน้ำและทำการเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน จึงทำการแกะแบบหล่อและเก็บตัวอย่างในสภาพปิดผนึกภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียสก่อนนำไปทดสอบ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์

ชื่อรหัส	ปริมาณส่วนผสม (g/L)				W/B
	Cement	Fly-Ash MM	Fly-Ash Blcp	Water	
55C	1147.39	-	-	631.06	0.55
55FH15	962.03	169.77	-	622.49	0.55
55FH30	781.63	334.99	-	614.14	0.55
55FH50	548.5	458.5	-	603.35	0.55
55FL15	952.11	-	168.02	616.07	0.55
55FL30	765.89	-	328.24	601.77	0.55
55FL50	530.64	-	530.64	583.71	0.55

ชื่อรหัส	ปริมาณส่วนผสม (g/L)				W/B
	Cement	Fly-Ash MM	Fly-Ash Blcp	Water	
40C	1385.92	-	-	554.37	0.4
40FH15	1158.74	204.48	-	545.29	0.4
40FH30	938.89	402.38	-	536.51	0.4
40FH50	656.53	656.53	-	525.23	0.4
40FL15	1144.39	-	201.95	538.53	0.4
40FL30	916.27	-	392.69	523.58	0.4
40FL50	631.11	-	631.11	504.89	0.4

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน (Sorption measurement)

การวิเคราะห์ Isotherm ของกระบวนการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำโดยใช้เครื่อง Belsorp Max X (แสดงดังรูปที่ 1) เพื่อประเมินลักษณะโครงสร้างรูพรองของตัวอย่าง ตั้งแต่ขนาดเล็กที่สุดไปถึงขนาดใหญ่ ตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบจะถูกบดละเอียดและคัดผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน หรือเบอร์ 200 โดยส่วนที่เหลือจะค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 25 ไมครอน หรือเบอร์ 500 ในการทดสอบโดยใช้ไนโตรเจนเหลว ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมแล้วจะถูกชั่งน้ำหนักให้ได้ 100 ± 10 มิลลิกรัม จากนั้นบรรจุลงหลอดเซลล์และจะนำไปใช้ในเครื่อง Belprep-Vac III (แสดงดังรูปที่ 2) เพื่อกำจัดความชื้นออกจากตัวอย่างจนแห้งสนิทที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงยี่สิบนาที เพื่อควบคุมความดันสัมพัทธ์ภายในหลอดเซลล์จากนั้นจะทำการนำหลอดเซลล์ไปติดตั้งเข้ากับเครื่อง Belsorp Max X พร้อมภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลว เมื่อเครื่องเริ่มทำงาน ไนโตรเจนเหลวจะไหลผ่านเข้าหลอดเซลล์ที่บรรจุตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดกระบวนการ Adsorption โดยไนโตรเจนจะเกาะที่พื้นผิวโมเลกุลของตัวอย่างและเข้าไปแทนที่รูพรองจนเกิดความดันในหลอดเซลล์ถึงจุดอิ่มตัว ($P/P_0=0.98$) เครื่องจะเริ่มกระบวนการ Desorption เพื่อตรวจวัดค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่เข้าไปเกาะและแทนที่รูพรองภายในตัวอย่าง เครื่อง Belsorp Max X ใช้ทฤษฎี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุสำหรับความดันสัมพัทธ์ โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งในเครื่อง Belprep-Vac III ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสก่อนใช้งาน ในส่วนของการทดสอบด้วยไอน้ำ ใช้ตัวอย่างเดียวกันกับที่ใช้ในกระบวนการทดลองด้วยไนโตรเจนเหลว โดยต้องผ่านตะแกรงขนาด 25 ไมครอน หรือเบอร์ 500 และชั่งน้ำหนักให้ได้ 25 ± 1 มิลลิกรัม การดำเนินขั้นตอนการทดลองนั้นเหมือนกับการใช้งานเครื่องกับไนโตรเจนเหลว แต่เปลี่ยนจากภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลวเป็นภาชนะบรรจุน้ำแทน สำหรับการทดสอบด้วยไอน้ำ ทั้งนี้ระยะเวลาในการดูดความชื้นในเครื่อง Belprep-Vac III จะเปลี่ยนจากหนึ่งชั่วโมงยี่สิบนาทีเป็นสี่ชั่วโมง บนระดับอุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 เครื่อง Belsorp Max X



รูปที่ 2 เครื่อง Belprep Vac III



รูปที่ 3 ตะแกรงร่อน

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน

จากการหล่อแบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความสูง 30 มิลลิเมตร ทำการแกะแบบหล่อจะได้แท่งทรงกระบอกทำการตัดที่มีความหนา 5 มิลลิเมตรโดยเครื่องตัด Isomet 1000 (แสดงดังรูปที่ 4.) โดยหน้าตัดของตัวอย่างทั้งสองด้านต้องเรียบจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบโดยเครื่อง Micro-indentation (แสดงดังรูปที่ 5.) ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 1,3,7,14,28 และ 60 วัน ในการทดสอบใช้หัวกดชนิด Berkovich (หัวเพชร) ควบคุมความขึ้นสัมผัสขณะทดสอบแรงกดที่ผิวหน้าตัวอย่างคงที่ 20 นิวตัน เป็นระยะเวลา 300 วินาที เมื่อเวลาครบหัวกดจะทำการยกขึ้น ทำการทดสอบซ้ำบนหน้าตัดโดยการเลื่อนจุดทุกครั้งทีระยะห่างจุดที่เหมาะสมและทำการทดสอบให้ครบ 25 ครั้ง เพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบของแต่ละตัวอย่าง จึงนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแข็งอินเดนเทนชัน ค่าอินเดนเทนชัน โมดูลัส และโมดูลัสการคืบ ของตัวอย่าง



รูปที่ 4 เครื่องตัด Isomet 1000



รูปที่ 5 Micro-indentation

3.4.3 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เฟส

(Water content measurement)

การทดสอบทำการตัดตัวอย่างเป็นบล็อกขนาดประมาณ 3x3x3 มิลลิเมตร โดยมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.20 ± 0.02 กรัม จากนั้นทำการเขียนรหัสกำกับลงบนตัวอย่าง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักเบื้องต้น เพื่อทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวอย่างถูกแช่น้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศ 0.1 hPa เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างขณะอยู่ในน้ำ (M_{water}) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างในอากาศภายใต้สภาวะ SSD (Mair) จากนั้นตัวอย่างถูกนำเข้าเครื่องดูดอากาศ (Vacuum samples) เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างบรรจุลงในขวดชมพู เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตัวอย่างถูกนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ภายใต้สภาวะที่ไม่มี CO_2 หลังการอบแห้ง ตัวอย่างถูกพักไว้บนซิลิกาเจลภายในภาชนะปิดสนิทเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่แห้ง สมบูรณ์ ($M_{dry,105^\circ}$) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ



รูปที่ 6 เครื่องชั่ง OHAUS ADVENTURER AX224



รูปที่ 7 เครื่อง Vacuum



รูปที่ 8 ตู้อบ

3.4.4 การทดสอบ Hydration Stoppage

ในการทดสอบแบบ Powder sample ทำการบดตัวอย่างน้ำหนัก 20 ± 1 กรัม โดยผ่านตะแกรงเบอร์ 18 จากนั้นนำตัวอย่างใส่บีกเกอร์แช่ IPA 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำตัวอย่างมากรองสารละลาย IPA ออกโดยใช้กรวยกรอง Buchner และกระดาษกรองเบอร์ 1 และเปิดเครื่องดูดสุญญากาศ นำตัวอย่างที่กรองมาใส่ IPA แช่เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วนำมา กรองอีกครั้งเพื่อ IPA แทนที่น้ำโดยสมบูรณ์ นำตัวอย่างใส่กระปุกแล้วเปิดเครื่องดูดเพิ่มอีก 1 ชั่วโมงเพื่อลด IPA ส่วนเกินออกจากตัวอย่างเมื่อครบเวลาเก็บตัวอย่างในภาชนะดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 11 % เพื่อช่วยลด IPA ที่หลงเหลือและป้องกันการดูดซับความชื้นจากอากาศ การทดสอบแบบ Block sample ทำการตัดตัวอย่างขนาดประมาณ $3 \times 3 \times 3$ มิลลิเมตร แล้วนำมาแช่ IPA เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างมาแช่ จากนั้นทำการแช่ IPA อีกครั้งเป็นเวลา 5 วัน เมื่อครบเวลาที่กำหนดตัวอย่างมาแช่ก่อนทำการทดสอบ Vacuum เป็นเวลา 5 วัน เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างมาซีลเก็บและไปทำการทดสอบอย่างอื่นได้

4.ผลการทดสอบ

4.1ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการดูดซับ

จากการทดสอบตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม (W/B) เท่ากับ 0.55 พบว่าสามารถจัดกลุ่มลักษณะของโพรงจากตัวอย่างออกเป็น 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นโพรงระหว่างชั้นของ C-S-H (interlayer space pores), ชั้นโพรงระดับเจล (gel pores), ชั้นโพรงคาпилลารีขนาดเล็ก (small capillary pores) และชั้นโพรงคาпилลารีขนาดใหญ่ (large capillary pores) จากผลการวิเคราะห์ในภาพที่แสดงช่วงโพรงใน interlayer space,

gel pores และ large capillary pores พบว่ามีความเด่นชัดที่สุดสำหรับการวิเคราะห์โดยผลสรุปแต่ละชั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

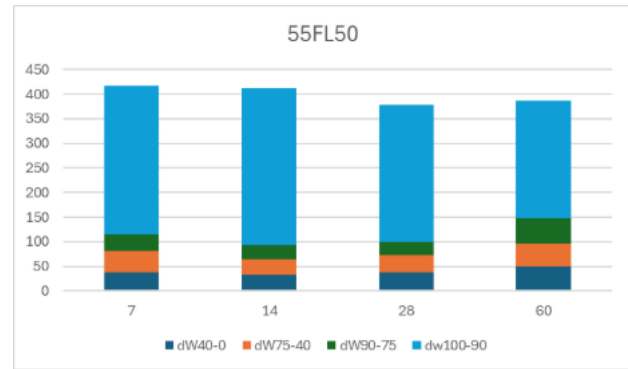
ชั้นโพรงระหว่างชั้นของ C-S-H (Interlayer Space Pores): จากผลทดสอบและการเปรียบเทียบเส้นกราฟทั้งสองประเภท คือ เส้นกราฟหินแคลเซียมสูง (FH) และแคลเซียมต่ำ (FL) กับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ควบคุม (55C) 55FH15 (แสดงดังรูปที่11) ในช่วงเวลาเริ่มต้นพบว่าปริมาณโพรงมีมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมอย่างเห็นได้ชัดและเพิ่มขึ้นตามอายุของซีเมนต์เพสต์ 55FH50 (แสดงดังรูปที่12) ในช่วงอายุ 7 วันปริมาณโพรงต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมและมีการเพิ่มขึ้นของโพรงเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น 55FL15 (แสดงดังรูปที่13) ช่วง 7 ถึง14 วัน ปริมาณโพรงสูงกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ลดลงในช่วงอายุ 28-60 วันและแนวโน้มลดลงตามอายุที่มากขึ้น 55FL50 (แสดงดังรูปที่14) ปริมาณโพรงในช่วงแรกสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมเล็กน้อย แต่ลดลงต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมในช่วงอายุ 28-60 วัน

ชั้นโพรงระดับเจล (Gel Pores): ในชั้นนี้ เส้นกราฟทั้งสองประเภทมีความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม: 55FH15 (แสดงดังรูปที่11) ช่วงอายุ 7, 14, และ 28 วันพบปริมาณสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมแต่ลดลงกว่าในช่วง 60 วัน สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงและการพัฒนาของC-S-Hที่มาก55FH50(แสดงดังรูปที่12) ปริมาณเจลเพิ่มขึ้นช่วงอายุต้นและลดลงในช่วงอายุปลายโดยเฉพาะในช่วง 60 วัน มีค่าใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ควบคุม 55FL15 (แสดงดังรูปที่13) พัฒนาการของ C-S-H สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมในช่วงแรก แต่ต่ำกว่าที่ 28 วัน อย่างไรก็ตามยังพบแนวโน้มการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง 55FL50 (แสดงดังรูปที่14) เมื่อพบว่าปริมาณC-S-H มีแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างที่มากขึ้น

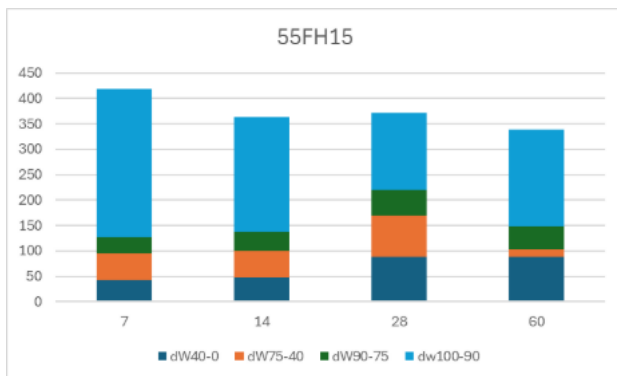
ชั้นโพรงคาпилลารีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (Small and Large Capillary Pores) ชั้นโพรงคาпилลารีขนาดใหญ่มีปริมาณมากที่สุดเนื่องจากโพรงถูกเติมเต็มด้วยน้ำจนสมบูรณ์ ส่วนชั้นโพรงขนาดเล็กมีการเติมน้ำเพียง 0.98:55FH15 (แสดงดังรูปที่11) ปริมาณอยู่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม เพราะมีปริมาณเส้นกราฟหินร้อยละ 15 55FH50 (แสดงดังรูปที่12) มีปริมาณรูโพรงในช่วงแรกมากกว่า แต่ลดลงในช่วงอายุที่เพิ่มขึ้นการพัฒนาของ C-S-H ที่เพิ่มมากขึ้น และการใส่เส้นกราฟหินร้อยละ50 ทำให้ปริมาณรูโพรงทุกชั้นมีค่าสูงกว่าการใส่เส้นกราฟหินร้อยละ 15(แสดงดังรูปที่13) ปริมาณรูโพรงสูงกว่า 55FH15 เนื่องจากเส้นกราฟหินแคลเซียมต่ำรูโพรงลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น 55FL50 (แสดงดังรูปที่14) ปริมาณรูโพรงเริ่มต้นสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม เพราะใช้เส้นกราฟหินแคลเซียมต่ำ ส่งผลให้พัฒนาของ C-S-H ข้นกว่า 55FH50 และมีปริมาณลดลงตามอายุของซีเมนต์เพสต์ แต่เนื่องจากการแทนที่เส้นกราฟหินร้อยละ50 ทำให้ปริมาณรูโพรงทุกชั้นมีปริมาณสูงกว่าการใส่เส้นกราฟหินร้อยละ 15



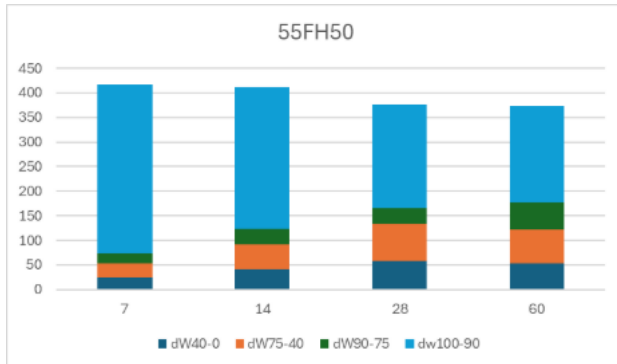
รูปที่10 กราฟแสดง Pore size classification ของ55C



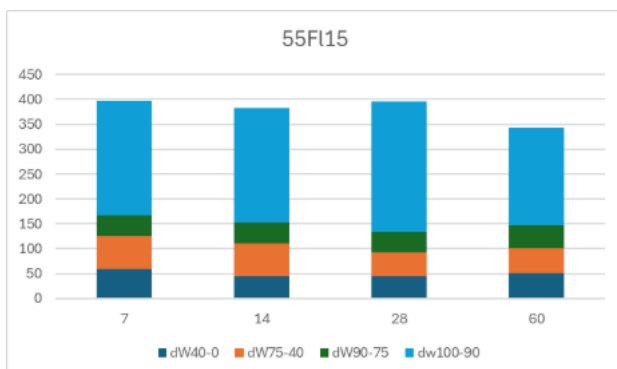
รูปที่14 กราฟแสดง Pore size classification ของ55FL50



รูปที่11 กราฟแสดง Pore size classification ของ55FH15



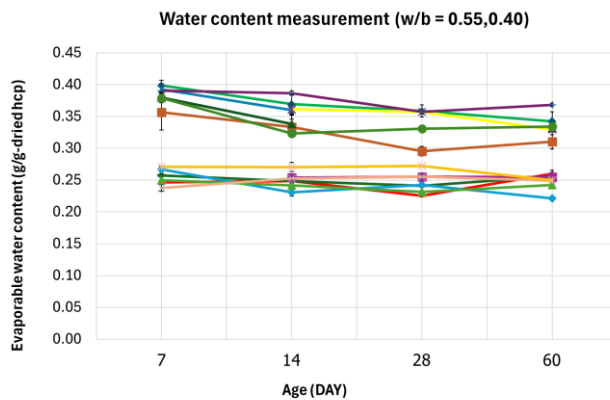
รูปที่12 กราฟแสดง Pore size classification ของ55FH50



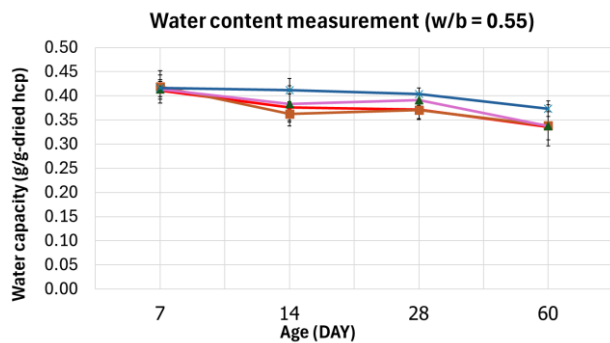
รูปที่13 กราฟแสดง Pore size classification ของ55FL15

4.2 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์

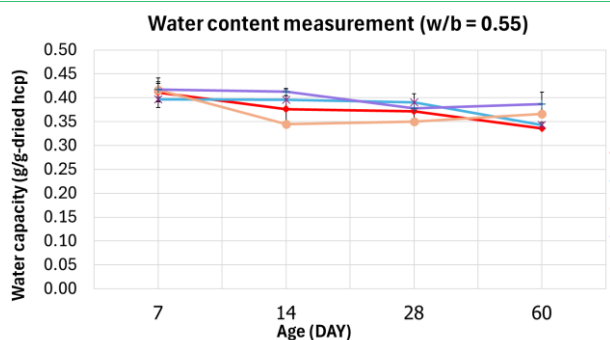
จากผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ แสดงให้เห็น(แสดงดังรูปที่ 15) พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 ปริมาณน้ำที่สามารถระเหยได้มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีความหนาแน่นสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยลง แม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลงของปริมาณน้ำที่ระเหยได้ในทิศทางเดียวกัน การเติมเถ้านหินแคลเซียมสูงและเถ้านหินแคลเซียมต่ำส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สามารถระเหยได้มีความแตกต่างกัน(แสดงดังรูปที่ 16 ก.)ซึ่งแสดงผลของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่าปริมาณน้ำในตัวอย่างช่วงต้นมีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสะท้อนถึงค่าความชื้นเริ่มต้นในระดับสูง และความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีในบริเวณที่มีรูโพรง เมื่อเติมเถ้านหินแคลเซียมสูงจะทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมเถ้านหินแคลเซียมต่ำส่งผลให้ปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเถ้านหินแคลเซียมสูง(แสดงดังรูปที่ 17.)ซึ่งแสดงผลของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 พบว่าปริมาณน้ำในช่วงอายุตัวอย่าง 7 ถึง 28 วันมีแนวโน้มลดลงตามอายุ แต่ในช่วงอายุตัวอย่างที่28 ,60 วัน พบแนวโน้มของปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น โดยการเติมเถ้านหินแคลเซียมสูงมีผลทำให้มีปริมาณของ C-S-H เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้านหินแคลเซียมสูงมากขึ้น ปริมาณน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม เมื่อเติมเถ้านหินแคลเซียมต่ำร้อยละ 30 พบว่าค่าที่วัดได้มีความแปรปรวน แต่ยังคงค่าได้ว่ามีแนวโน้มของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเติมเถ้านหินแคลเซียมต่ำยังส่งผลให้ปริมาณน้ำเริ่มต้นมีค่าที่สูงและมีแนวโน้มลดลงตามอายุ จากผลเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 วัสดุโพรงมากกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการกักเก็บน้ำที่สูงกว่า (แสดงดังรูปที่ 18) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทั้ง0.55และ0.40 พบว่าการเติมเถ้านหินแคลเซียมสูงในปริมาณมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นเริ่มต้นลดลง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การเติมเถ้านหินแคลเซียมต่ำในปริมาณมากส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้านหินที่เติม โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แสดงค่าความหนาแน่นสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 เถ้านหินแคลเซียมต่ำร้อยละ 50 พบว่าความหนาแน่นในตัวอย่อย่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.55



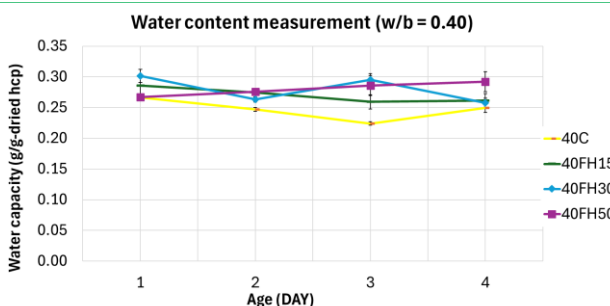
รูปที่ 15 Evaporable water content (High Calcium oxide and Low Calcium oxide) (w/b=0.55,0.40)



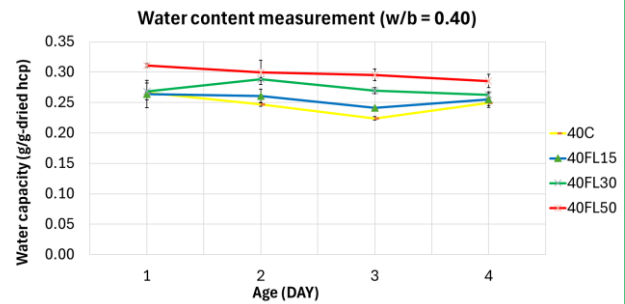
รูปที่ 16. (ก) Water capacity High Calcium oxide (w/b=0.55)



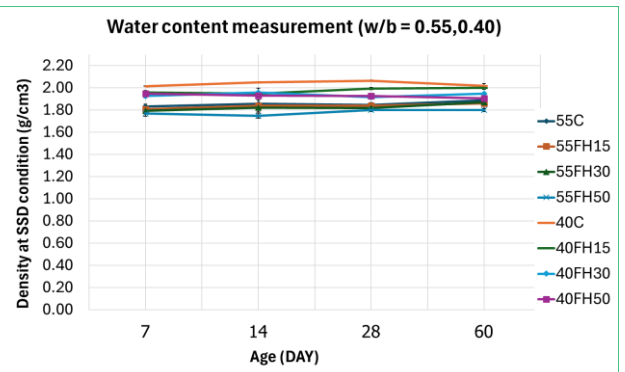
รูปที่ 16. (ข) Water capacity Low Calcium oxide (w/b=0.55)



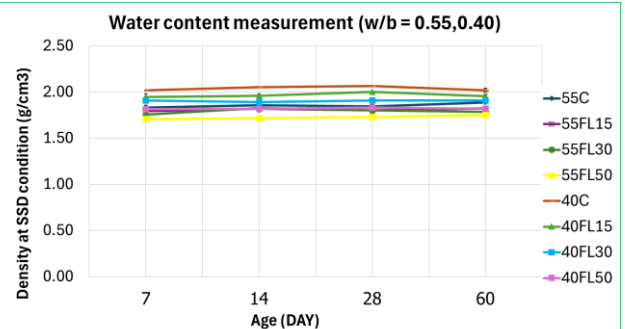
รูปที่ 17. (ก) Water capacity High Calcium oxide (w/b=0.40)



รูปที่ 17. (ข) Water capacity Low Calcium oxide (w/b=0.40)



รูปที่ 18. (ก) Density at SSD condition High Calcium oxide (w/b=0.55,0.40)



รูปที่ 18. (ข) Density at SSD condition Low Calcium oxide (w/b=0.55,0.40)

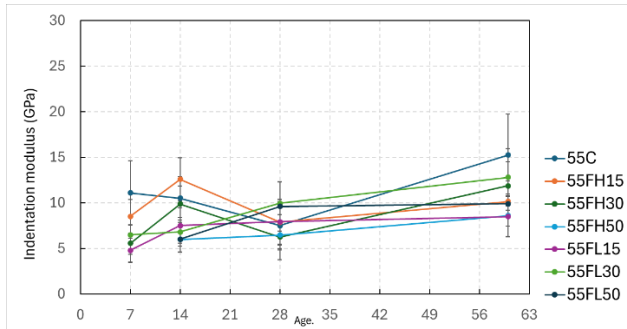
4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทนซ์

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.40 ของอายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน เพื่อทดสอบค่าหาความแข็งอินเดนเทนซ์ ค่าโมดูลัสอินเดนเทนซ์ และ โมดูลัสการคืบ

การทดสอบค่าโมดูลัสอินเดนเทนซ์อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าในช่วงที่อายุตัวอย่าง 7 และ 60 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสอินเดนเทนซ์สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม ที่อายุ 14 วันพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสอินเดนเทนซ์สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม ยกเว้นการใส่เถ้าถ่านหิน แคลเซียมสูงที่ร้อยละ 15 ค่าโมดูลัสอินเดนเทนซ์สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 28 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม

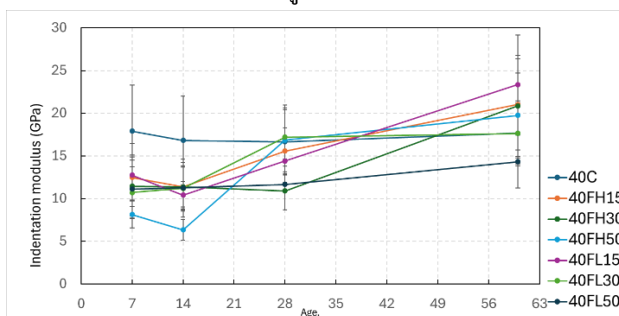


ยกเว้นการใส่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 30 และ 50 มีค่าโมดูลัสอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งได้ค่าโมดูลัสอินเดนเทชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน(แสดงดังรูปที่ 19 ก.)



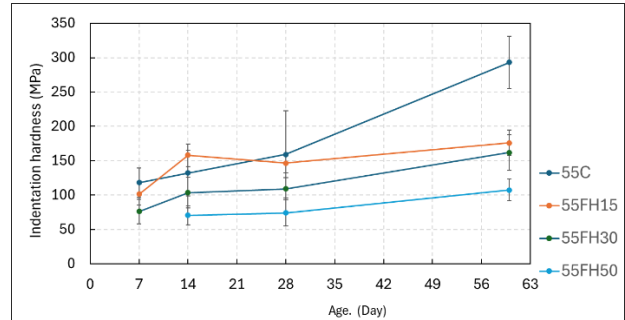
รูปที่ 19.(ก) ค่าindentation modulusของซีเมนต์ผสมเส้นผ่าน
หิ้น W/B 0.55

การทดสอบค่าโมดูลัสอินเดนเทชันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 พบว่าในช่วงที่อายุตัวอย่าง 7 และ 14 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางโมดูลัสอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสม ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าโมดูลัสอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสมยกเว้นการใส่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 50 และใส่การเส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 30 ที่อายุ 60 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสมยกเว้นการใส่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 50 มีค่าอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางค่าโมดูลัสอินเดนเทชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน (แสดงดังรูปที่ 19 ข.)

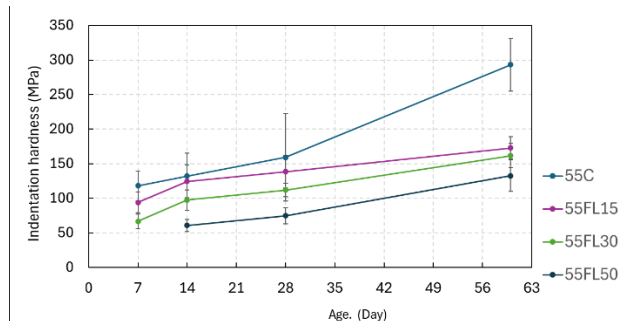


รูปที่ 19. (ข) ค่าindentation modulusของซีเมนต์ผสม
เส้นผ่านหิ้น W/B 0.40

การทดสอบค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแข็งแรงสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสม ค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงสูงขึ้นในทิศทางเดียวกัน (แสดงดังรูปที่ 20 ก. และ รูปที่ 20 ข.)

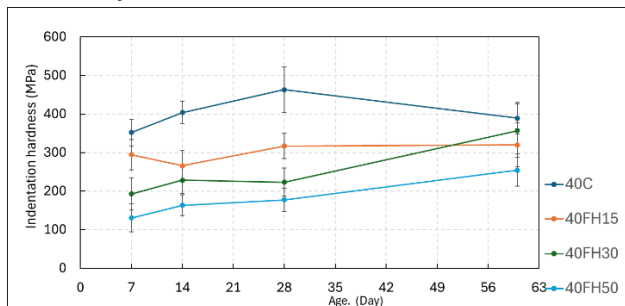


รูปที่ 20.(ก) ค่า indentation hardnessของซีเมนต์ผสมเส้นผ่าน
แคลเซียมสูง W/B 0.55



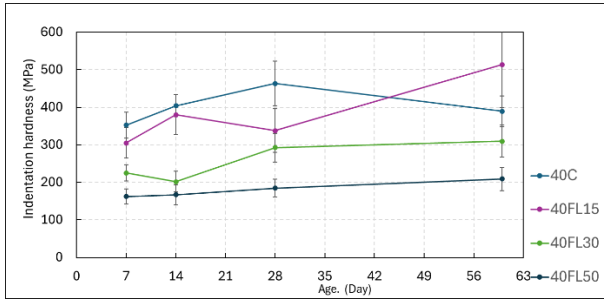
รูปที่ 20. (ข) ค่า indentation hardnessของซีเมนต์ผสมเส้นผ่าน
หิ้นแคลเซียมต่ำ W/B 0.55

การทดสอบค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มลดลงที่อายุ 60 วัน และมีค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสมที่มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันสูงขึ้นตามอายุตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 20 ค.)



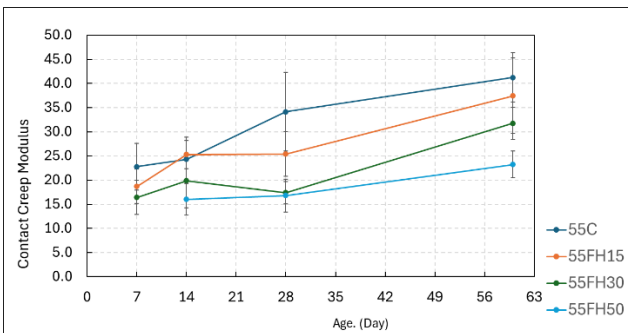
รูปที่ 20.(ค) ค่า indentation hardnessของซีเมนต์ผสมเส้นผ่าน
แคลเซียมสูง W/B 0.40

การทดสอบค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มลดลงและมีค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางทุกส่วนผสมยกเว้นการผสมเส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 15 อายุตัวอย่าง 60 วัน ค่าความแข็งแรงอินเดนเทชันมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุตัวอย่างที่มากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 20 ง.)

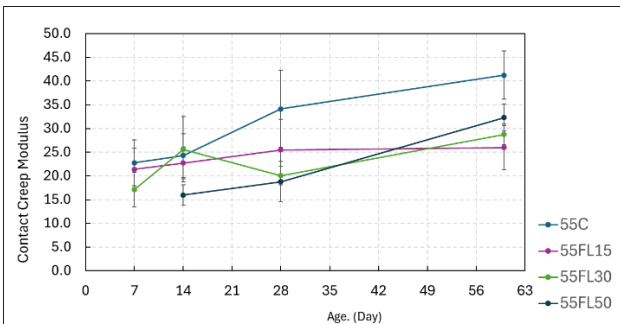


รูปที่ 20. (ง) ค่า indentation hardness ของซีเมนต์ผสมผงเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ W/B 0.40

จากการทดสอบโมดูลัสการคืบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะได้ว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสการคืบที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมแต่อายุตัวอย่างที่ 14 วัน จะได้ว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสการคืบที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมยกเว้นซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่ร้อยละ 15 (แสดงดังรูปที่ 21 ก.) และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่ร้อยละ 30 (แสดงดังรูปที่ 21 ข.) มีแนวโน้มค่าโมดูลัสการคืบที่สูงขึ้นตามอายุตัวอย่างที่มากขึ้น

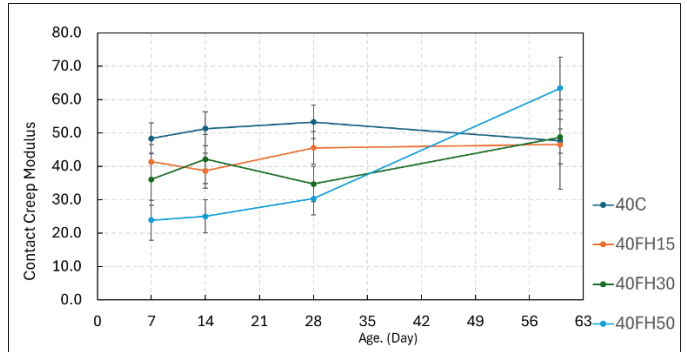


รูปที่ 21. (ก) ค่า Contact Creep Modulus ของซีเมนต์ผสมผงเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง W/B 0.55

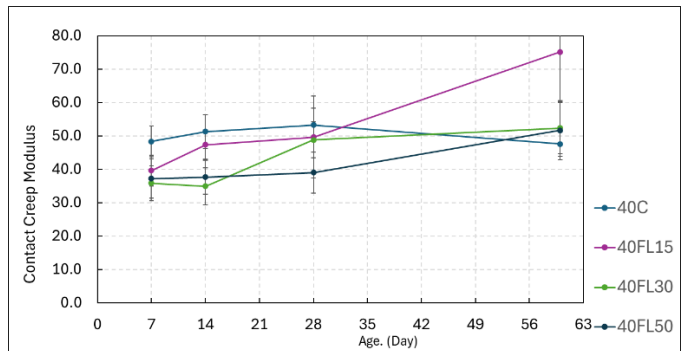


รูปที่ 21. (ข) ค่า Contact Creep Modulus ของซีเมนต์ผสมผงเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ W/B 0.55

จากการทดสอบโมดูลัสการคืบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าโมดูลัสการคืบที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมยกเว้นซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่ร้อยละ 50 และ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่ร้อยละ 15 ที่อายุตัวอย่าง 60 วัน ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีแนวโน้มสูงชันตามอายุตัวอย่างที่มากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 21 ค. และรูปที่ 21 ง.)



รูปที่ 21. (ค) ค่า Contact Creep Modulus ของซีเมนต์ผสมผงเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง W/B 0.40



รูปที่ 21. (ง) ค่า Contact Creep Modulus ของซีเมนต์ผสมผงเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ W/B 0.40

5.สรุปผลการทดลอง

1) โครงประเภท Interlayer space และ gel pores มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุตัวอย่าง

2) การผสมเถ้าถ่านหินในสัดส่วนร้อยละ 15 ส่งผลให้ปริมาณโครงประเภท interlayer space และ gel pores ในซีเมนต์เพสต์มีค่ามากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ขณะที่โครงข่ายขนาดใหญ่ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีปริมาณน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน

3) การผสมเถ้าถ่านหินในสัดส่วนร้อยละ 50 ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาณโครงข่ายทั้งหมด และโครงข่ายขนาดใหญ่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน เมื่อเปรียบเทียบในช่วงอายุที่เท่ากัน

4) ปริมาณน้ำที่สามารถระเหยได้และความจุปริมาณน้ำของตัวอย่างลดลงตามอายุตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น

5) การผสมเถ้าถ่านหินส่งผลให้ความจุปริมาณน้ำของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเถ้าถ่านหิน

6) ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีความหนาแน่นมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

7) ที่อายุ 60 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีค่าโมดูลัสคืบคานต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม ยกเว้น 40FL50 มีค่าโมดูลัสคืบคานสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน



8) ค่าความแข็งแรงอินเดนเทนชันมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุตัวอย่างและการผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำร้อยละ 15 ทำให้ค่าความแข็งแรงอินเดนเทนชันสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 60 วัน

9) โมดูลัสการคืบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหิน มีค่าโมดูลัสการคืบต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ซึ่งผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม ยกเว้น 40FH15 มีค่าโมดูลัสการคืบสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ผู้ให้คำปรึกษาโครงการและคำแนะนำจนโครงการเสร็จสิ้นและขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่เอื้อเฟื้อ สถานที่ อุปกรณ์และทุนอุดหนุนโครงการ สำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ippei Maruyama, Yukiko Nishioka, Go Igarashi, Kunio Matsui
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างจุลภาคและมวลรวมในปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้งครั้งแรก
- [2] Shatabdi Mallicka, M.B. Anoopb, K. Balaji Raob
การเคลื่อนตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอย - การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทนชัน



การประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

โดยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

Evaluation of the Degree of Reaction of Calcium Carbide Residue Mixed with Low-Calcium Fly Ash by the Selective Dissolution Method

พริญา พอค้า^{1*} ภิรัช แสงคำ² สุธัตตา เวชศาสตร์³ และ ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ⁴^{1,2,3} นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*Corresponding author; E-mail address: 65102712@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำโดยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน Selective dissolution โดยเลือกใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และทำการหล่อเพลสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ในอัตราส่วนร้อยละ 20:80, 30:70 และ 40:60 โดยน้ำหนัก ก่อนการทดสอบระดับการเกิดปฏิกิริยาต้องทำการหยุดการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และทำการทดสอบระดับการเกิดปฏิกิริยาที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน รวมไปถึงนำเสนอสมการที่ใช้ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ผลการทดสอบ พบว่า การใช้กรดไฮดรอกลิกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สมการที่ใช้ประเมินการเกิดปฏิกิริยาให้ผลการทดสอบที่สมเหตุสมผลนั้นคือระดับการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอายุของเพลสต์ อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินร้อยละ 30:70 ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงสุดทุกอายุ ขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า 0.35

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ, ระดับการเกิดปฏิกิริยา, วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

Abstract

This research aims to evaluate the degree of reaction of carbide lime residue blended with low-calcium fly ash using the selective dissolution method. Three different types of solvents were employed, and paste specimens were prepared with water-to-binder ratios of 0.35 and 0.45. The blending ratios of carbide lime residue to low-calcium fly ash were 20:80, 30:70, and 40:60 by weight. Prior to the degree of reaction test, the pozzolanic reaction was terminated, and the degree of reaction was determined at 1, 3, 7, 14, and 28 days. In addition, the equation used to evaluate the degree of reaction was

presented. The results indicated that hydrochloric acid combined with salicylic acid and methanol was the most effective solvent. The equation used to evaluate the degree of reaction yielded reasonable and consistent results, showing that the degree of reaction increased with curing time. The blending ratio of 30:70 (carbide lime residue to low-calcium fly ash) exhibited the highest degree of reaction at all ages. Moreover, a water-to-binder ratio of 0.45 resulted in a higher degree of reaction than that of 0.35.

Keywords : carbide lime residue, low-calcium fly ash, degree of reaction, selective dissolution method

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ถือเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนของอุตสาหกรรมก่อสร้างกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งโดยมีคุณสมบัติสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (hydration) ทำให้เกิดความร้อนและสารละลายต่าง หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการใช้งาน

การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้อง ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ของทั้ง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และ เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำอย่างถูกต้องและแม่นยำ การประเมินนี้ช่วยให้สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม



ควบคุมสมบัติการแข็งตัว และพัฒนาส่วนผสมที่ตอบสนองความต้องการใช้งานในทางวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

วิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วน เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการแยกและประเมินปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน โดยสามารถปรับตัวทำลายให้เหมาะสมกับวัสดุผสมแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การควบคุมขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เช่น การใช้เทคนิคหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน ยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบและทำให้ผลลัพธ์สะท้อนสมบัติจริงของวัสดุได้อย่างแม่นยำ

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีความสำคัญต่อทั้งในเชิงวิชาการและอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและการเกิดปฏิกิริยาในระยะเริ่มต้นของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหินแคลเซียมต่ำซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และตอบสนองความต้องการใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสมและยั่งยืน.

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหินแคลเซียมต่ำในช่วงอายุเริ่มต้น 1, 3, 7, 14, และ 28 วัน
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วน โดยใช้องค์ประกอบของตัวทำลายต่าง ๆ ได้แก่ (การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอล, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับน้ำ, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับเมทานอล) เพื่อหาตัวทำลายที่ดีที่สุด
3. เพื่อวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนการผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : ถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วัสดุศึกษา: การศึกษานี้มุ่งเน้นที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับถ่านหินแคลเซียมต่ำ อัตราส่วนการผสม: การทดสอบในอัตราส่วน กากแคลเซียมคาร์ไบด์:ถ่านหินแคลเซียมต่ำ เท่ากับ 20:80, 30:70, และ 40:60 ตามน้ำหนัก น้ำต่อวัสดุประสาน : ใช้อัตราส่วน W/B = 0.35 และ 0.45 อายุการศึกษา: ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาในช่วงอายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน วิธีการศึกษา: ใช้วิธี Selective Dissolution พร้อมการควบคุมขั้นตอน Stop Hydration เพื่อหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำ ตัวทำลายละลาย: เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวทำลายสามประเภท ได้แก่ การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอล, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับน้ำ, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับเมทานอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การให้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำเกี่ยวกับ ระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านหินแคลเซียมต่ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ ข้อมูลดังกล่าวช่วยสนับสนุนการ กำหนดอัตราส่วนการ

ผสมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติทางวิศวกรรมตรงตามความต้องการ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และความเสถียรของโครงสร้าง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือ วัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) หรืออะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในรูปที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อมีน้ำเป็นตัวกลาง ส่งผลให้เกิดสารประกอบที่มีสมบัติเป็น (C-S-H) หรือ Calcium Silicate Hydrate) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต

การใช้ถ่านหินแคลเซียมต่ำในวัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเชิงปฏิกิริยาน้อย การผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับถ่านหินแคลเซียมต่ำ สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาซิลิเกต-แคลเซียมและเพิ่มคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม การเกิดปฏิกิริยาจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมและน้ำต่อวัสดุประสาน

การเลือก ตัวทำลายละลาย ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเฟสต่าง ๆ ในวัสดุผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับถ่านหินแคลเซียมต่ำมีความสามารถในการละลายไม่เท่ากัน หากใช้ตัวทำลายที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ตรงกับความจริง เช่น ละลายได้ไม่หมด หรือไปละลายเฟสที่ไม่ต้องการ

ทฤษฎีวิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วนเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงเคมีที่ใช้ตัวทำลายเฉพาะเพื่อ ละลายเฉพาะเฟสที่เกิดปฏิกิริยา โดยไม่ทำลายเฟสที่ไม่ตอบสนอง วิธีนี้ช่วยให้สามารถประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ของวัสดุได้อย่างแม่นยำ การเลือกตัวทำลายและการควบคุมขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เช่น Stop Hydration มีผลต่อความถูกต้องและความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ โดยมีสมการทางเคมีดังนี้ :

$$\alpha = \left[\frac{100fp_f - R_b + cp_c}{100fp_f} \right] \times 100$$

f = สัดส่วนมวลของเถ้าลอย (FA) ในส่วนผสมแห้งเริ่มต้น

p_f = สัดส่วนมวลของเถ้าลอย (FA) ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย

R_b = มวลของสารตกค้างจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอย (FA blended paste)

c = สัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในส่วนผสมแห้งเริ่มต้น

p_c = สัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย (CCR paste)

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า มีเศษส่วนมวลของเถ้าลอย ในสารยึดเกาะแห้งเริ่มต้น และมีเศษส่วนมวลของเถ้าลอย ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย มวลของกากที่เหลือจากเฟสผสมเถ้าลอย และสัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในส่วนผสมแห้งเริ่มต้น รวมไปถึงมวลของสารตกค้างจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ทฤษฎีการประเมินอัตราการเกิดปฏิกิริยาการวัด ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมแต่ละอัตราส่วนและตัวทำลาย การประเมินอัตราการ



เกิดปฏิกิริยาที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบส่วนผสมวัสดุก่อสร้างที่ต้องการคุณสมบัติทางกลและการตอบสนองของวัสดุที่เหมาะสม

แนวคิดการประยุกต์ใช้ การเข้าใจปฏิกิริยา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหิน แคลเซียมต่ำและการเลือกวิธี วิธีการเลือกกลายเฉพาะส่วน จะช่วยให้สามารถพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ของเสียอุตสาหกรรมอย่างคุ้มค่า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิศาจันต์ กรัฒนาร และคณะ 2539 [1] นำส่วนผสมของวัสดุประสาน ระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับถ่านหินในอัตราร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงถึง 209 กก/ซม² และยังแนะนำว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และการเพิ่มปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมดังกล่าว

สุทธินันท์ แอเดียและคณะ 2554 [2] ได้ศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหิน ในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง พบว่าคอนกรีตดังกล่าวมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้ CR:FN มีการพัฒนากำลังอัดกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR:FN เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

อัครเดช ศรีเสน และคณะ 2557 [3] ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสม ถ่านหินในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นบดจนมีความละเอียด ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมผสมถ่านหิน มีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และมีกำลังพัฒนาช่วงต้นช้า กว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามที่อายุ 90 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูง ถึง 359 กก/ซม² โดยไม่มีปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลการต้านทานการแทรกซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการซัดสีพบว่าค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตควบคุมเมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

ดร. วราภรณ์ แสงสร้อย ศ. ดร. สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนาชาตีสรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์[4] วิธี เศรษฐ์ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่ได้นำเสนอสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมถ่านหินที่แข็งตัวแล้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการหาสาเหตุกำลังรับแรงอัดต่ำของตัวอย่างคอนกรีตได้จากการตรวจสอบถ่วง ในคอนกรีตดังที่ได้นำกล่าวถึงไปแล้ว นั้นสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมีถ่านหินเป็นส่วนผสมซึ่งถ่านหินนั้นมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ นั้นมาจากการใช้ ถ่านหินที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพอย่าง เพียงพอ นอกจากนี้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากและร้อยละ การแทนที่ถ่านหินที่มากเกินไปส่งผลให้ คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำด้วยเช่นกัน

3.วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานมีความชื้นอยู่มากจึงต้องนำไปอบให้แห้งเพื่อลดความชื้นจากนั้นบดจนมีอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10

ถ่านหิน : จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีระบบการเผาแบบ Pulverized Coal ใช้คุณสมบัติการเผาอยู่ในช่วง 1,000 - 1,400 องศาเซลเซียสโดยเลือกใช้ถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าบีแอลซีพีจ.ระยองใช้สัญลักษณ์(BLCP)เป็นถ่านหินแคลเซียมต่ำโดยคุณภาพของวัสดุต้องผ่านมาตรฐาน ASTM 618[6]ระบุไว้ว่าจำนวนถ่านหินที่ค้ำบดตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

น้ำ DI (Deionized Water) : น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

3.2 การทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 1 การทดสอบวัสดุและวิธีการทดสอบ

การทดสอบ	วิธีการทดสอบ
ความกว้างจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ่านหิน	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [5]
การทดสอบความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ่านหิน โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร (#325)	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] (สำหรับหาความละเอียดของวัสดุผงชนิดอื่นๆ)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความกว้างจำเพาะ	อนุภาคค้ำบดตะแกรงเบอร์ 325 (%)
กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด	2.42	9
ถ่านหินแม่เมาะ	2.49	30
ถ่านหินบีแอลซีพี	2.16	27

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างเพสต์ในงานวิจัยนี้ ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20:80 , 30:70 , 40:60 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานที่ปราศจากซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ก่อนการผสม ตัวอย่างส่วนผสมทั้งหมดต้องเก็บอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เริ่มต้นจากใช้เครื่องผสมแบบใบพายกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นย้ายเพสต์สดเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิและปิดฝาภาชนะด้วยฟิล์มถนอมอาหารเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากส่วนผสม แล้วกวนเพสต์ที่ยังเหลวด้วยมือทุก 30 นาที เพื่อให้ส่วนผสมที่เริ่มออกมานับเนื้อเพสต์ผสมกับเนื้อเพสต์ทั้งหมดและลดผลกระทบจากการเย็นน้ำ จนเนื้อของเพสต์มีลักษณะเป็นครีม แล้วเทส่วนผสมลงแบบหล่อตัวอย่าง โดยแบบหล่อตัวอย่างจะเป็นแบบหล่อในท่อที่ทำมาจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อประมาณ 16 มม. ความสูงเป็นสองเท่า



ของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มม. จากนั้นนำแบบหล่อวางอยู่บนโต๊ะสั่น เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในเนื้อของเพสต์จากนั้นใช้ฟิล์มถนอมอาหารพันแบบหล่อ เพื่อให้เพสต์อยู่ในสภาวะปิดผนึก ทำการถอดแบบหล่อ 7 วันหลังจากวันผสม บ่มตัวอย่าง เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเก็บตัวในรูปแบบปิดทึบ เพื่อรอทดสอบที่อายุ 1,3,7, 14 และ 28 วัน

การศึกษานี้ได้ออกแบบปริมาณส่วนผสมของวัสดุที่รวมกันทั้งหมดในการหล่อ ตัวอย่างนี้เท่ากับ 700 กรัม กำหนดให้อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมกับฉ่ำ ถ่านหินไว้ที่ (20:80 , 30:70 , 40:60)

โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35, 0.45 (สำหรับอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานของตัวควบคุม) แสดงดังตาราง 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสม

Mixes	ปริมาณของ วัสดุ			w/b
	CR (g)	BLCP (g)	Water (g)	
35CR20L	172.65	690.62	302.15	0.35
35CR30L	259.32	605.07	302.54	0.35
35CR40L	346.20	519.31	302.93	0.35
45CR20L	230.81	614.80	345.82	0.45
45CR20L	230.81	538.57	346.22	0.45
45CR20L	308.11	462.16	346.62	0.45

**หมายเหตุ 35CR20L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (20:80)

35CR30L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (30:70)

35CR40L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (40:60)

45CR20L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (20:80)

45CR30L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (30:70)

45CR40L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (40:60)

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน

การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุผสมซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์หรือ ส่วนผสมอื่นๆทำปฏิกิริยากับน้ำการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องหลังจากเวลาที่กำหนด จะส่งผลให้ปริมาณเพสต์เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทำให้การวัดระดับการเกิดปฏิกิริยา หรือปริมาณเพสต์ที่ตอบสนองในช่วงอายุที่สนใจไม่แม่นยำ ดังนั้นการการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยให้คงสภาพตัวอย่างในช่วงเวลาที่ต้องการ เช่น อายุ 1, 3, 7, 14, 28 วัน เพื่อให้การวัดสะท้อนความเป็นจริงของปฏิกิริยาในเวลานั้น ๆ และลดความคลาดเคลื่อน ของผลการทดสอบ ทำให้ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนถูกต้อง และสม่ำเสมอมาเรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสมต่างๆได้ชัดเจน เพราะ ทุกตัวอย่างถูกหยุดปฏิกิริยาในช่วงเวลาที่เท่ากัน

การทดสอบ เตรียมตัวอย่างตามอายุที่ต้องการกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับฉ่ำ ถ่านหินแคลเซียมต่ำตัวอย่างจะถูกบ่มน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนและตามเวลาที่กำหนด เช่น อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28วันในช่วงเวลานั้น ตัวอย่างจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตามปกติการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานนำตัวอย่างออกจากสภาพแวดล้อมปกติ และนำมา บดด้วยโกรนบดยาหินโมรา Agate Mortar(ดังรูปที่1) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 นำไป ใส่บีกเกอร์ (Isopropyl Alcohol : IPA) แล้วนำฟิล์มถนอมอาหารปิดปากบีกเกอร์ ซึ่งการ แช่ในตัวทำละลายจะช่วย หยุดการไฮเดรชันทันที เพราะน้ำซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาจะ

ถูกละลายและทำให้ปฏิกิริยาหยุดชั่วคราว ครบเวลารองผ่านชุดกรอง (ดังรูปที่2) และทำ ให้ตัวอย่างแห้งอย่างรวดเร็ว นำตัวอย่างกลับมาใส่บีกเกอร์แล้วเท IPA แช่ไว้ 6 ชั่วโมง ครบ เวลานำไปกรองผ่านชุดกรองอีกครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างใส่ Cap Cell แล้วVacuum 1 ชั่วโมง(ดังรูปที่3) นำใส่ตู้ 11 % ไม่ปิดฝาทิ้งไว้ 7 วันแล้วปิดฝาสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อ ด้วยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนเพื่อประเมิน Degree of Reaction (DOR)



รูปที่1 โกรนบดยาหินโมรา Agate Mortar



รูปที่2 ชุดเครื่องกรอง



รูปที่3 ชุดVacuum

3.4.2 วิธีการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม

การเลือกตัวทำละลาย ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะ เพสต์ต่างๆ ในวัสดุ ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับฉ่ำถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีความสามารถในการละลายไม่ เท่ากัน หากใช้ตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ตรงกับความจริง เช่น ละลายได้ไม่หมด หรือไปละลายเพสต์ที่ไม่ต้องการ ทดเพื่อหาตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพ สูงสุด หาตัวทำละลายที่เหมาะสมจะละลายเฉพาะ เพสต์ที่เกิดปฏิกิริยา ได้อย่างแม่นยำ



โดยไม่ทำลายเฟสที่เลื้อยหรือตอบสนองช้า เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ยังเลือกตัวทำละลายได้เหมาะสมเท่าใด ค่าที่วัดได้ก็จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมกับงานวิจัย หากต้องการเพียงข้อมูลพื้นฐาน อาจใช้ตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพต่ำได้ แต่หากต้องการ ความแม่นยำสูงสุด จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูง เพื่อสร้างมาตรฐานการวิเคราะห์สำหรับ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ การทดลองกับการเลือกละลายเฉพาะส่วนหลายชนิดช่วยให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละแบบ สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประเภทงาน

การทดสอบมีดังนี้ : 1. HCL + Salicylic acid + Methanol อัตราส่วน 41.70ml : 50mg : 800 mL ตัวอย่าง CR 2 g+ Solvent 200 mL กวน 30 นาที
2. HCL + Water อัตราส่วน 50: 1000 mL ตัวอย่าง CR 1 g+ Solvent 250 mL กวน 30 นาที และ 3 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4)
3. HCL + Methanol Water อัตราส่วน 50 : 1000 mL ตัวอย่าง CR 2 g+ Solvent 200 mL กวน 30 นาที



รูปที่4 ตัวอย่าง Solvent HCL + Water ที่ผสมแล้ว

3.4.3 วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

การทดสอบ วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน เพื่อแยกและประเมินปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาสามารถแยกความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ชัดเจน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะของส่วนผสมและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาวิธีประเมินคุณภาพวัสดุก่อสร้าง

การทดสอบ เลือกใช้ การใช้กรดไฮโดรคลอริกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างที่ทำ Stop Hydration นำมาบดด้วยโกร่งบดยาหินโมรา Agate Mortar (ดังรูปที่ 1) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 120 ซึ่งตัวอย่าง 2.0 ± 0.02 g 1 เซ็ตใช้ 3 ตัวอย่าง ซึ่งกระดาศกรองและจวนแก้ว เท Solvent ใส่ปิกเกอร์ 200 mL วางบนเครื่องกวนสาร ใส่ Magnetic stir bar ลงในปิกเกอร์ วางให้อยู่ตรงกลาง เปิดเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก Magnetic Stirrer ไปที่ประมาณ 750 rpm ค่อยๆเทตัวอย่างแล้วใช้จวนแก้วปิดปิกเกอร์ จับเวลา 30 นาที ประมาณทุก 15 นาทีทำอันถัดไป ครบ 30 นาที นำออกมาพัก 5 นาที ครบเวลานำไปกรองกับชุดกรองสาร แล้วนำไปอบ 24 ชั่วโมง บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าระดับการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่5 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก Magnetic Stirrer

4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน



รูปที่6 ตัวอย่างที่ถูกการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

4.1.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

(ดังรูปที่ 6) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุ เช่น กากแคลเซียมคาร์ไบด์หรือวัสดุผสมอื่นๆ ทำปฏิกิริยากับน้ำ หากปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ หลังจากเวลาที่กำหนดปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้การวัดผลวัดระดับการเกิดปฏิกิริยา ในช่วงอายุที่สนใจหาความแม่นยำ

การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงมีประโยชน์ในการคงสภาพตัวอย่างในช่วงเวลาที่ต้องการ (เช่น อายุ 1, 3, 7, 14, 28 วัน) และลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ทำให้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วย วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนถูกต้อง สม่ำเสมอ และเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน

4.2 การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม

การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ เนื่องจากเฟสต่าง ๆ ในวัสดุผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีสมบัติการละลายแตกต่างกัน หากเลือกตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาด เช่น เฟสบางชนิดละลายได้ไม่หมด และเฟสที่ไม่ต้องการกลับถูกละลายออกมา การหาตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้สามารถละลายเฉพาะเฟสที่เกิดปฏิกิริยา โดยไม่กระทบต่อเฟสที่ตอบสนองช้าซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา



ตารางที่ 4 ผลการประเมินการทำละลายแบบเลือกส่วน แสดงเป็นค่าปริมาณสารที่เหลืออยู่ วัสดุตกค้าง (residue) ในหน่วยร้อยละของมวลเริ่มต้น

Solvent	HCL+ Salicylic+ Methanon	HCL+WATER		HCL+ Methanol
	30 min	30 min	3 hr	30 min
CR	0.82	0.18	0.20	0.41
FA-BLCP	98.24	94.4	91.64	95.19

4.2.1 HCL + Salicylic acid + Methanol ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถประเมินเฟสที่ตอบสนองได้เกือบทั้งหมด ($R\% > 98\%$) เหมาะสำหรับงานวิจัยที่ต้องการความแม่นยำสูง

4.2.2 HCL + Water ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเหมาะสำหรับละลายเฟสที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น

4.2.3 HCL + Methanol ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพปานกลางถึงสูง ให้ผลที่แม่นยำและสม่ำเสมอกว่า HCL + Water

4.3 การทดสอบวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน (Selective Dissolution Test)

4.3.1 ทดสอบวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน โดยใช้ตัวทำละลาย HCL + Salicylic acid + Methanol สามารถแยกเฟสที่เกิดปฏิกิริยาออกจากเฟสเฉื่อยได้อย่างแม่นยำ ทำให้การคำนวณ ระดับการเกิดปฏิกิริยา มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ เหมาะสำหรับการวิจัยและประเมินคุณภาพวัสดุก่อสร้างที่ต้องการความแม่นยำสูง

4.3.2 คำนวณระดับการเกิดปฏิกิริยา

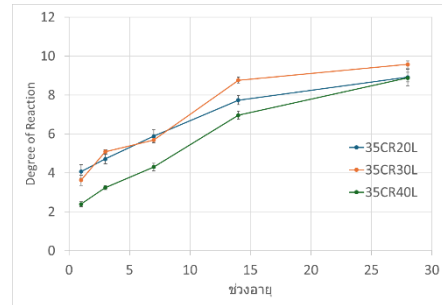
จากรูปที่ 7 $W/B=0.35$ (35CR20L, 35CR30L, 35CR40L) แนวโน้มทุกชุดแสดงผลการเกิดปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ยืนยันว่าปฏิกิริยา ปอซโซลานดำเนินต่อไปเรื่อยๆ 35CR30L ให้ผลระดับการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดเกือบทุกอายุ โดยเฉพาะวันที่ 7-28 วันแสดงถึงการตอบสนองต่อปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด 35CR20L ผลต่ำลงมา ส่วน 35CR40L ผลต่ำสุด แต่ได้ตามขึ้นมาในระยะยาว

สรุป : การเพิ่มกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ถึง 30% ช่วยเสริมการเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มเกิน (40%) จะเกิดการชะลอตัวในช่วงต้น

จากรูปที่ 8 $W/B=0.45$ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (45CR20L, 45CR30L, 45CR40L) ผลการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสามชุดเพิ่มขึ้นตามอายุเช่นกัน 45CR30L มีผลการเกิดปฏิกิริยา สูงที่สุดชัดเจนในช่วง 7-14 วัน และคงที่ค่อนข้างสูงในช่วงปลาย (~28 วัน) 45CR40L มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง แม้เริ่มต้นต่ำกว่า แต่สามารถพัฒนาได้ดีในระยะยาวจนใกล้เคียงกับ 45CR30L, 45CR20L ให้ผลต่ำสุดในเกือบทุกช่วงเวลา

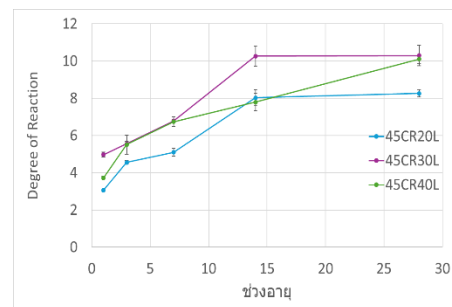
สรุป : เช่นเดียวกับสัดส่วน 35% การใช้ 30% กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ให้ผลดีที่สุดต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อเพิ่มเป็น 40% แม้ช่วงแรกต่ำกว่าแต่ในระยะยาว (~28 วัน) มีศักยภาพใกล้เคียงกับ 30%

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างเฟสดีที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่อายุ 290 วันจากตัวอย่างที่มี $W/B=0.35$ และ $W/B=0.40$ โดยที่ใช้อัตราส่วน CCR:LCA ที่อัตราส่วน 30:70 พบว่าที่ 290 วัน ผลการเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 30 และ 40 ตามลำดับ ดังนั้น สมการนี้และวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีอายุมากขึ้นได้



$W/B=0.35$

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างอายุของวัสดุปอซโซลาน 28 วัน ของ 35CR20L, 35CR30L, 35CR40L



$W/B=0.45$

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างอายุของวัสดุปอซโซลาน 28 วัน ของ 45CR20L, 45CR30L, 45CR40L

5 สรุป

1. กรดไฮโดรคลอริกผสมกับกรดซาลิไซลิกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุด เพราะสามารถละลายกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้เกือบทั้งหมด และละลายเถ้าถ่านหินได้เพียงเล็กน้อย
2. สมการที่ใช้ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยามีความสมเหตุสมผล โดยระดับการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอายุของเฟส
3. อัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงที่สุดทุกอายุการทดสอบ
4. เฟสดีที่มีอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ให้ค่าระดับการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสาน 0.35

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยาสำหรับทุนอุดหนุนโครงการทางวิศวกรรมรวมถึงความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์สถานที่และต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์สุวรรณภูมิ วิชาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างยิ่งที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนโครงการเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติศานต์ กรั้วมาตร(2539).การศึกษาส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และ
- [2] เถ้าถ่านหินเพื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีต.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] สุทธินันท์ แอเดียว วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554).กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 34-42.
- [4] อัครเดช ศรีเสน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2557).สมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน.วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้า165-175.
- [5] ณัฐพงศ์ มกระธัช(2557).การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุ
- [6] ประสานเพื่อทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูง.วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 106-120.
- [7] ดร.วรางคณา แสงสร้อย ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา(CONTEC)สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของเถ้าลอยคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
- [8] American Society of Testing and Materials. ASTM C 188 - 17, 2023, "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", pp.1-2.
- [9] American Society of Testing and Materials. ASTM C618 - 22, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", pp.1-3.
- [10] American Society of Testing and Materials. ASTM C 430 - 96, "Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve".
- [11] Feldman, R. F., & Sereda, P. J. (1969). A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorptionlength change and mechanical properties. Materials and Structures, 1, pp.509-520.
- [12] Nagamatsu, S., Sato, Y., and Ohtsune, Y. (1992). Relationship between degree of drying and drying shrinkage strain of hardened cement paste. Journal of Struct. Constr., pp.13 21.
- [13] Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., and Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcoming, and Solutions. ACI Materials Journal, 118(147), pp.147-159.
- [14] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement and Concrete Composites, 27(4), pp.425-428.



การประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

โดยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

Evaluation of the Degree of Reaction of Calcium Carbide Residue Mixed with Low-Calcium Fly Ash by the Selective Dissolution Method

พริญา พอค้า^{1*} ภิรัช แสงคำ² สุธัตตา เวชศาสตร์³ และ ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ⁴^{1,2,3} นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*Corresponding author; E-mail address: 65102712@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำโดยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน Selective dissolution โดยเลือกใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และทำการหล่อเพลสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ในอัตราส่วนร้อยละ 20:80, 30:70 และ 40:60 โดยน้ำหนัก ก่อนการทดสอบระดับการเกิดปฏิกิริยาต้องทำการหยุดการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และทำการทดสอบระดับการเกิดปฏิกิริยาที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน รวมไปถึงนำเสนอสมการที่ใช้ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ผลการทดสอบ พบว่า การใช้กรดไฮดรอกลิกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สมการที่ใช้ประเมินการเกิดปฏิกิริยาให้ผลการทดสอบที่สมเหตุสมผลนั้นคือระดับการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอายุของเพลสต์ อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินร้อยละ 30:70 ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงสุดทุกอายุ ขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า 0.35

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ, ระดับการเกิดปฏิกิริยา, วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

Abstract

This research aims to evaluate the degree of reaction of carbide lime residue blended with low-calcium fly ash using the selective dissolution method. Three different types of solvents were employed, and paste specimens were prepared with water-to-binder ratios of 0.35 and 0.45. The blending ratios of carbide lime residue to low-calcium fly ash were 20:80, 30:70, and 40:60 by weight. Prior to the degree of reaction test, the pozzolanic reaction was terminated, and the degree of reaction was determined at 1, 3, 7, 14, and 28 days. In addition, the equation used to evaluate the degree of reaction was

presented. The results indicated that hydrochloric acid combined with salicylic acid and methanol was the most effective solvent. The equation used to evaluate the degree of reaction yielded reasonable and consistent results, showing that the degree of reaction increased with curing time. The blending ratio of 30:70 (carbide lime residue to low-calcium fly ash) exhibited the highest degree of reaction at all ages. Moreover, a water-to-binder ratio of 0.45 resulted in a higher degree of reaction than that of 0.35.

Keywords : carbide lime residue, low-calcium fly ash, degree of reaction, selective dissolution method

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ถือเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนของอุตสาหกรรมก่อสร้างกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งโดยมีคุณสมบัติสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (hydration) ทำให้เกิดความร้อนและสารละลายต่าง หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการใช้งาน

การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้อง ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ของทั้ง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และ เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำอย่างถูกต้องและแม่นยำ การประเมินนี้ช่วยให้สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม



ควบคุมสมบัติการแข็งตัว และพัฒนาส่วนผสมที่ตอบสนองความต้องการใช้งาน ในทางวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

วิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วน เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการแยกและประเมิน ปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน โดยสามารถปรับตัวทำลายให้เหมาะสม กับวัสดุผสมแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การ ควบคุมขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เช่น การใช้เทคนิคหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน ยัง ช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบและทำให้ผลลัพธ์สะท้อนสมบัติจริงของวัสดุ ได้อย่างแม่นยำ

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีความสำคัญต่อทั้งในเชิงวิชาการและอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและการเกิดปฏิกิริยาในระยะเริ่มต้นของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหินแคลเซียมต่ำซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ ออกแบบและพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และตอบสนองความต้องการใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสมและยั่งยืน.

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมถ่านหิน แคลเซียมต่ำในช่วงอายุเริ่มต้น 1, 3, 7, 14, และ 28 วัน
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วน โดยใช้ องค์ประกอบของตัวทำลายต่าง ๆ ได้แก่ (การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับกรดซัลฟิวริก และเมทานอล, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับน้ำ, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับเมทานอล) เพื่อหาตัวทำลายที่ดีที่สุด
3. เพื่อวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนการผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : ถ่านหินและ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วัสดุศึกษา: การศึกษานี้มุ่งเน้นที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับถ่านหิน แคลเซียมต่ำ อัตราส่วนการผสม: การทดสอบในอัตราส่วน กากแคลเซียมคาร์ไบด์:ถ่านหิน แคลเซียมต่ำ เท่ากับ 20:80, 30:70, และ 40:60 ตามน้ำหนัก น้ำต่อวัสดุประสาน : ใช้ อัตราส่วน W/B = 0.35 และ 0.45 อายุการศึกษา: ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยาในช่วง อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน วิธีการศึกษา: ใช้วิธี Selective Dissolution พร้อมการ ควบคุมขั้นตอน Stop Hydration เพื่อหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานที่อาจส่งผลกระทบต่อความ แม่นยำ ตัวทำลายละลาย: เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวทำลายสามประเภท ได้แก่ การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอล, การใช้กรดไฮดรอกซิลิก ผสมกับน้ำ, การใช้กรดไฮดรอกซิลิกผสมกับเมทานอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การให้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำเกี่ยวกับ ระดับการเกิดปฏิกิริยาของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านหินแคลเซียมต่ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา เทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ ข้อมูลดังกล่าวช่วยสนับสนุนการ กำหนดอัตราส่วนการ

ผสมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติทางวิศวกรรม ตรงตามความต้องการ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และความเสถียรของ โครงสร้าง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือ วัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) หรืออะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในรูปที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิด จากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อมีน้ำเป็นตัวกลาง ส่งผลให้เกิด สารประกอบที่มีสมบัติเป็น (C-S-H) หรือ Calcium Silicate Hydrate) ซึ่งช่วยเพิ่มความ แข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต

การใช้ถ่านหินแคลเซียมต่ำในวัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเชิง ปฏิกิริยาน้อย การผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับถ่านหินแคลเซียมต่ำ สามารถกระตุ้น ปฏิกิริยาซิลิเกต-แคลเซียมและเพิ่มคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม การเกิดปฏิกิริยาจะช้า หรือเร็วขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมและน้ำต่อวัสดุประสาน

การเลือก ตัวทำลายละลาย ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเฟสต่าง ๆ ในวัสดุ ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับถ่านหินแคลเซียมต่ำมีความสามารถในการละลายไม่ เท่ากัน หากใช้ตัวทำลายที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ตรงกับความจริง เช่น ละลายได้ไม่หมด หรือไปละลายเฟสที่ไม่ต้องการ

ทฤษฎีวิธีการเลือกกละลายเฉพาะส่วนเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงเคมีที่ใช้ตัวทำลาย เฉพาะเพื่อ ละลายเฉพาะเฟสที่เกิดปฏิกิริยา โดยไม่ทำลายเฟสที่ไม่ตอบสนอง วิธีนี้ช่วยให้ สามารถประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ของวัสดุได้อย่างแม่นยำ การเลือกตัวทำลาย และการควบคุมขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เช่น Stop Hydration มีผลต่อความถูกต้อง และความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ โดยมีสมการทางเคมีดังนี้ :

$$\alpha = \left[\frac{100fp_f - R_b + cp_c}{100fp_f} \right] \times 100$$

f = สัดส่วนมวลของเถ้าลอย (FA) ในส่วนผสมแห้งเริ่มต้น

p_f = สัดส่วนมวลของเถ้าลอย (FA) ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย

R_b = มวลของสารตกค้างจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอย (FA blended paste)

c = สัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในส่วนผสมแห้งเริ่มต้น

p_c = สัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย (CCR paste)

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่า มีเศษส่วนมวลของเถ้าลอย ในสารยึดเกาะแห้ง เริ่มต้น และ มีเศษส่วนมวลของเถ้าลอย ที่ไม่ละลายด้วยตัวทำลาย มวลของกากที่ เหลือจากเฟสผสมเถ้าลอย และสัดส่วนมวลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในส่วนผสมแห้ง เริ่มต้น รวมไปถึงมวลของสารตกค้างจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ทฤษฎีการประเมินอัตราการเกิดปฏิกิริยาการวัด ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการผสมแต่ละอัตราส่วนและตัวทำลาย การประเมินอัตราการ



เกิดปฏิกิริยาที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบส่วนผสมวัสดุก่อสร้างที่ต้องการคุณสมบัติทางกลและการตอบสนองของวัสดุที่เหมาะสม

แนวคิดการประยุกต์ใช้ การเข้าใจปฏิกิริยา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและการเลือกวิธี วิธีการเลือกกลายเฉพาะส่วน จะช่วยให้สามารถพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ของเสียอุตสาหกรรมอย่างคุ้มค่า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิศาจันต์ กรัฒนาร และคณะ 2539 [1] นำส่วนผสมของวัสดุประสาน ระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินในอัตราร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงถึง 209 กก/ซม² และยังแนะนำว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และการเพิ่มปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมดังกล่าว

สุทธินันท์ แอเดียและคณะ 2554 [2] ได้ศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง พบว่าคอนกรีตดังกล่าวมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้ CR:FN มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR:FN เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

อัครเดช ศรีเสน และคณะ 2557 [3] ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสม เถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นบดจนมีความละเอียด ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมผสมเถ้าถ่านหิน มีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และมีกำลังพัฒนาช่วงต้นช้า กว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามที่อายุ 90 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูง ถึง 359 กก/ซม² โดยไม่มีปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลการต้านทานการแทรกซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการซัดสีพบว่าค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตควบคุมเมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

ดร. วราภรณ์ แสงสร้อย ศ. ดร. สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนาซาติสิริธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์[4] วิธี เคารวะ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่ได้นำเสนอสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่แข็งตัวแล้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการหาสาเหตุกำลังรับแรงอัดต่ำของตัวอย่างคอนกรีตได้จากการตรวจสอบเถ้า ถอยในคอนกรีตดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว นั้นสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมีเถ้าถอยเป็นส่วนผสมซึ่งเถ้าถอยนั้นมีคุณภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ นั้นมาจากการใช้ เถ้าถอยที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพอย่าง เพียงพอ นอกจากนี้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากและร้อยละ การแทนที่เถ้าถอยที่มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำด้วยเช่นกัน

3.วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานมีความชื้นอยู่มากจึงต้องนำไปอบให้แห้งเพื่อลดความชื้นจากนั้นบดจนมีอนุภาคค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 10

เถ้าถ่านหิน : จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีระบบการเผาแบบ Pulverized Coal ใช้อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 1,000 - 1,400 องศาเซลเซียสโดยเลือกใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าบีแอลซีพีจ.ระยองใช้สัญลักษณ์(BLCP)เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำโดยคุณภาพของวัสดุต้องผ่านมาตรฐาน ASTM 618[6]ระบุไว้ว่าจำนวนเถ้าถ่านหินที่ค้ำบดตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

น้ำ DI (Deionized Water) : น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

3.2 การทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 1 การทดสอบวัสดุและวิธีการทดสอบ

การทดสอบ	วิธีการทดสอบ
ความกว้างจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหิน	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [5]
การทดสอบความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหิน โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร (#325)	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] (สำหรับหาความละเอียดของวัสดุผงชนิดอื่นๆ)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความกว้างจำเพาะ	อนุภาคค้ำบดตะแกรงเบอร์ 325 (%)
กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด	2.42	9
เถ้าถ่านหินแม่เกาะ	2.49	30
เถ้าถ่านหินบีแอลซีพี	2.16	27

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างเพสต์ในงานวิจัยนี้ ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20:80 , 30:70 , 40:60 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานที่ปราศจากซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ก่อนการผสม ตัวอย่างส่วนผสมทั้งหมดต้องเก็บอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เริ่มต้นจากใช้เครื่องผสมแบบใบพายกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นย้ายเพสต์สดเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิและปิดฝาภาชนะด้วยฟิล์มถนอมอาหารเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากส่วนผสม แล้วกวนเพสต์ที่ยังเหลวด้วยมือทุก 30 นาที เพื่อให้ส่วนผสมที่เริ่มออกมานับเนื้อเพสต์ผสมกับเนื้อเพสต์ทั้งหมดและลดผลกระทบจากการเย็นน้ำ จนเนื้อของเพสต์มีลักษณะเป็นครีม แล้วเทส่วนผสมลงแบบหล่อตัวอย่าง โดยแบบหล่อตัวอย่าง จะเป็นแบบหล่อในท่อที่ทำมาจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อประมาณ 16 มม. ความสูงเป็นสองเท่า



ของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มม. จากนั้นนำแบบหล่อวางอยู่บนโต๊ะสั่น เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในเนื้อของเพสต์จากนั้นใช้ฟิล์มถนอมอาหารพันแบบหล่อ เพื่อให้เพสต์อยู่ในสภาวะปิดผนึก ทำการถอดแบบหล่อ 7 วันหลังจากวันผสม บ่มตัวอย่าง เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเก็บตัวในรูปแบบปิดทึบ เพื่อรอทดสอบที่อายุ 1,3,7, 14 และ 28 วัน

การศึกษานี้ได้ออกแบบปริมาณส่วนผสมของวัสดุที่รวมกันทั้งหมดในการหล่อ ตัวอย่างนี้เท่ากับ 700 กรัม กำหนดให้อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมกับฉ่ำ ถ่านหินไว้ที่ (20:80 , 30:70 , 40:60)

โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35, 0.45 (สำหรับอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานของตัวควบคุม) แสดงดังตาราง 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสม

Mixes	ปริมาณของวัสดุ			w/b
	CR (g)	BLCP (g)	Water (g)	
35CR20L	172.65	690.62	302.15	0.35
35CR30L	259.32	605.07	302.54	0.35
35CR40L	346.20	519.31	302.93	0.35
45CR20L	230.81	614.80	345.82	0.45
45CR20L	230.81	538.57	346.22	0.45
45CR20L	308.11	462.16	346.62	0.45

**หมายเหตุ 35CR20L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (20:80)

35CR30L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (30:70)

35CR40L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (40:60)

45CR20L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (20:80)

45CR30L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (30:70)

45CR40L คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมฉ่ำถ่านหินบิแอลซีพี ในอัตราส่วน (40:60)

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน

การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุผสมซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์หรือ ส่วนผสมอื่นๆทำปฏิกิริยากับน้ำการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องหลังจากเวลาที่กำหนด จะส่งผลให้ปริมาณเพสต์เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทำให้การวัดระดับการเกิดปฏิกิริยา หรือปริมาณเพสต์ที่ตอบสนองในช่วงอายุที่สนใจไม่แม่นยำ ดังนั้นการการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยให้องค์สภาพตัวอย่างในช่วงเวลาที่ต้องการ เช่น อายุ 1, 3, 7, 14, 28 วัน เพื่อให้การวัดสะท้อนความเป็นจริงของปฏิกิริยาในเวลานั้น ๆ และลดความคลาดเคลื่อน ของผลการทดสอบ ทำให้ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนถูกต้อง และสม่ำเสมอมาเรียบเรียงเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสมต่างๆได้ชัดเจน เพราะ ทุกตัวอย่างถูกหยุดปฏิกิริยาในช่วงเวลาที่เท่ากัน

การทดสอบ เตรียมตัวอย่างตามอายุที่ต้องการกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับฉ่ำ ถ่านหินแคลเซียมต่ำตัวอย่างจะถูกบ่มน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนและตามเวลาที่กำหนด เช่น อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28วันในช่วงเวลานั้น ตัวอย่างจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตามปกติการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานนำตัวอย่างออกจากสภาพแวดล้อมปกติ และนำมา บดด้วยโกรนบดยาหินโมรา Agate Mortar(ดังรูปที่1) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 นำไป ใส่บีกเกอร์ (Isopropyl Alcohol : IPA) แล้วนำฟิล์มถนอมอาหารปิดปากบีกเกอร์ ซึ่งการ แช่น้ำตัวอย่างจะหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันทันที เพราะน้ำซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาจะ

ถูกละลายและทำให้ปฏิกิริยาหยุดชั่วคราว ครบเวลารองผ่านชุดกรอง (ดังรูปที่2) และทำ ให้ตัวอย่างแห้งอย่างรวดเร็ว นำตัวอย่างกลับมาใส่บีกเกอร์แล้วเท IPA แช่ไว้ 6 ชั่วโมง ครบ เวลานำไปกรองผ่านชุดกรองอีกครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างใส่ Cap Cell แล้วVacuum 1 ชั่วโมง(ดังรูปที่3) นำใส่ตู้ 11 % ไม่ปิดฝาทิ้งไว้ 7 วันแล้วปิดฝาสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อ ด้วยวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนเพื่อประเมิน Degree of Reaction (DOR)



รูปที่1 โกรนบดยาหินโมรา Agate Mortar



รูปที่2 ชุดเครื่องกรอง



รูปที่3 ชุดVacuum

3.4.2 วิธีการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม

การเลือกตัวทำละลาย ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะ เพสต์ต่างๆ ในวัสดุ ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับฉ่ำถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีความสามารถในการละลายไม่ เท่ากัน หากใช้ตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ตรงกับความจริง เช่น ละลายได้ไม่หมด หรือไปละลายเพสต์ที่ไม่ต้องการ ทดเพื่อหาตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพ สูงสุด หาตัวทำละลายที่เหมาะสมจะละลายเฉพาะ เพสต์ที่เกิดปฏิกิริยา ได้อย่างแม่นยำ



โดยไม่ทำลายเฟสที่เลื้อยหรือตอบสนองช้า เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา ยิ่งเลือกตัวทำละลายได้เหมาะสมเท่าใด ค่าที่วัดได้ก็จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมกับงานวิจัย หากต้องการเพียงข้อมูลพื้นฐาน อาจใช้ตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพต่ำได้ แต่หากต้องการ ความแม่นยำสูงสุด จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูง เพื่อสร้างมาตรฐานการวิเคราะห์สำหรับ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ การทดลองกับการเลือกละลายเฉพาะส่วนหลายชนิดช่วยให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละแบบ สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประเภทงาน

การทดสอบมีดังนี้ : 1. HCL + Salicylic acid + Methanol อัตราส่วน 41.70ml : 50mg : 800 mL ตัวอย่าง CR 2 g+ Solvent 200 mL กวน 30 นาที
2. HCL + Water อัตราส่วน 50: 1000 mL ตัวอย่าง CR 1 g+ Solvent 250 mL กวน 30 นาที และ 3 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4)
3. HCL + Methanol Water อัตราส่วน 50 : 1000 mL ตัวอย่าง CR 2 g+ Solvent 200 mL กวน 30 นาที



รูปที่4 ตัวอย่าง Solvent HCL + Water ที่ผสมแล้ว

3.4.3 วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

การทดสอบ วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน เพื่อแยกและประเมินปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาสามารถแยกความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ชัดเจน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะของส่วนผสมและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาวิธีประเมินคุณภาพวัสดุก่อสร้าง

การทดสอบ เลือกใช้ การใช้กรดไฮโดรคลอริกผสมกับกรดซัลฟิวริกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างที่ทำ Stop Hydration นำมาบดด้วยโกร่งบดยาหินโมรา Agate Mortar (ดังรูปที่ 1) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 120 ซึ่งตัวอย่าง 2.0 ± 0.02 g 1 เซ็ตใช้ 3 ตัวอย่าง ซึ่งกระดาศกรองและจางแก้ว เท Solvent ใส่ปิกเกอร์ 200 mL วางบนเครื่องกวนสาร ใส่ Magnetic stir bar ลงในปิกเกอร์ วางให้อยู่ตรงกลาง เปิดเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก Magnetic Stirrer ไปที่ประมาณ 750 rpm ค่อยๆเทตัวอย่างแล้วใช้จานแก้วปิดปิกเกอร์ จับเวลา 30 นาที ประมาณทุก 15 นาทีทำอันถัดไป ครบ 30 นาที นำออกมาพัก 5 นาที ครบเวลานำไปกรองกับชุดกรองสาร แล้วนำไปอบ 24 ชั่วโมง บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาค่าระดับการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่5 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก Magnetic Stirrer

4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน



รูปที่6 ตัวอย่างที่ถูกการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

4.1.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

(ดังรูปที่ 6) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุ เช่น กากแคลเซียมคาร์ไบด์หรือวัสดุผสมอื่นๆ ทำปฏิกิริยากับน้ำ หากปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ หลังจากเวลาที่กำหนดปริมาณเฟสที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้การวัดผลวัดระดับการเกิดปฏิกิริยา ในช่วงอายุที่สนใจหาความแม่นยำ

การหยุดปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงมีประโยชน์ในการคงสภาพตัวอย่างในช่วงเวลาที่ต้องการ (เช่น อายุ 1, 3, 7, 14, 28 วัน) และลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ทำให้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วย วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วนถูกต้อง สม่ำเสมอ และเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน

4.2 การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม

การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ เนื่องจากเฟสต่าง ๆ ในวัสดุผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีสมบัติการละลายแตกต่างกัน หากเลือกตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาด เช่น เฟสบางชนิดละลายได้ไม่หมด และเฟสที่ไม่ต้องการกลับถูกละลายออกมา การหาตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้สามารถละลายเฉพาะเฟสที่เกิดปฏิกิริยา โดยไม่กระทบต่อเฟสที่ตอบสนองช้าซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยา



ตารางที่ 4 ผลการประเมินการทำละลายแบบเลือกส่วน แสดงเป็นค่าปริมาณสารที่เหลืออยู่ วัสดุตกค้าง (residue) ในหน่วยร้อยละของมวลเริ่มต้น

Solvent	HCL+ Salicylic+ Methanon	HCL+WATER		HCL+ Methanol
	Stirring Time	30 min	3 hr	30 min
CR	30 min	0.82	0.18	0.20
FA-BLCP	30 min	98.24	94.4	91.64

4.2.1 HCL + Salicylic acid + Methanol ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถประเมินเฟสที่ตอบสนองได้เกือบทั้งหมด ($R\% > 98\%$) เหมาะสำหรับงานวิจัยที่ต้องการความแม่นยำสูง

4.2.2 HCL + Water ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเหมาะสำหรับละลายเฟสที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น

4.2.3 HCL + Methanol ผลการทดสอบ: มีประสิทธิภาพปานกลางถึงสูง ให้ผลที่แม่นยำและสม่ำเสมอกว่า HCL + Water

4.3 การทดสอบวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน (Selective Dissolution Test)

4.3.1 ทดสอบวิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน

วิธีการเลือกละลายเฉพาะส่วน โดยใช้ตัวทำละลาย HCL + Salicylic acid + Methanol สามารถแยกเฟสที่เกิดปฏิกิริยาออกจากเฟสเฉื่อยได้อย่างแม่นยำ ทำให้การคำนวณ ระดับการเกิดปฏิกิริยา มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ เหมาะสำหรับการใช้ในการวิจัยและประเมินคุณภาพวัสดุก่อสร้างที่ต้องการความแม่นยำสูง

4.3.2 คำนวณระดับการเกิดปฏิกิริยา

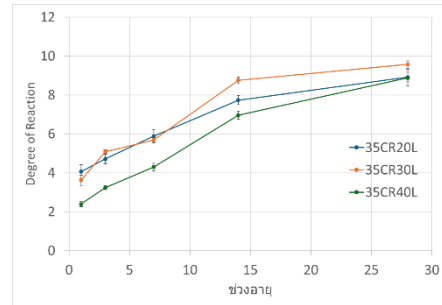
จากรูปที่ 7 $W/B=0.35$ (35CR20L, 35CR30L, 35CR40L) แนวโน้มทุกชุดแสดงผลการเกิดปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ยืนยันว่าปฏิกิริยา ปอซโซแลนดำเนินต่อไปเรื่อยๆ 35CR30L ให้ผลระดับการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดเกือบทุกอายุ โดยเฉพาะวันที่ 7-28 วันแสดงถึงการตอบสนองต่อปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด 35CR20L ผลต่ำลงมา ส่วน 35CR40L ผลต่ำสุด แต่ได้ตามขึ้นมาในระยะยาว

สรุป : การเพิ่มกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ถึง 30% ช่วยเสริมการเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มเกิน (40%) จะเกิดการชะลอตัวในช่วงต้น

จากรูปที่ 8 $W/B=0.45$ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (45CR20L, 45CR30L, 45CR40L) ผลการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสามชุดเพิ่มขึ้นตามอายุเช่นกัน 45CR30L มีผลการเกิดปฏิกิริยา สูงที่สุดชัดเจนในช่วง 7-14 วัน และคงที่ค่อนข้างสูงในช่วงปลาย (~28 วัน) 45CR40L มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง แม้เริ่มต้นต่ำกว่า แต่สามารถพัฒนาได้ดีในระยะยาวจนใกล้เคียงกับ 45CR30L, 45CR20L ให้ผลต่ำสุดในเกือบทุกช่วงเวลา

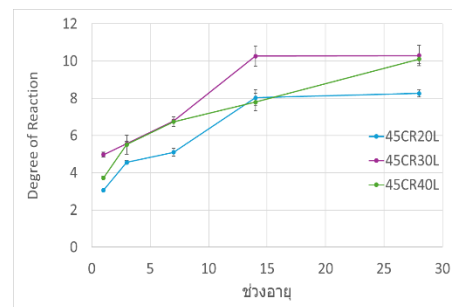
สรุป : เช่นเดียวกับสัดส่วน 35% การใช้ 30% กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ให้ผลดีที่สุดต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อเพิ่มเป็น 40% แม้ช่วงแรกต่ำกว่าแต่ในระยะยาว (~28 วัน) มีศักยภาพใกล้เคียงกับ 30%

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างเฟสดีที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่อายุ 290 วันจากตัวอย่างที่มี $W/B=0.35$ และ $W/B=0.40$ โดยที่ใช้อัตราส่วน CCR:LCA ที่อัตราส่วน 30:70 พบว่าที่ 290 วัน ผลการเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 30 และ 40 ตามลำดับ ดังนั้น สมการนี้และวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีอายุมากขึ้นได้



$W/B=0.35$

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาและช่วงอายุของวัสดุปอซโซแลน 28 วัน ของ 35CR20L, 35CR30L, 35CR40L



$W/B=0.45$

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาและช่วงอายุของวัสดุปอซโซแลน 28 วัน ของ 45CR20L, 45CR30L, 45CR40L

5 สรุป

1. กรดไฮโดรคลอริกผสมกับกรดซาลิไซลิกและเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุด เพราะสามารถละลายกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้เกือบทั้งหมด และละลายเถ้าถ่านหินได้เพียงเล็กน้อย
2. สมการที่ใช้ประเมินระดับการเกิดปฏิกิริยามีความสมเหตุสมผล โดยระดับการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอายุของเฟส
3. อัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก ให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่สูงที่สุดทุกอายุการทดสอบ
4. เฟสดีที่มีอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ให้ค่าระดับการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อวัสดุประสาน 0.35

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยาสำหรับทุนอุดหนุนโครงการทางวิศวกรรมรวมถึงความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์สถานที่และต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์สุวรรณภูมิ วิชาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างยิ่งที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนโครงการเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติศานต์ กรั้วมาตร(2539).การศึกษาส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และ
- [2] เถ้าถ่านหินเพื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีต.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] สุทธินันท์ แอเดียว วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554).กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 34-42.
- [4] อัครเดช ศรีเสน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2557).สมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน.วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้า165-175.
- [5] ณัฐพงศ์ มกระธัช(2557).การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุ
- [6] ประสานเพื่อทำคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูง.วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 106-120.
- [7] ดร.วรางคณา แสงสร้อย ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา(CONTEC)สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของเถ้าลอยคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
- [8] American Society of Testing and Materials. ASTM C 188 - 17, 2023, “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”, pp.1-2.
- [9] American Society of Testing and Materials. ASTM C618 - 22, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, pp.1-3.
- [10] American Society of Testing and Materials. ASTM C 430 - 96, “Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve”.
- [11] Feldman, R. F., & Sereda, P. J. (1969). A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorptionlength change and mechanical properties. Materials and Structures, 1, pp.509-520.
- [12] Nagamatsu, S., Sato, Y., and Ohtsune, Y. (1992). Relationship between degree of drying and drying shrinkage strain of hardened cement paste. Journal of Struct. Constr., pp.13 21.
- [13] Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., and Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcoming, and Solutions. ACI Materials Journal, 118(147), pp.147-159.
- [14] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement and Concrete Composites, 27(4), pp.425-428.



การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำอิง โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS

An Investigation of Rainfall Variability Effects on Streamflow in the Ing River Basin by Using the HEC-HMS Model.

นายโยธิน ธรรมสอน^{1*} นายชินวัฒน์ แสงอัคราโสภณ² นายชัยวัฒน์ แสงอัคราโสภณ³ และนายณรต เมืองมั่งคั่ง⁴

^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102419@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำอิง โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) ซึ่งพัฒนาโดยกองวิศวกรรมอุทกศาสตร์ของกองทัพสหรัฐอเมริกา แบบจำลองนี้จะช่วยในการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ลำน้ำ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำอิงที่ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดเชียงรายและพะเยาในภาคเหนือของประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าจากสถานี I.14 (บ้านน้ำอิง ต.ต้า อ.ขุนตาล จ.เชียงราย) และสถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) ระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2566 รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่กลุ่มน้ำผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง HEC-HMS สามารถจำลองการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อทำการสอบเทียบ (Calibration) และตรวจสอบ (Verification) โดยใช้ข้อมูลจากสถานี I.14 และ I.17 สำหรับช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2566 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในปีฝนมาก ปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา ในขณะที่ปีฝนน้อยพบว่าปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลง การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS ได้ให้ผล $R^2 = 0.595$, $NSE = 0.557$, และ $PBIAS = 9.39\%$ สำหรับสถานี I.14 และ $R^2 = 0.565$, $NSE = 0.563$, และ $PBIAS = -6.18\%$ สำหรับสถานี I.17 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการจำลองน้ำท่าในทั้งสองสถานีการวิเคราะห์ปีฝนมาก, ปีฝนปกติ, และปีฝนน้อยได้แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนและผลกระทบที่มีต่อปริมาณน้ำท่า ซึ่งผลการศึกษาจะช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในกลุ่มน้ำอิง โดยเฉพาะในการเตือนภัยน้ำหลาก การวางแผนรับมือภัยแล้ง และการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน, น้ำท่า, แบบจำลอง HEC-HMS, กลุ่มน้ำอิง, การบริหารจัดการน้ำ

Abstract

This study aims to investigate the impacts of rainfall variability on streamflow in the Ing River Basin using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) model, developed by the U.S. Army Corps of Engineers.

This model simulates the process of rainfall to runoff and explores the relationship between rainfall and streamflow in the Ing River Basin, which covers areas in Chiang Rai and Phayao provinces in northern Thailand. The data used in this study include daily rainfall and streamflow records from stations I.14 (Ban Nam Ing, Thad, Khun Tan, Chiang Rai) and I.17 (Ban Chedi Ngam, Thawang Thong, Mueang, Phayao) for the period from 2003 to 2023, as well as land-use and physical characteristics data of the watershed. The study results show that the HEC-HMS model can effectively simulate streamflow and runoff after calibration and Verification using data from stations I.14 and I.17 for the periods 2003–2015 and 2016–2023, respectively. The model's calibration results yielded $R^2 = 0.595$, $NSE = 0.557$, and $PBIAS = 9.39\%$ for station I.14, and $R^2 = 0.565$, $NSE = 0.563$, and $PBIAS = -6.18\%$ for station I.17. The simulation shows that in wet years, streamflow increases in response to higher rainfall, while in dry years, streamflow decreases. This study contributes to improved water resource management in the Ing River Basin, particularly for flood forecasting, drought mitigation planning, and assessing the potential impacts of climate change.

Keywords: Rainfall variability, streamflow, HEC-HMS model, Ing River Basin, water management

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อทุกภาคส่วนของโลก รวมถึงประเทศไทยที่ประสบกับความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ส่งผลให้เกิดภัยแล้งและอุทกภัยในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในกลุ่มน้ำอิงซึ่งมีความสำคัญในด้านเศรษฐกิจและระบบนิเวศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน กลุ่มน้ำอิงตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ครอบคลุมจังหวัดเชียงรายและจังหวัดพะเยา ซึ่งมีการใช้ทรัพยากรน้ำในภาคเกษตรกรรมอย่างสูงมีความหลากหลายทางการใช้ที่ดิน เช่น พื้นที่เกษตรกรรม, ป่าไม้ และที่อยู่อาศัยส่งผลกระทบต่อกระบวนการไหลของน้ำในลำน้ำดังนั้นการศึกษาและเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝนและน้ำท่าจึงมีความสำคัญในการจัดการทรัพยากรน้ำให้เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้แบบจำลอง HEC-HMS ซึ่งพัฒนาโดย U.S. Army Corps of Engineers จะถูกใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ลำน้ำเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าในกลุ่มน้ำอิง



โดยการใช้ข้อมูลน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาจำนวน / สถานีและข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ สถานี I.14 (บ้านน้ำอิง ต.ต้า อ.ขุนตาล จ.เชียงราย) และ สถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) ในช่วงระยะเวลา ปี พ.ศ.2546 ถึง พ.ศ.2566 รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำอิงการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า HEC-HMS เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์น้ำท่าจากฝนที่ตกลงมาในช่วงเวลาต่างและสามารถนำไปใช้ในการวางแผนและบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำต่างได้

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลุ่มน้ำอิง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงโดยใช้แบบจำลอง HEC-HMS เพื่อเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของน้ำท่าภายใต้ปริมาณน้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การศึกษานี้มีความสำคัญในการบริหารในการจัดทรัพยากรน้ำ โดยเฉพาะในการเตือนภัยน้ำหลาก การวางแผนรับมือกับภัยแล้งและการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

ภาพที่ 1 ขอบเขตลุ่มน้ำอิง



1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงด้วยแบบจำลอง HEC-HMS

1.2.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำฝน (กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)

1.2.3 ประเมินปริมาณน้ำท่าที่ I.17 และ I.14(กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน และน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงทั้งลุ่มน้ำ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้ I.14(บ้านน้ำอิง ต.ต้า อ.ขุนตาล จ.เชียงราย) I.17(บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) ตั้งแต่ 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2566 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่:

1.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิง

- ข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่ารายวัน จากสถานี I.14(บ้านน้ำอิง ต.ต้า อ.ขุนตาล จ.เชียงราย) และ I.17(บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา)
- ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งรวบรวมจาก กองสำรวจและจำแนกดินกรมพัฒนาที่ดิน

- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ เช่น พื้นที่ลุ่มน้ำ ความลาดชัน และภูมิประเทศจาก ข้อมูล DEM (Digital Elevation Model)

1.3.2 การสอบเทียบและตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration) จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.14 และ I.17 โดยใช้ข้อมูลช่วง 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2558 เพื่อให้แบบจำลอง HEC-HMS มีความแม่นยำในการจำลองการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาเหล่านั้น

การตรวจพิสูจน์ (Verification) จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.14 และ I.17 โดยใช้ข้อมูลช่วง 1 มกราคม 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2566 เพื่อทดสอบความสามารถของแบบจำลองในการทำนายปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาดังกล่าว

- การสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลองจะทำการคำนวณค่า Correlation Coefficient (r) และ NAS และ PBIAS เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่ได้จากการสอบเทียบ

1.3.3 การใช้แบบจำลอง HEC-HMS: (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) จะถูกใช้ในการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ท่าในลุ่มน้ำอิง โดยการใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานี I.14 และ I.17 เพื่อจำลองการไหลของน้ำและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำอิง

1.3.4 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาความแปรปรวนใช้ที่สถานีช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้:

- ข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่ารายวันได้จาก กรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทาน (ข้อมูลทุติยภูมิ)
- ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) ได้จากกองสำรวจและจำแนกดินกรมพัฒนาที่ดิน (ข้อมูลทุติยภูมิ)
- ข้อมูล DEM (Digital Elevation Model) ใช้ข้อมูลจากการสำรวจทางภูมิศาสตร์ ที่มีการให้บริการจากหน่วยงานต่างๆ เช่น กรมอุทกศาสตร์

1.4 ประโยชน์งานวิจัย

1.4.1 การสร้างแบบจำลอง HEC-HMS สำหรับลุ่มน้ำอิง (Calibrate และ Verification ที่ I.17 และ I.14) งานวิจัยนี้จะช่วยให้ได้ แบบจำลองลุ่มน้ำอิง ที่มีความแม่นยำในการจำลองปริมาณน้ำท่าของน้ำในลุ่มน้ำอิง

1.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝน (กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย ฝนปกติ) งานวิจัยจะช่วยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนในลุ่มน้ำอิง โดยการแบ่งข้อมูลตาม กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ

1.4.3 การประเมินปริมาณน้ำท่าที่ I.17 และ I.14 (กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ) งานวิจัยนี้จะช่วยในการประเมินปริมาณน้ำท่าในสถานี I.17 และ I.14 ตามปีฝนต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำนายและคาดการณ์น้ำท่าในแต่ละปีได้อย่างแม่นยำ ผลการศึกษาจะช่วยให้สามารถจัดการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำอิง ได้ดียิ่งขึ้น เช่น การเตือนภัยน้ำหลากในปีฝนมาก หรือการวางแผนการใช้น้ำในปีที่ฝนน้อย

2. ทฤษฎีที่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีการจำลองน้ำฝนสู่ท่า (Rainfall-Runoff Theory)



ทฤษฎี Rainfall-Runoff หรือ การแปรเปลี่ยนฝนสู่แม่น้ำทำเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาและการไหลของน้ำในลำน้ำ น้ำฝนที่ตกลงมาบนพื้นผิวดินจะถูกแปรเปลี่ยนเป็นน้ำท่าผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การระเหย การซึมผ่านของน้ำลงสู่ดิน และการไหลบ่าของน้ำ ทฤษฎีนี้เป็นหลักการสำคัญในการใช้แบบจำลอง HEC-HMS ซึ่งคำนึงถึงการแปรสภาพของน้ำฝนที่ตกลงมาบนพื้นผิวเพื่อให้ได้ค่าของ น้ำท่าที่ไหลในแต่ละพื้นที่

ทฤษฎีนี้จะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ที่ดิน, ลักษณะดิน, สภาพภูมิอากาศ, และการไหลบ่าของน้ำ เพื่อจำลองการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นจากฝน ซึ่งใช้ในการพยากรณ์น้ำท่าในลุ่มน้ำต่างๆ การศึกษาในลุ่มน้ำต่างๆ เช่น ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (รายา สุกแสงฉาย และ ญัฐ มาแจ้ง, 2559) ก็ใช้ทฤษฎีนี้ในการคำนวณน้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.2 ทฤษฎี Clark Unit Hydrograph (UH)

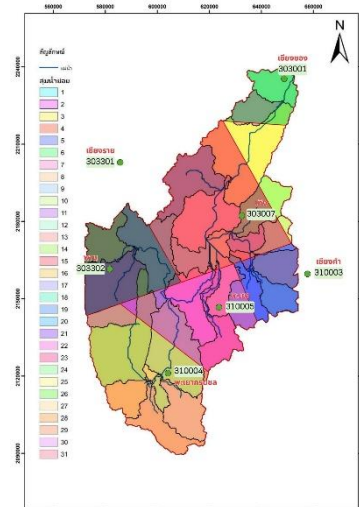
Clark Unit Hydrograph เป็นวิธีการสร้างไฮโดรกราฟของการไหลออกจากลุ่มน้ำที่เกิดจากฝนที่ตกสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำในปริมาณหนึ่งหน่วย (เช่น 1 มม.) ภายในช่วงเวลาคงที่ เช่น 1 ชั่วโมง โดยวิธีนี้ใช้แนวคิดผสมผสานระหว่าง เวลาการเดินทางของน้ำ (time-area concept) และการหน่วงเก็บของลุ่มน้ำ (linear reservoir storage) เพื่ออธิบายกระบวนการที่ฝนตกลงมาแล้วเปลี่ยนเป็นน้ำท่าในลุ่มน้ำ ในแบบจำลอง HEC-HMS โมดูล Clark Unit Hydrograph ช่วยให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ Time of Concentration (Tc): เวลาที่น้ำจากพื้นที่ไกลที่สุดไหลมาถึงทางออกของลุ่มน้ำ Storage Coefficient (R): ค่าการหน่วงเก็บของลุ่มน้ำที่ใช้แทนการกักเก็บและปล่อยน้ำออก วิธีการนี้เหมาะกับลุ่มน้ำอิง เนื่องจากสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับข้อมูลจริงจากสถานีวัดน้ำท่าหรือผลการวิเคราะห์ในอดีต ทำให้ได้ Unit Hydrograph ที่สะท้อนลักษณะการตอบสนองของลุ่มน้ำได้ใกล้เคียงสภาพจริง กระบวนการจำลองด้วย Clark Unit Hydrograph เริ่มจากการนำฝนส่วนเกินที่ได้จากแบบจำลอง มาคำนวณด้วยแนวคิด time-area เพื่อกำหนดเส้นทางการไหลของน้ำในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นจึงนำมาผ่านตัวแปรการหน่วงเก็บ (R) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นไฮโดรกราฟของน้ำท่า ซึ่งสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าตามเวลา ดังนั้น การใช้ Clark Unit Hydrograph ในโครงการนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของลุ่มน้ำอิง และช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนต่อการเกิดน้ำท่าได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.1.3 ทฤษฎี Constant Monthly คือ วิธีการกำหนดค่าการสูญเสียความชุ่มชื้นของดินในแต่ละเดือนแบบคงที่ (ค่าคงที่รายเดือน) โดยผู้ใช้ต้องป้อนค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น อัตราการซึม (infiltration rate) หรือการสูญเสียเริ่มต้น (initial loss) ที่แตกต่างกันในแต่ละเดือน เพื่อสะท้อนความแตกต่างของสภาพดิน ความชื้น และการใช้ที่ดินตามฤดูกาล

แนวคิดของวิธีนี้คือในแต่ละเดือนพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของดินจะไม่เหมือนกัน เช่น ในฤดูฝนดินอิ่มน้ำมากแล้วการซึมอาจน้อย ในขณะที่ฤดูแล้งดินแห้งการซึมจะสูงขึ้น การกำหนดค่ารายเดือนจึงช่วยให้การจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการใช้ค่าเดียวตลอดปีโดยเฉพาะในลุ่มน้ำเขตร้อนชื้นอย่างลุ่มน้ำอิงที่มีฤดูกาลชัดเจน

ในการประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง HEC-HMS สำหรับลุ่มน้ำอิง ผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าของการสูญเสียรายเดือนตามข้อมูลเชิงประจักษ์หรือการศึกษาในพื้นที่ เช่น ปริมาณการซึมเฉลี่ยจากข้อมูลทางอุทกวิทยา หรืออ้างอิงจากผลการศึกษาก่อนหน้า เพื่อให้ผลการจำลองสะท้อนความเป็นจริงของการเกิดน้ำท่าในแต่ละเดือนได้อย่างถูกต้อง

การเลือกใช้ Constant Monthly Method ในโครงการนี้จึงช่วยให้การจำลองมีความยืดหยุ่น และแม่นยำในเชิงฤดูกาล ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้วางแผนบริหารจัดการน้ำตามช่วงเวลาหรือฤดูได้อย่างมีประสิทธิภาพ



2.1.4 ทฤษฎี Muskingum เป็นเทคนิคการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในลำน้ำโดยพิจารณาอิทธิพลของการเก็บกักน้ำไว้ชั่วคราว (storage) และอัตราการไหลเข้า-ไหลออกในช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยอาศัยสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการไหลเข้า (inflow) การไหลออก (outflow) และปริมาณน้ำที่กักเก็บ (storage) ในแต่ละช่วงเวลา

สมการพื้นฐานของ Muskingum คือ:

$S = K [xI + (1-x)O]$ โดยที่

- S = ปริมาณน้ำที่เก็บกัก (storage)
- I = อัตราการไหลเข้า (inflow)
- O = อัตราการไหลออก (outflow)
- K = ค่าคงที่ของเวลา (storage time constant)
- x = ค่าคงที่ของรูปแบบการไหล (typically $0 < x < 0.5$)

หลักการของ Muskingum คือในลำน้ำหนึ่งช่วง การไหลออกจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของการไหลเข้าในช่วงก่อนหน้า โดยมีการสะสมและหน่วงน้ำไว้ชั่วคราวตามลักษณะภูมิประเทศ และธารน้ำ วิธีนี้เหมาะกับการจำลองลำน้ำธรรมชาติที่มีการไหลแบบไม่รวดเร็ว เช่น แม่น้ำสายหลักอย่างลุ่มน้ำอิง

ในแบบจำลอง HEC-HMS วิธี Muskingum ถูกใช้ในโมดูล Channel Routing เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำท่าจาก sub-basin ตอนบนของลุ่มน้ำไปยังจุดรวม โดยอิงจากค่าพารามิเตอร์ K และ x ซึ่งอาจได้จากการสอบเทียบ (calibration) กับข้อมูลน้ำท่าจริงหรือจากการศึกษาเชิงพื้นที่ เช่น ความลาดชัน ความยาวลำน้ำ และลักษณะการใช้ที่ดิน

การใช้ Muskingum Routing ในการจำลองลุ่มน้ำอิงจะช่วยให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของน้ำในแม่น้ำเมื่อปริมาณฝนเปลี่ยนแปลง และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของเหตุการณ์ฝนต่างๆ ต่อการเกิดน้ำหลาก ปริมาณน้ำท่ารวม และระยะเวลาการเดินทางของน้ำในลำน้ำได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2.1.5 กระบวนการ Subbasin Precipitation

สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย เลือกใช้วิธี Gage Weights โดยอ้างอิงหลักการของ Thiessen Polygon Method ซึ่งเป็นเทคนิคทางอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยาที่นิยมใช้ในการหาค่าฝนเฉลี่ย



จากหลายสถานี โดยสมมติว่าฝนที่ตกในพื้นที่แต่ละโพลีกอนมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้จากสถานีนั้น

หลักการคำนวณใช้สมการดังนี้

$$w_i = \frac{A_i}{A_{total}}$$

โดยที่:

- W_i = ค่าน้ำหนักของแต่ละสถานีฝน
- A_i = พื้นที่ของโพลีกอนที่อยู่ในเขตอิทธิพลของสถานีนั้น
- A_{Total} = พื้นที่รวมทั้งหมดที่พิจารณา

ด้วยวิธีนี้จึงทำให้ได้ค่าฝนเฉลี่ยที่สะท้อนการกระจายของสถานีฝนในเชิงพื้นที่อย่างเหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 2 ตำแหน่งสถานีฝน และรูปหลายเหลี่ยมทิดเซน(Thiessen Polygon)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การไหลของน้ำ (Hydrology)

บรรจง อุดมธนา (2556) ได้ทำการศึกษาในหัวข้อ “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านอุทกวิทยาในลุ่มน้ำเจ้าพระยาและลุ่มน้ำแม่กลอง” โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการไหลของน้ำ (Hydrology) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของน้ำในลุ่มน้ำ โดยใช้ข้อมูลความลาดชันของพื้นที่ ลักษณะของดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อนำมาวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมการไหลของน้ำในลำน้ำ ซึ่งช่วยสนับสนุนการวางแผนจัดการทรัพยากรน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรมสูง

การศึกษาการไหลของน้ำ (Hydrology) ถือเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำ ความเข้าใจระบบการเคลื่อนที่ของน้ำในธรรมชาติ ทั้งจากแหล่งน้ำบนผิวดิน เช่น น้ำฝน และลำน้ำ รวมไปถึงน้ำใต้ดิน โดยการวิเคราะห์จะคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความลาดชันของพื้นที่ การซึมผ่านของดิน และลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อใช้ในการคาดการณ์ปริมาณน้ำไหล การกระจายน้ำฝน และการวางแผนบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ

2.2.2 การจำลองน้ำฝนสู่ลำน้ำ (Rainfall-Runoff Theory)

รายา สุกแสงฉาย และ ณัฐ มาแจ้ง (2559) ได้ทำการศึกษาในหัวข้อ “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย” โดยนำทฤษฎี Rainfall-Runoff มาใช้ร่วมกับแบบจำลอง HEC-HMS เพื่อจำลองการไหลของน้ำจากฝนในลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองค่าการไหลของน้ำได้อย่างแม่นยำทั้งในสภาวะฝนตกน้อยและฝนตกมาก ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของทฤษฎี Rainfall-Runoff ในการประยุกต์ใช้กับลุ่มน้ำในประเทศไทย

ทฤษฎี Rainfall-Runoff หรือทฤษฎีการแปรเปลี่ยนฝนสู่ลำน้ำ เป็นแนวคิดสำคัญที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา และปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ โดยน้ำฝนที่ตกลงสู่ผิวดินจะผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การระเหย (Evaporation) การซึมผ่านลงดิน (Infiltration) และการไหลบ่าบนผิวดิน (Surface Runoff) ก่อนจะกลายเป็นน้ำท่าที่ไหลในลำน้ำ ทฤษฎีนี้เป็นหลักการพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ในแบบจำลอง HEC-HMS เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในแต่ละพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ที่ดิน ลักษณะของดิน สภาพภูมิอากาศ และโครงสร้างทางภูมิประเทศ เพื่อจำลองพฤติกรรมของน้ำอย่างใกล้เคียงกับความเป็นจริง

2.2.3 แบบจำลอง HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System)

อรุณศักดิ์ ศรีระวงศ์ (2560) ได้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-HMS ในการคำนวณและจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำลำปาง โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลของน้ำที่เกิดจากปริมาณฝนที่ตกลงในพื้นที่ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง HEC-HMS สามารถแสดงผลการจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ แม้ในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีภูมิประเทศซับซ้อน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนและบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระดับพื้นที่

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดย U.S. Army Corps of Engineers เพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการแปรเปลี่ยนน้ำฝนสู่ลำน้ำ (Rainfall-Runoff) ภายในลุ่มน้ำต่าง ๆ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกภูมิภาคทั่วโลก และได้รับการยอมรับในวงกว้างในงานด้านอุทกวิทยา แบบจำลองนี้สามารถประเมินพฤติกรรมของน้ำที่เกิดจากฝนตกโดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัดน้ำฝนร่วมกับข้อมูลภูมิประเทศ เช่น ความสูง ความลาดชัน ลักษณะการใช้ที่ดิน และลักษณะของดิน เพื่อให้การจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด

ทฤษฎีหลักที่แบบจำลอง HEC-HMS ใช้ ได้แก่

- SCS Curve Number ซึ่งใช้ในการคำนวณปริมาณฝนส่วนเกินหลังจากการสูญเสียเริ่มต้น
- Constant Monthly ที่ใช้กำหนดค่าการสูญเสียรายเดือนอย่างคงที่ตามฤดูกาล
- Clark unit hydrograph

การผสมผสานทฤษฎีเหล่านี้ภายใน HEC-HMS ช่วยเพิ่มความสามารถของแบบจำลองในการทำนายการไหลของน้ำในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ทั้งในกรณีฝนตกหนัก ฝนตกเบา หรือฝนตกตามฤดูกาล ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการบริหารจัดการน้ำ

2.2.4 SCS Curve Number Method

จิรเมธ อัครปรีดี (2562) ได้ทำการศึกษาในหัวข้อ “การประเมินปริมาณน้ำท่าจากฝนโดยใช้แบบจำลอง HEC-HMS และ SCS Curve Number ในลุ่มน้ำลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์” โดยใช้วิธี SCS Curve Number (CN) เพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากฝนตกในพื้นที่ ซึ่งพิจารณาจากการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะของดิน และสภาพความชื้นเริ่มต้นของดิน (Antecedent Moisture Condition) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในพื้นที่ลุ่มน้ำลำปาว และสามารถประยุกต์ใช้ในการวางแผนจัดการน้ำในฤดูแล้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

SCS Curve Number Method เป็นวิธีการที่พัฒนาโดยหน่วยงาน Soil Conservation Service (SCS) ของสหรัฐอเมริกา ซึ่งปัจจุบันคือหน่วยงาน Natural Resources Conservation Service (NRCS) ภายใต้กระทรวงเกษตรสหรัฐฯ วิธีนี้ใช้ค่า Curve Number (CN) เป็นตัวบ่งชี้ศักยภาพของพื้นที่ในการซึมซับน้ำหรือการเกิดน้ำท่าจากฝนที่ตกลงมา โดยค่า CN จะมีค่าตั้งแต่ 30-100 ซึ่งแสดงถึงความสามารถของพื้นที่ในการกักเก็บน้ำ (ค่าต่ำ) หรือการเกิดการไหลบ่าของน้ำมาก (ค่าสูง)

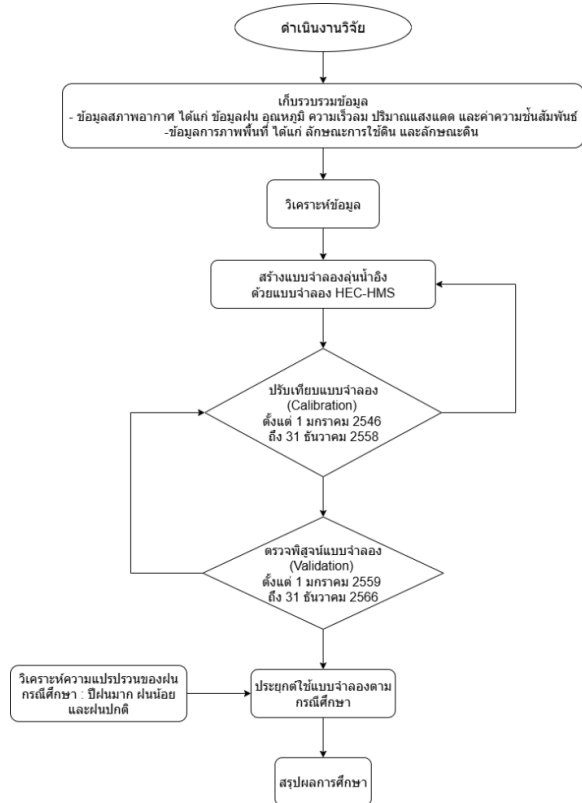
2.2.5 การระเหยและการซึมผ่าน (Evaporation and Infiltration)

Allen et al. (1998) ได้ศึกษากระบวนการระเหย (Evaporation) และการซึมผ่าน (Infiltration) ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการวิเคราะห์วงจรของน้ำในธรรมชาติ โดยเฉพาะในด้านการคำนวณน้ำท่าที่เกิดจากฝนที่ตกลงมา โดยการระเหยเป็นกระบวนการที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอและ



สูญเสียออกจากระบบผ่านพื้นผิวดิน แหล่งน้ำ และพืชพรรณ ส่วนการซึม

น้ำท่ามีความแม่นยำมากขึ้น โดยอิงจากข้อมูลธรณีวิทยา สภาพดิน
ความสามารถในการส่งผ่านน้ำของชั้นดิน และระดับน้ำใต้ดิน



ผ่านหมายถึงการที่น้ำไหลลงสู่ชั้นดินใต้ผิวดิน ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณ
น้ำผิวดินที่จะไหลเป็นน้ำท่า

จากการศึกษาดังกล่าว พบว่าทั้งสองกระบวนการมีบทบาทสำคัญต่อ
การคำนวณสมมูลน้ำในแบบจำลองอุทกวิทยา เช่น แบบจำลอง HEC-HMS
โดยต้องพิจารณาความชื้นเริ่มต้นของดิน ประเภทของดิน ลักษณะการใช้
ที่ดิน และอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา เนื่องจากสิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่ออัตรา
การระเหยและการซึมผ่านในแต่ละพื้นที่

ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์ค่าการระเหยมักใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา
ร่วมกับสมการมาตรฐาน เช่น FAO Penman-Monteith equation ส่วน
การวิเคราะห์การซึมผ่านมักอาศัยข้อมูลคุณสมบัติดิน เช่น ค่าความสามารถ
ในการซึมน้ำ (Infiltration Rate) หรือค่า Field Capacity ของดิน ซึ่งช่วย
ให้สามารถประเมินปริมาณฝนที่เปลี่ยนรูปเป็นน้ำท่าได้แม่นยำยิ่งขึ้น

2.2.6 การไหลของน้ำใต้ดิน (Baseflow)

Lyne และ Hollick (1979) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการของ
การไหลของน้ำใต้ดิน (Baseflow) ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำที่ไหลในลำน้ำอย่าง
ต่อเนื่องแม้ในช่วงเวลาที่ไม่ฝนตก โดยน้ำในส่วนนี้มีที่มาจากแหล่งกักเก็บใต้
ดิน เช่น ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) หรือดินชั้นลึกที่อุ้มน้ำไว้ แล้วค่อย ๆ ไหล
เข้าสู่ลำน้ำในลักษณะช้าและต่อเนื่อง

แนวคิดเรื่อง Baseflow มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการวิเคราะห์
และจำลองการไหลของน้ำในลุ่มน้ำ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่มีผล
โดยตรงต่อค่าการไหลพื้นฐานในลำน้ำ โดยเฉพาะในช่วงที่ไม่มีฝนตก การไม่
พิจารณา Baseflow อาจทำให้ผลการจำลองน้ำท่าคลาดเคลื่อนได้อย่างมี
นัยสำคัญ

ในงานจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-HMS กระบวนการ Baseflow
สามารถนำไปประยุกต์ใช้โมดูลการจำลองน้ำใต้ดิน เพื่อให้การประเมิน

3.ดำเนินงานวิจัย

ภาพที่ 3 แผนผังดำเนินงานวิจัย

คำอธิบายแผนผังการดำเนินงานวิจัย

แผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงลำดับขั้นตอนการศึกษาลักษณะของ
ความแปรปรวนของปริมาณฝนต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิง โดยใช้
แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการเก็บข้อมูล
สร้างแบบจำลอง, เปรียบเทียบ, ตรวจสอบ และวิเคราะห์ผลในกรณีศึกษาต่าง ๆ
อย่างเป็นระบบ ดังนี้

3.1. เริ่มต้นดำเนินงานวิจัย

วางแผนการดำเนินงานโดยกำหนดวัตถุประสงค์ ปัญหาวิจัย แนวทาง
การศึกษา และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎี Rainfall-Runoff, Clark
unit hydrograph, Constant Monthly และ Muskingum เพื่อ นำมา
ประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง HEC-HMS ในบริบทของลุ่มน้ำอิง

3.2. เก็บรวบรวมข้อมูล

เป็นขั้นตอนสำคัญในการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง
โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย:

- ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ เช่น ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความเร็วลม ปริมาณแสงแดด และค่าความชื้นสัมพัทธ์
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ ได้แก่ ลักษณะการใช้ที่ดิน (Land Use), ลักษณะดิน, และค่าระดับความสูง (DEM)
- ข้อมูลน้ำท่าและปริมาณน้ำฝน ที่เอามาใช้ของสถานี I.14 และ I.17 ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2546–2566 ข้อมูลทั้งหมดได้มาจากหน่วยงานที่เชื่อถือได้ เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา กรมทรัพยากรน้ำ และกรมพัฒนาที่ดิน

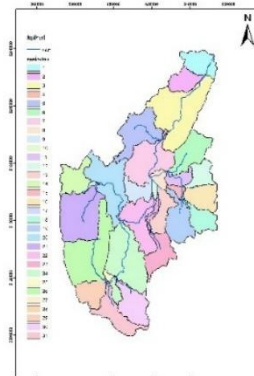
3.3. วิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้นำมาทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ ความถูกต้อง และ
จัดรูปแบบให้อยู่ในลักษณะที่สามารถนำเข้าสู่แบบจำลอง HEC-HMS ได้ เช่น
การจัดเรียงข้อมูลรายวัน การกรอกรอกข้อมูลที่ขาดหาย และการคำนวณ
พารามิเตอร์เบื้องต้น

3.4. สร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงด้วย HEC-HMS

3.4.1 การนำเข้าข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Sub-basin Area)

ในการสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำ จำเป็นต้องแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น ลุ่ม
น้ำย่อย ตามเส้นทางการไหลของน้ำ จากนั้นจึงทำการบันทึกข้อมูลขนาด





พื้นที่ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยลงในแบบจำลอง เพื่อใช้ในการคำนวณและจำลองกระบวนการไหลของน้ำ ตัวอย่างการกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแสดงดังภาพที่ 4 และ 5

ภาพที่ 4 ลุ่มน้ำย่อยจากแบบจำลอง
ภาพที่ 5 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)

3.4.2 การป้อนข้อมูลการสูญเสีย (Loss) ของแต่ละพื้นที่ย่อย (Sub-basin Area) การกำหนดค่าการสูญเสีย (Loss) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยใช้วิธี SCS Runoff Curve Number (Soil Conservation Service, 1986) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1.Initial Abstraction (Ia)คือ ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้นที่เกิดขึ้นก่อนจะมีการไหลบ่าผิวดิน โดยคำนวณจากสมการ:

$$I_a = 0.2S \quad \text{เมื่อ} \quad S = \frac{1,000}{CN} - 10$$

โดยที่ CN คือค่า Curve Number และ S คือความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงสุดของดิน

Subbasin	Area (KM2)
Subbasin-7	92.7963
Subbasin-3	3.1392
Subbasin-1	189.0333
Subbasin-2	152.8659
Subbasin-5	355.6116
Subbasin-4	5.2011
Subbasin-29	355.6116
Subbasin-26	324.9144
Subbasin-28	152.8659
Mae tum	274.0644
Subbasin-27	189.0333
Subbasin-25	174.1464
Subbasin-30	5.2011
Subbasin-24	1.8117
Subbasin-14	257.9526
Subbasin-20	16.9911
Subbasin-21	4.7151
Subbasin-22	237.2283
Subbasin-23	589.1661
Subbasin-10	396.5427

2.Curve Number (CN)คือ ค่าตัวเลขที่สะท้อนความสามารถในการซึมผ่านและการกักเก็บน้ำของพื้นที่ ซึ่งได้จากการพิจารณาลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) ของลุ่มน้ำอิงตอนบน เช่น พื้นที่ป่า พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ชุมชน

3.Impervious (%)คือ ร้อยละของพื้นที่ที่ไม่สามารถซึมผ่านน้ำได้ (พื้นที่ผิวแข็ง) เช่น เขตที่อยู่อาศัยหรือพื้นที่เมือง ซึ่งมักมีค่ามากกว่าพื้นที่เกษตรกรรมหรือพื้นที่ป่าที่ไม่มีการซึมผ่านสูงกว่า ดังภาพที่ 6

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
Subbasin-7	22.17	88.8705	5
Subbasin-3	16.84	60.23445	5
Subbasin-1	17.22	61.2219	5
Subbasin-2	21.14	87.88305	5
Subbasin-5	15.56	59.247	5
Subbasin-4	19.86	79.98345	5
Subbasin-29	17.56	59.247	5
Subbasin-26	17.33	66.15915	5
Subbasin-28	20.13	81.95835	5
Subbasin-27	11	63.1968	5
Subbasin-25	16.34	66.15915	5
Subbasin-30	17.21	68.13405	5
Subbasin-24	16.55	61.2219	5
Subbasin-14	20.13	81.95835	5
Subbasin-20	20.89	85.90815	5
Subbasin-21	20.93	87.88305	5
Subbasin-22	21.45	83.93325	5
Subbasin-23	0.54	62.20935	5
Subbasin-10	20.99	87.88305	5
Subbasin-9	16.21	60.23445	5
Subbasin-8	19.78	74.05875	5
Subbasin-6	16.23	59.247	5
Subbasin-12	16.78	62.20935	5
Subbasin-11	17.21	64.18425	5
Subbasin-19	17.02	63.1968	5
Subbasin-16	19.82	78.00855	5
Subbasin-13	19.89	78.996	5
Subbasin-18	19.86	79.98345	5
Subbasin-15	19.54	75.0462	5
Subbasin-17	20.89	85.90815	5

ภาพที่ 6 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลการสูญเสีย (Loss) ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)

3.4.3 การป้อนข้อมูลการไหลฐาน (Baseflow) ของแต่ละพื้นที่ย่อย

ในการสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำ จำเป็นต้องกำหนดค่า การไหลฐาน (Baseflow) ซึ่งหมายถึงปริมาณการไหลของน้ำในลำน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ก่อนที่จะมีน้ำท่าไหลมาจากฝนตกลงมา โดยข้อมูลการไหลฐานของแต่ละเดือนจะถูกกำหนดแยกตาม พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Sub-basin Area) โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ดังภาพที่ 7

Subbasin	January Baseflow (M3/S)	February Baseflow (M3/S)	March Baseflow (M3/S)	April Baseflow (M3/S)	May Baseflow (M3/S)
Subbasin-7	0.0287304	0.0115089	0.0091782	0.0171656	0.14401
Subbasin-3	0.0491678	0.0491678	0.0491678	0.0491678	0.0491678
Subbasin-1	0.0138180	0.0055352	0.0044143	0.0082558	0.0692616
Subbasin-2	0.0110791	0.0044381	0.0035393	0.0066195	0.0555335
Subbasin-5	0.0257734	0.0103243	0.0082335	0.0153988	0.12919
Subbasin-4	.000648307	0.0002597	.000207107	.000387344	0.0032496
Subbasin-29	0.0126215	0.0050559	0.0040320	0.0075410	0.0632643
Subbasin-26	0.0427005	0.0171050	0.0136410	0.0255123	0.21403
Subbasin-28	.000131305	5.25984E-5	4.19465E-5	7.84509E-5	.000658158
Subbasin-27	6.37935E-5	2.55545E-5	2.03794E-5	3.81148E-5	.000319761
Subbasin-25	0.0015094	.000604633	.000482187	.000901816	0.0075657
Subbasin-30	0.0187676	0.0075180	0.0059955	0.0112131	0.0940715
Subbasin-24	0.0423421	0.0169614	0.0135265	0.0252981	0.21224
Subbasin-14	0.0156269	0.0062599	0.0049922	0.0093366	0.0783290
Subbasin-20	0.0323136	0.0129442	0.0103228	0.0193064	0.16197
Subbasin-21	0.0376758	0.0150922	0.0120358	0.0225102	0.18885
Subbasin-22	0.0235486	0.0094331	0.0075228	0.0140696	0.11804
Subbasin-23	0.0186954	0.0074890	0.0059724	0.0111700	0.0937096
Subbasin-10	0.0014830	.000594077	.000473768	.000886071	0.0074336
Subbasin-9	0.0098100	0.0039297	0.0031339	0.0058612	0.0491719
Subbasin-8	0.0044996	0.0018025	0.0014374	0.0026884	0.0225539
Subbasin-6	0.0198631	0.0079568	0.0063454	0.0118676	0.0995627
Subbasin-12	0.0101189	0.0040534	0.0032326	0.0060457	0.0507204
Subbasin-11	0.0067255	0.0026941	0.0021485	0.0040183	0.0337112
Subbasin-19	0.0188102	0.0075350	0.0060091	0.0112385	0.0942847
Subbasin-16	0.0141150	0.0056542	0.0045092	0.0084333	0.0707506
Subbasin-13	0.0186954	0.0074890	0.0059724	0.0111700	0.0937096
Subbasin-18	0.0115434	0.0046241	0.0036876	0.0068968	0.0578604
Subbasin-15	0.0025833	0.0010348	.00082526	0.0015435	0.0129487
Subbasin-17	.000227517	.00015457	.00015324	.000135935	0.0011404

ภาพที่ 7 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในแต่ละเดือนลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)



3.4.4 การป้อนข้อมูลการหน่วงของน้ำ (Flow Routing)

ในการสร้างแบบจำลอง HEC-HMS จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์การหน่วงของน้ำ (Muskingum Routing) เพื่อใช้คำนวณเวลาที่น้ำใช้ในการเดินทางจากลำน้ำต้นทางไปยังจุดตรวจวัดน้ำ Muskingum K (hr) = ระยะเวลาในการหน่วงของน้ำจนถึงจุดปลายทาง Muskingum X = ตัวแปรที่สะท้อนลักษณะการหน่วงของน้ำ มีค่าระหว่าง 0 – 0.5 ทั้งสองค่ากำหนดโดยการปรับด้วย วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่สุด ในการศึกษาได้ใช้การกำหนดค่า Muskingum K และ X สำหรับ สองสถานีวัดหลัก ได้แก่ I.17 และ I.14 I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) → ใช้ค่า Muskingum ที่ปรับเทียบจากลำน้ำสายหลักและลำน้ำย่อยจนถึงจุดรวม I.14 (บ้านน้ำอิง ต.ต้า อ.ขุนตาล จ.เชียงราย) → กำหนดค่า Muskingum สำหรับเส้นทาง การไหลจากพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำมาจนถึงจุดวัด ดังภาพ 8

Reach	Initial Type	Initial Discharge (M3/S)	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
Reach-1	Discharge = Inflow		49.14597	0.232125	
Reach-2	Discharge = Inflow		54.12474	0.214576	
Reach-14	Discharge = Inflow		63.27896	0.142365	
Reach-13	Discharge = Inflow		72.14765	0.262145	
Reach-12	Discharge = Inflow		43.78621	0.281456	
Reach-11	Discharge = Inflow		79.24132	0.123654	
Reach-9	Discharge = Inflow		45.36457	0.245214	
Reach-5	Discharge = Inflow		13.45671	0.214578	
Reach-4	Discharge = Inflow		35.69741	0.214365	
Reach-6	Discharge = Inflow		45.36578	0.265412	
Reach-10	Discharge = Inflow		42.36548	0.147852	
Reach-3	Discharge = Inflow		21.45789	0.324789	
Reach-7	Discharge = Inflow		32.15244	0.214547	
Reach-8	Discharge = Inflow		61.32785	0.124578	

ภาพที่ 8 ตัวอย่างการใส่ข้อมูล(Reach routing): Muskingum

3.4.5 การป้อนข้อมูลปริมาณฝนในลุ่มน้ำย่อย (Subbasin Precipitation)

สำหรับการกำหนดค่าปริมาณฝนในลุ่มน้ำย่อย เลือกใช้วิธี Gage Weights โดยอ้างอิงหลักการของ Thiessen Polygon Method ในภาพที่ 2 ซึ่งเป็นเทคนิคทางอุทกวิทยาที่ใช้ในการคำนวณปริมาณฝนเฉลี่ยจากข้อมูลหลายสถานี โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็นโพลีกอน (Polygon) ตามเขตอิทธิพลของแต่ละสถานีฝน ขั้นตอนการกำหนดค่าได้อาศัยการ ลองผิดลองถูก (Trial and Error Method) เพื่อให้ค่าที่ได้สอดคล้องกับลักษณะพื้นที่จริง ในแต่ละ Subbasin โดยการดูแต่ละ Polygon ว่าอยู่ในเขตแต่ละสถานี ดังภาพที่ 9

Element Name: Subbasin-12

Gage Name	Depth Weight	Time Weight
48303	0.7	1
73007	0.25	1
73052	0.05	1

ภาพที่ 9 ตัวอย่างการใส่ข้อมูล Gage Weights แต่ละ Subbasin

3.5. ตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของแบบจำลอง

จำลองน้ำท่าเบื้องต้นเพื่อดูว่าสมเหตุสมผลหรือไม่ หากผลการจำลองไม่แสดงพฤติกรรมที่ถูกต้อง เช่น ไม่มีน้ำไหล หรือค่าผิดปกติต้องย้อนกลับไปแก้ไขแบบจำลอง

3.6. ปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration)

ทำการปรับเทียบโดยใช้ข้อมูลช่วงปี พ.ศ. 2546–2558 ที่สถานี I.14 และ I.17 เพื่อปรับพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับข้อมูลจริง โดยใช้ค่าประสิทธิภาพในการประเมินแบบจำลอง เช่น Coefficient of Correlation (r), NSE, PBIAS, NAS

3.7. ตรวจสอบพิสูจน์ของแบบจำลอง (Verification)

ตรวจสอบความแม่นยำโดยใช้ข้อมูลช่วงปี พ.ศ. 2559–2566 ในสถานีเดียวกันกับที่ใช้ในขั้นตอน Calibration เพื่อประเมินว่าแบบจำลองสามารถจำลองข้อมูลในช่วงเวลานอกเหนือจากการปรับเทียบได้ดีเพียงใด

3.8. วิเคราะห์กรณีศึกษาความแปรปรวนของฝน

นำแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบไปประยุกต์ใช้กับ 3 กรณีศึกษา

- ปีที่ฝนตกมาก
- ปีที่ฝนน้อย
- ปีที่ฝนตกปกติ

เพื่อวิเคราะห์ว่าความแตกต่างของปริมาณฝนมีผลต่อปริมาณน้ำท่าอย่างไร

3.9. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง

แบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์แนวโน้ม การบริหารจัดการน้ำ หรือคาดการณ์สถานการณ์ในอนาคต ซึ่งอาจใช้ประกอบการจัดทำแผนรับมือภัยแล้ง น้ำหลาก หรือการบริหารอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำอิง

3.10. สรุปผลการศึกษา

วิเคราะห์และสังเคราะห์ผลการศึกษทั้งหมดเพื่อนำเสนอข้อค้นพบ และข้อเสนอแนะในการนำแบบจำลอง HEC-HMS ไปใช้จริงในงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงหรือพื้นที่ที่มีลักษณะคล้ายกัน

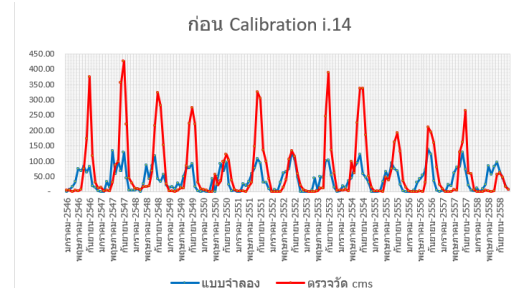
4. ผลการศึกษา

4.1 การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification)

การศึกษาค้นคว้าได้ทำการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยใช้ข้อมูลจากสถานี I.14 และ I.17 ซึ่งการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์ได้ดำเนินการในช่วงเวลา พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2558 สำหรับการสอบเทียบ (Calibration) และ พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2566 สำหรับการตรวจพิสูจน์ (Verification)

สถานี I.14 (บ้านน้ำอิง, ต.ต้า, อ.ขุนตาล, จ.เชียงราย):

- ก่อนการสอบเทียบ (Pre-Calibration): ผลการจำลองก่อนการสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าค่าดัชนี $R^2 = 0.359$, $NSE = 0.227$, และ $PBIAS = 41.42\%$ ซึ่งแสดงถึงความคลาดเคลื่อนสูงระหว่างค่าที่จำลองและค่าที่ตรวจวัดจริง โดยเฉพาะในช่วงที่มีฝนตกหนัก

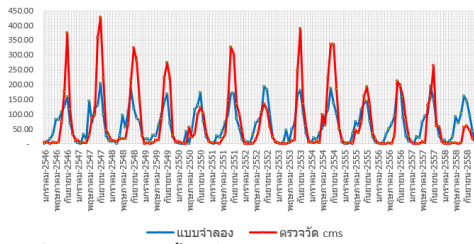


ภาพที่ 10 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดก่อนการสอบเทียบ (Calibration) ที่สถานี I.14

- หลังการสอบเทียบ (Post-Calibration): หลังการสอบเทียบ, ค่าดัชนีได้มีการปรับปรุงอย่างชัดเจน โดย $R^2 = 0.595$, $NSE = 0.557$, และ $PBIAS = 9.39\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการไหลของน้ำได้ดีขึ้นและใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากขึ้น



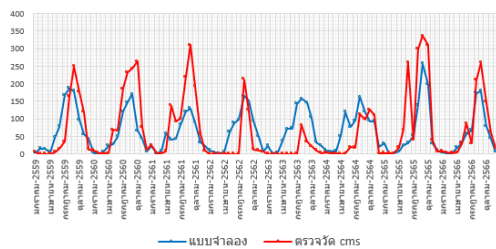
หลัง Calibration i.14



ภาพที่ 11 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดหลังการสอบเทียบ (Calibration) ที่สถานี I.14

- การตรวจพิสูจน์ (Verification):เมื่อทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้ข้อมูลในช่วง พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2566, ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า $R^2 = 0.507$, $NSE = 0.502$, และ $PBIAS = 4.81\%$, ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงมีความแม่นยำและสามารถทำนายปริมาณน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงในช่วงเวลานอกเหนือจากการสอบเทียบ

Verification i.14

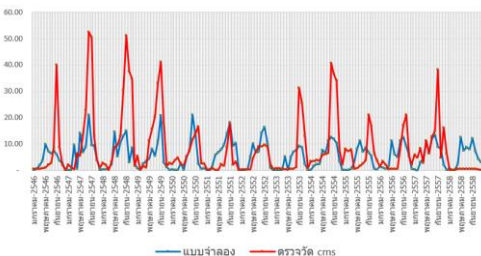


ภาพที่ 12 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) ที่สถานี I.14

สถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม, ต.ท่าวังทอง, อ.เมือง, จ.พะเยา):

- ก่อนการสอบเทียบ (Pre-Calibration):สำหรับสถานี I.17, ผลการจำลองก่อนการสอบเทียบแสดงให้เห็นว่า $R^2 = 0.270$, $NSE = 0.211$, และ $PBIAS = 32.52\%$, ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจำลองไม่สามารถสะท้อนความเป็นจริงได้ดีนัก โดยเฉพาะในช่วงที่มีฝนตกหนัก

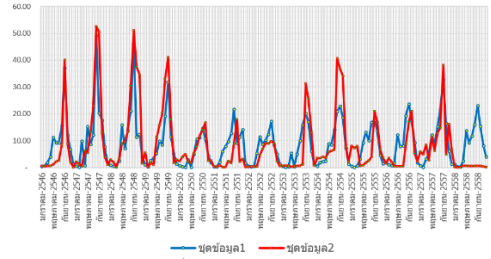
ก่อน Calibration i.17



ภาพที่ 13 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดก่อนการสอบเทียบ (Calibration) ที่สถานี I.17

- หลังการสอบเทียบ (Post-Calibration):หลังจากการสอบเทียบ, ผลการจำลองแสดงให้เห็นการปรับปรุงในระดับที่ชัดเจน โดย $R^2 = 0.565$, $NSE = 0.563$, และ $PBIAS = -6.18\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าได้แม่นยำขึ้น

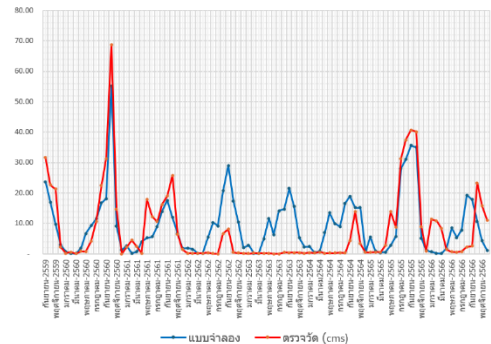
หลัง Calibration i.17



ภาพที่ 14 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดหลังการสอบเทียบ (Calibration) ที่สถานี I.17

- การตรวจพิสูจน์ (Verification):เมื่อทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยข้อมูลในช่วง พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2566, ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า $R^2 = 0.534$, $NSE = 0.511$, และ $PBIAS = -20.62\%$, ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองปริมาณน้ำท่าได้ดีขึ้นมากในช่วงเวลาที่ใช้ข้อมูลตรวจสอบ และมีความแม่นยำในการทำนายปริมาณน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริง

Verification i.17



ภาพที่ 15 กราฟปริมาณน้ำท่าที่จำลองและตรวจวัดในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) ที่สถานี I.17

จากผลการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์ของทั้งสองสถานี, เราสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง HEC-HMS สามารถจำลองปริมาณน้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพและใกล้เคียงกับข้อมูลจริงหลังจากการปรับเทียบแบบจำลอง และยังสามารถทำนายผลได้แม่นยำในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

ตาราง 1: ผลการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Verification) สำหรับสถานี I.14

แบบจำลอง	สถานี i.14		
	NSE	R^2	PBIAS
ก่อนการสอบเทียบ	0.227	0.359	41.42
หลังการสอบเทียบ	0.557	0.595	9.39
ตรวจพิสูจน์	0.502	0.507	4.81

ตาราง 2: ผลการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Verification) สำหรับสถานี I.17

แบบจำลอง	สถานี i.17		
	NSE	R^2	PBIAS
ก่อนการสอบเทียบ	0.211	0.270	32.52
หลังการสอบเทียบ	0.563	0.565	-6.18
ตรวจพิสูจน์	0.511	0.534	-20.62

4.2 ประเมินปริมาณน้ำท่าที่ I.17 , I.14 (กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)



1. ปีฝนมาก (Wet Year):

- ผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่า: ในปีฝนมาก จะพบว่า ปริมาณน้ำท่ามีการเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณฝนที่ตกลงมา โดยปริมาณน้ำท่ามักมีแนวโน้มสูงและการไหลบ่าของน้ำจะมีมากกว่าปกติ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการจัดการน้ำในลุ่มน้ำ เช่น การเพิ่มความเสี่ยงของน้ำท่วม

2. ปีฝนปกติ (Normal Year):

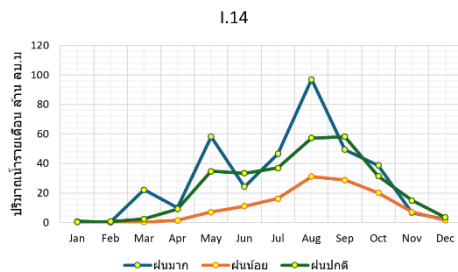
- ผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่า: ปีฝนปกติจะมีการตกของฝนในปริมาณที่สมดุล ทำให้ปริมาณน้ำท่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนที่ตกลงมาก่อนข้างตรงตามปกติ การไหลบ่าของน้ำจะไม่ได้รับผลกระทบที่มากเกินไปจากการตกฝน และสามารถใช้ในการบริหารจัดการน้ำได้อย่างเหมาะสม

3. ปีฝนน้อย (Dry Year):

- ผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่า: ในปีฝนน้อย ปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณฝนที่ตกลงมา โดยการไหลบ่าของน้ำจะน้อยและทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำในบางพื้นที่ อาจส่งผลกระทบต่อเกษตรกรรมและการใช้น้ำในพื้นที่ต่างๆ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ที่สถานี I.14

ตาราง 3 และภาพที่ 16 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่า (cms และล้าน ลบ.ม.) รายเดือนของปีฝนมาก ฝนปกติ และฝนน้อย



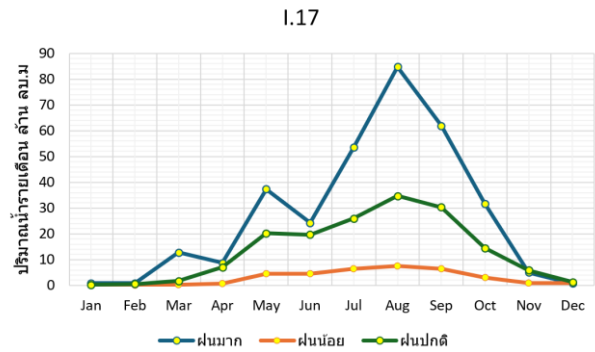
ภาพที่ 16 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนใน 3 กรณีฝน (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย) ที่สถานี I.14

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่า (cms และล้าน ลบ.ม.) แยกตามกรณีฝนที่สถานี I.14

i.14			
เดือน	ฝนมาก	ฝนน้อย	ฝนปกติ
ม.ค.	0.746245	0.434787	0.397161
ก.พ.	0.174729	0.2592	0.623314
มี.ค.	22.16683	0.242477	2.277058
เม.ษ.	10.017	1.32192	9.11952
พ.8.	58.18622	7.015123	34.67706
มิ.ย.	24.23952	10.94688	33.23952
ก.ค.	46.59643	16.19582	37.10044
ส.ค.	97.06726	31.16253	57.17311
ก.ย.	49.33764	28.79712	58.08096
ต.ค.	38.72323	20.15907	31.3841
พ.ย.	6.64092	7.05888	14.88528
ธ.ค.	2.117497	1.513394	3.437884
รวม	356.0135	125.1072	282.3954

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ที่สถานี I.17

ตาราง 4 และภาพที่ 17 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่า (cms และล้าน ลบ.ม.) รายเดือนของปีฝนมาก ฝนปกติ และฝนน้อย



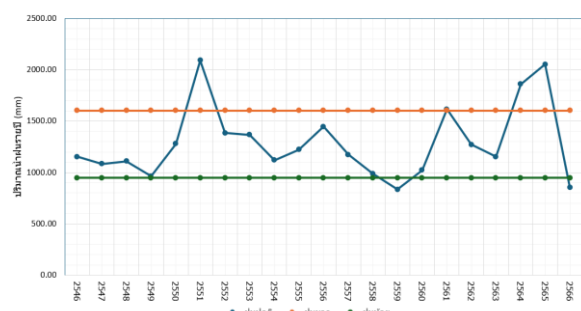
ภาพที่ 17 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนใน 3 กรณีฝน (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย) ที่สถานี I.17

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำท่า (cms และล้าน ลบ.ม.) แยกตามกรณีฝนที่สถานี I.17

i.17			
เดือน	ฝนมาก	ฝนน้อย	ฝนปกติ
ม.ค.	0.923086	0.081941	0.28716
ก.พ.	0.89424	0.001652	0.56687
มี.ค.	12.72756	0.35849	1.747342
เม.ษ.	8.797248	0.707314	7.005398
พ.8.	37.3549	4.471325	20.24615
มิ.ย.	24.29222	4.537512	19.6865
ก.ค.	53.54152	6.446973	26.00967
ส.ค.	84.77094	7.633064	34.67053
ก.ย.	61.97213	6.557544	30.30027
ต.ค.	31.701	3.032974	14.46908
พ.ย.	5.005152	0.867283	5.86046
ธ.ค.	0.800175	0.876765	1.275966
รวม	322.7802	35.57284	162.1254

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณฝนใน 3 กรณีการศึกษา (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย)

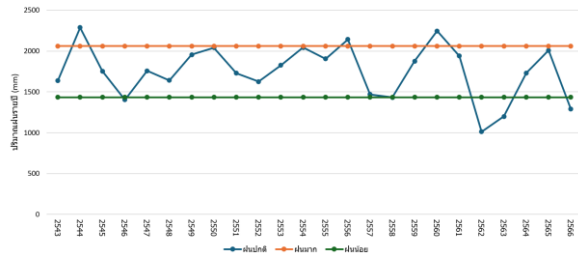
จากการวิเคราะห์ฝนมี 7 สถานี คือ 1.) สถานี 303001 เชียงของ 2.) สถานี 30300 เชียงราย 3.) สถานี 303307 เทิง 4.) สถานี 310003 เชียงคำ 5.) สถานี 310005 พะเยา 6.) สถานี 310004 พะเยากรมชล 7.) สถานี 303302 พวน และได้วิเคราะห์ความแปรปรวนของฝนของสถานี 303001 เชียงของ มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2544,2556,2560 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2546,2562,2563,2566 ดังภาพที่ 4.3.1





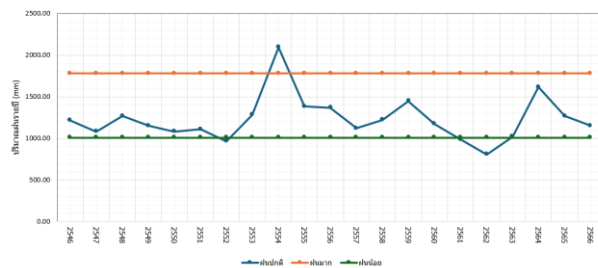
ภาพที่ 18 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 303001 เชียงของ

สถานี 303007 เชียงราย มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ.2550 ,2554,2556 ,2560 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2558,2562,2563,2566 ดังภาพที่ 4.3.2



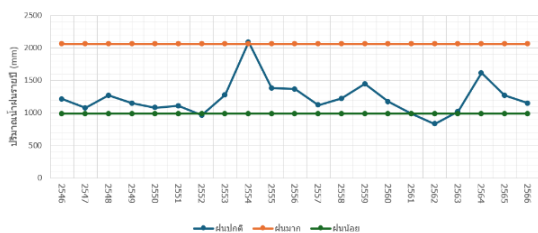
ภาพที่ 19 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 303007 เชียงราย

สถานี 303301 เทิง มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2552,2562 ดังภาพที่ 4.3.3



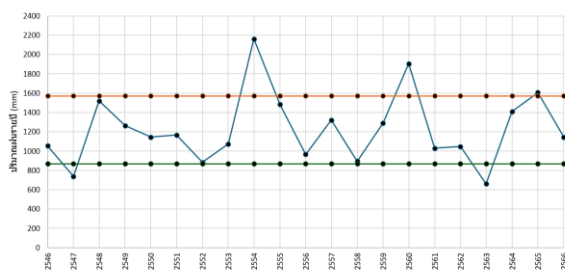
ภาพที่ 20 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 303301 เทิง

สถานี 310003 เชียงคำ มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2561,2562 ดังภาพที่ 4.3.4



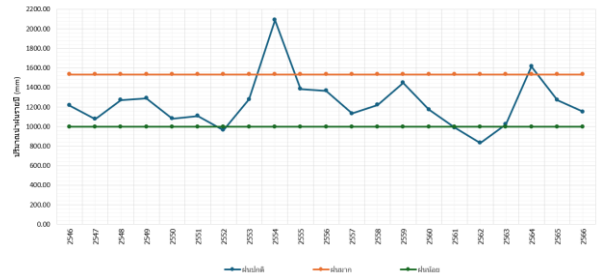
รูปที่ 21 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 310003 เชียงคำ

สถานี 310005 พะเยา มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554,2560, 2565 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2547,2560,2565 ดังภาพที่ 4.3.5



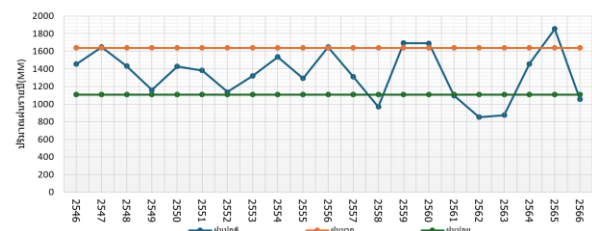
ภาพที่ 22 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 310005 พะเยา

สถานี 310004 พะเยากรมชล มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554, 2564 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2552,2562 ดังภาพที่ 4.3.6



ภาพที่ 23 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 310004 พะเยากรมชล

สถานี 303302 พาน มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2547,2556, 2559,2560,2565 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2558,2561,2562, 2563,2566 ดังภาพที่ 4.3.7



ภาพที่ 24 วิเคราะห์ผลของปริมาณฝนที่แปรปรวนต่อปริมาณน้ำท่า
ของสถานี 303302 พาน

5.สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงโดยใช้แบบจำลอง HEC-HMS ได้ดำเนินการจำลองปริมาณน้ำท่าใน 3 กรณีฝน (ฝนมาก, ฝนปกติ, ฝนน้อย) ที่สถานี I.14 และ I.17 โดยมีการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองในช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2566 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง HEC-HMS สามารถจำลองการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังการสอบเทียบ ($R^2 = 0.595$, $NSE = 0.557$, $PBIAS = 9.39\%$ สำหรับ I.14 และ $R^2 = 0.565$, $NSE = 0.563$, $PBIAS = -6.18\%$ สำหรับ I.17) แสดงถึงความแม่นยำในการทำนายปริมาณน้ำท่าที่ได้จากฝนที่ตกลงมาใน ปีฝนมาก ปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.14 และ I.17 สูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วง มิถุนายน-กันยายน ขณะที่ ปีฝนน้อย ปริมาณน้ำท่าลดลงมาก ทำให้เกิดปัญหายากแล้ง ผลการวิเคราะห์ในแต่ละปีฝน (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย) ที่สถานี I.14 และ I.17 แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนที่ชัดเจนระหว่างปีที่มีปริมาณฝนสูงและต่ำ ส่งผลกระทบต่อการจัดการน้ำ

5.2 อภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาในส่วนของการจำลองปริมาณน้ำท่า ในกรณีฝนต่างๆ ช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการตอบสนองของลุ่มน้ำอิงต่อฝนที่ตกลงมา โดยเฉพาะใน ปีฝนมาก ที่ปริมาณน้ำท่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่ง



อาจทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมได้ในบางพื้นที่ ขณะเดียวกัน ปีฝนน้อย จะส่งผลให้เกิดการขาดแคลนน้ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อเกษตรกรรมและการใช้น้ำในพื้นที่ การประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-HMS ในลุ่มน้ำยังสามารถใช้ในการทำนายและวางแผนการบริหารจัดการน้ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการเตือนภัยน้ำหลาก ในปีฝนมาก และการวางแผนรับมือภัยแล้ง ในปีฝนน้อย การศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจถึงการไหลของน้ำและการกระจายตัวของน้ำในลุ่มน้ำได้ดีขึ้น ข้อจำกัดของการศึกษา คือการพึ่งพาข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่าที่ได้จากสถานีที่มีอยู่ในพื้นที่ ซึ่งอาจมีความไม่สมบูรณ์หรือความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงในบางจุด นอกจากนี้, ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และ ลักษณะทางกายภาพ ของพื้นที่ลุ่มน้ำก็มีผลต่อการจำลองน้ำท่าที่อาจมีความซับซ้อนในการประเมินผลการไหลของน้ำ

5.3 ข้อเสนอแนะ

1.ควรมีการขยายพื้นที่ศึกษาการจำลองน้ำท่าโดยการเพิ่มจำนวนสถานี วัดน้ำท่า และ ฝน เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น และครอบคลุมพื้นที่ทั้งลุ่มน้ำ

2.ควรพิจารณาใช้ ข้อมูลภูมิอากาศ ที่มีความละเอียดมากขึ้น เช่น ข้อมูลจากดาวเทียม เพื่อเสริมความแม่นยำในการจำลองน้ำท่าในอนาคต

3.การศึกษาในอนาคตสามารถนำไปใช้ในการ วางแผนการใช้น้ำ และการบริหารจัดการแหล่งน้ำ ในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่นๆ รวมถึงการประเมินผลกระทบจาก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจะช่วยทำให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระยะยาวมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นพิเศษต่อ ดร. ขวัญสิรินา ธารวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการดำเนินงาน และช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องอย่างใกล้ชิด จนทำให้โครงการมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านงบประมาณและทรัพยากรที่จำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ด้านวิศวกรรมอุทกวิทยาและการจัดการทรัพยากรน้ำ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของโครงการฉบับนี้ ขอขอบคุณ กรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทาน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่ารายวัน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS รวมถึง กองสำรวจและจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองมีความสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). รายงานสถานการณ์ภูมิอากาศประเทศไทยประจำปี 2565. สืบค้นจาก: กรมอุตุนิยมวิทยา
- [2] U.S. Army Corps of Engineers. (2020). HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual Version 4.8. สืบค้นจาก: HEC-HMS
- [3] รยา สุกแสงฉาย และ ญัฐ มาแจ้ง. (2559). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์น้ำฝน-น้ำท่าของแบบจำลอง HEC-HMS ในลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์เกษตร, 47(3), 78-87.
- [4] พิศาล วงศ์สวัสดิ์. (2564). การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในลุ่มน้ำประเทศไทย. วารสารวิจัยและพัฒนา, 8(2), 45-59
- [5] อรุณศักดิ์ ศรีระวงศ์ (2560). การศึกษาการใช้แบบจำลอง HEC-HMS ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำลำปาง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 39(4), 123-135. สืบค้นจาก: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517311017>
- [6] ญัฐวัฒน์ นาทอง (2564). การใช้ข้อมูลจากดาวเทียม SMAP ในการประเมินการระเหยและซึมผ่านของน้ำในลุ่มน้ำลำปาง. วารสารวิศวกรรมโยธา, 12(2), 65-74. สืบค้นจาก: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517311017>
- [7] สรรพา พรหมศรี (2562). การศึกษาการใช้วิธี SCS Curve Number ในการคำนวณน้ำท่าในลุ่มน้ำลำปายมาศ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ. สืบค้นจาก: <https://conference.thaince.org/index.php/nccce27/article/view/1565>
- [8] Hydrologic Engineering Center. (2025). HEC-HMS User's Manual Version 4.13. U.S. Army Corps of Engineers. สืบค้นจาก: HEC-HMS User's Manual v.4.10-4.13 HEC Army+15HEC Army+15HEC Army+
- [9] Hydrologic Engineering Center. (2025). Muskingum Model. In HEC-HMS Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers. สืบค้นจาก: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/channel-flow/muskingum-model>
- [10] บรรจง อุดมธนา. (2556). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านอุทกวิทยาในลุ่มน้ำเจ้าพระยาและลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] Natural Resources Conservation Service (2007). National Engineering Handbook – TR-55 Urban hydrology for small watersheds. USDA (SCS).
- [12] Hydrologic Engineering Center (2025). HEC-HMS Technical Reference Manual, Transform methods: User-Specified Unit Hydrograph. U.S. Army Corps of Engineers.
- [13] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.
- [14] Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, no. 79-10, Institute of Engineers Australia National Conference.



การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่าง แม่ต้าโดยแบบจำลอง Hec-HMS

A Study of Rainfall Variability Impact on Runoff in the Upper Ing River Basin and Inflow to the Mae Tam Reservoir Using the HEC-HMS Model

นายธนูศิลป์ พิมพ์พันธ์^{1*} นายวรวิญญู พงษ์พันธ์² นายสิทธิชัย รำไพ³ และนางสาวนันทิกานต์ กองตัน⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101890@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนที่มีต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ต้า โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS เป็นเครื่องมือในการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยา เพื่อประเมินสถานการณ์น้ำภายใต้เงื่อนไขปีฝนมากฝนน้อย และฝนปกติ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลน้ำฝนรายวัน 3 สถานี และข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวันจากสถานีวัดน้ำ 1.17 ตั้งแต่ 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2566 แบบจำลอง HEC-HMS ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวแทนของลุ่มน้ำ และผ่านการสอบเทียบโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2546-2558 และตรวจพิสูจน์โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2559-2566 ซึ่งค่าสถิติที่ได้ เช่น Nash-Sutcliffe Efficiency (E), Coefficient of determination (R^2), และ Percent Bias (PBIAS) ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่สถานี 1.17 และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ต้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงในพื้นที่ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนในแต่ละกรณีศึกษายังช่วยให้สามารถคาดการณ์ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำแม่ต้าได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ และเป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาในลุ่มน้ำอื่น ๆ ในอนาคต

คำสำคัญ: ความแปรปรวนปริมาณน้ำฝน, ปริมาณน้ำท่า, อ่างเก็บน้ำแม่ต้า, แบบจำลอง HEC-HMS, ลุ่มน้ำอิงตอนบน

Abstract

This study aims to analyze the impact of rainfall variability on runoff in the Upper Ing River Basin and the inflow to the Mae Tam Reservoir. The HEC-HMS hydrological model was utilized as a tool to simulate hydrological processes and assess water conditions under different scenarios: wet, dry, and normal rainfall years. The data used in this study included daily rainfall data from three stations and daily streamflow data from gauging station 1.17 over a 21-year period, from January 1, 2003, to December 31, 2023. The HEC-HMS model was developed to represent the basin and was calibrated using data from 2003-2015 and validated with data from 2016-2023. The statistical values obtained, such as the Nash-Sutcliffe Efficiency (E), Coefficient of determination (R^2), and Percent Bias (PBIAS) The results of the study indicate that the streamflow at station 1.17 and the inflow to the Mae Tam Reservoir are directly correlated with the amount of rainfall in the area. The developed model can effectively simulate streamflow conditions in the Upper Ing River Basin. Furthermore, the assessment of water resources under each study case helps to accurately predict the water volume in the Mae Tam Reservoir, which is highly beneficial for water resource management planning in the area and serves as a prototype for future studies in other similar basins.

Keywords: Rainfall Variability, Streamflow, Mae Tam Reservoir, HEC-HMS Model, Upper River Basin



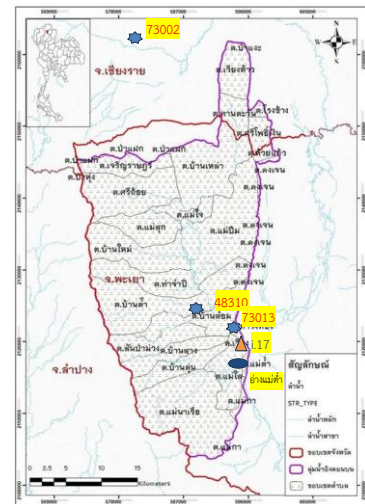
1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นเขตร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับมรสุม และมีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนในแต่ละปีค่อนข้างสูง การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศ ในปัจจุบันปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ก่อให้เกิดความผันผวนของปริมาณน้ำฝนในหลายภูมิภาคของประเทศไทย ส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติบ่อยครั้ง อาทิ น้ำท่วมฉับพลัน และภัยแล้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อการเกษตร การจัดการน้ำ รวมถึงการดำเนินชีวิตของประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวแม่น้ำอิงเป็นแม่น้ำสายหลักของจังหวัดพะเยาและจังหวัดเชียงราย ลุ่มน้ำอิงตอนบนเริ่มต้นจากจังหวัดเชียงรายมีต้นน้ำจากเทือกเขาตะนาวสี จังหวัดเชียงราย ไหลลงมาในที่ราบในเขตอำเภอแม่ใจ จังหวัดพะเยา แล้วไหลลงสู่กว๊านในเขตอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา อ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ ซึ่งเป็นโครงการอ่างเก็บน้ำอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยมีวัตถุประสงค์ของโครงการ คือ เพื่อให้เป็นแหล่งน้ำบรรเทาความเดือดร้อนในการขาดแคลนน้ำสำหรับการเกษตรและอุปโภค-บริโภคของราษฎรอย่างเพียงพอตลอด ปีและมีประสิทธิภาพ โดยช่วยในการส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูกของราษฎรทั้งหมด 7 หมู่บ้านได้อย่างทั่วถึง จากความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศดังกล่าวจึงส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างแม่ต๋ำ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ แบบจำลอง HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของลุ่มน้ำอิงตอนบน และประเมินผลกระทบของความแปรปรวนปริมาณน้ำฝนที่มีต่อปริมาณน้ำท่า และปริมาณน้ำท่าไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ โดยใช้ข้อมูลน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาจำนวน 3 สถานีและข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) ในช่วงระยะเวลา ปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2566 รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน การใช้แบบจำลอง HEC-HMS ในการศึกษาทางอุทกวิทยาที่ผ่านมานั้น ได้แสดงให้เห็นถึง ประโยชน์ที่ชัดเจนในหลายด้าน ทั้งเชิงวิชาการและเชิงการจัดการน้ำ เช่น การศึกษาศักยภาพของลุ่มน้ำสำหรับพัฒนาอ่างเก็บน้ำและการบริหารจัดการน้ำต้นทุน การพยากรณ์น้ำท่วมและการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านอุทกภัย เป็นต้น

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนที่มีต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ โดยใช้แบบจำลอง HEC-HMS เป็นเครื่องมือในการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยา เพื่อประเมินสถานการณ์น้ำภายใต้เงื่อนไขของปีฝนมาก ปีฝนน้อย และปีฝนปกติ ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในพฤติกรรมของลุ่มน้ำ และสนับสนุนการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 1 ขอบเขตลุ่มน้ำอิงตอนบน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 การสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงตอนบนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์HEC-HMS
- 1.2.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำฝน (กรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)
- 1.2.3 ประเมินปริมาณน้ำท่าที่ I.17(บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) และปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ (กรณีศึกษา ปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มีจุดมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน และน้ำท่าในลุ่มน้ำ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิง

- ข้อมูลน้ำฝนรายวันในพื้นที่ศึกษา 3 สถานี และปริมาณน้ำท่ารายเดือน จากสถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา)
- ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งรวบรวมจาก กองสำรวจและจำแนกดินกรมพัฒนาที่ดิน
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ ได้แก่ พื้นที่ลุ่มน้ำ รูปร่างของลุ่มน้ำและเส้นทางการไหลน้ำจาก ข้อมูล DEM (Digital Elevation Model)

1.3.2 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Validation)

การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี i.17 โดยใช้ข้อมูล 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2558 ได้ทำการปรับพารามิเตอร์เพื่อให้แบบจำลอง HEC-HMS มีความแม่นยำในการจำลองการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาตามข้อมูลที่สอบเทียบ ส่วนการตรวจพิสูจน์ (Validation) จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี i.17 โดยใช้ข้อมูล 1 มกราคม 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2566

เพื่อทดสอบความสามารถของแบบจำลองในการทำนายปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาดังกล่าวโดยการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลองจะทำ



การคำนวณ Coefficient of Determination (R^2) Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) และ Percent Bias (PBIRS)

1.3.3 การใช้แบบจำลอง HEC-HMS

แบบจำลอง HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) จะถูกใช้ในการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ลำน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ตำ โดยการใช้ข้อมูลน้ำฝนจากสถานี 480310 (ต.บ้านดอม อ.เมือง จ.พะเยา) สถานี 73013 (ประมงน้ำจืดพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา) สถานี 73002 (อ.พาน จ.เชียงราย) เพื่อจำลองการไหลของน้ำและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝนต่อน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ตำ

1.4 ประโยชน์งานวิจัย

1.4.1 ด้านการพัฒนาแบบจำลองเพื่อบริหารจัดการลุ่มน้ำอิงตอนบน โดยได้พัฒนาแบบจำลอง HEC-HMS ที่ผ่านการเปรียบเทียบ และตรวจสอบความแม่นยำด้วยข้อมูลจริงจากสถานีวัดน้ำ i.17 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบนอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 ด้านการวิเคราะห์ผลกระทบจากความแปรปรวนของฝนต่อทรัพยากรน้ำ การจำแนกปีฝนออกเป็นปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ ทำให้สามารถประเมินผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณฝนที่มีต่อปริมาณน้ำท่าได้อย่างเป็นระบบ

1.4.3 ด้านการจัดการน้ำต้นทุนของอ่างเก็บน้ำแม่ตำ ผลการประเมินปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ตำในแต่ละกรณีศึกษา ช่วยให้สามารถคาดการณ์ปริมาณน้ำต้นทุนในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริง

1.4.4 ด้านการขยายผลเชิงวิชาการและเชิงพื้นที่ โดยกระบวนการพัฒนาแบบจำลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถใช้เป็นต้นแบบในการดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาแบบจำลองในลุ่มน้ำอื่นที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกันได้ในอนาคต อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน และการวิจัยในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับอุทกวิทยา และวิศวกรรมแหล่งน้ำ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การไหลบ่าของน้ำผิวดิน (Surface Runoff Theory)

การศึกษาการไหลบ่าของน้ำผิวดิน (Surface Runoff Theory) คือ กระบวนการที่น้ำฝนส่วนเกินจากการซึมผ่านดินจะไหลกระจายบนผิวดิน และไหลรวมลงสู่อ่างเก็บน้ำหรือแม่น้ำ ปริมาณการไหลบนผิวดินจะขึ้นอยู่กับอัตราการตกของฝน ความสามารถในการซึมผ่านของดิน ความชันของพื้นที่ และลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน การไหลบนผิวดินได้นำมาจำลองด้วยแบบจำลอง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับปริมาณน้ำท่า และเพื่อประเมินผลกระทบของฝนที่มีต่อการจัดการน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบน และอ่างเก็บน้ำแม่ตำ

2.1.2 การคายน้ำและการคายระเหย (Evaporation and Evapotranspiration Theory)

การซึมผ่าน และการระเหย เป็นกระบวนการสำคัญในวงจรน้ำ (Hydrologic Cycle) ที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยที่จะพิจารณากระบวนการระเหยจะถูกนำไปเป็นหนึ่งใน Loss Model ซึ่งช่วยให้การประเมินปริมาณน้ำท่าที่แท้จริงแม่นยำขึ้น เพราะคำนวณค่าน้ำที่สูญเสียไปก่อนจะเกิดการไหลบ่าหน้าดิน การประยุกต์ใช้หลักการเหล่านี้ร่วมกับแบบจำลอง HEC-HMS ช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์น้ำฝนสู่ลำน้ำได้อย่างสมจริง และรองรับการวางแผนจัดการน้ำต้นทุนได้อย่างเหมาะสม

2.1.3 แบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrologic Modeling Theory)

แบบจำลองอุทกวิทยา คือ กระบวนการจำลองพฤติกรรมของน้ำในลุ่มน้ำตั้งแต่การตกของฝน การซึมผ่าน การระเหย การคายระเหย การไหลบ่าบนผิวดิน จนถึงเกิดการเกิดน้ำท่า โดยใช้หลักคณิตศาสตร์ และข้อมูลเชิงกายภาพของพื้นที่ ในงานวิจัยนี้ได้นำมาวิเคราะห์น้ำท่า และคาดการณ์ปริมาณน้ำ ของพื้นที่ลุ่มน้ำหรือระบบระบายน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำไหลลงอ่างแม่ตำ

2.1.4 การจำลองน้ำฝน - น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation Theory)

การจำลองน้ำฝน - น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation) คือ กระบวนการทางวิศวกรรมอุทกวิทยาที่ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์หรือเชิงตัวเลข เพื่ออธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนลุ่มน้ำให้กลายเป็นน้ำท่าที่เกิดขึ้นจริงและไหลไปตามพื้นที่ต่ำ รวมถึงการสะสมในร่องน้ำและอ่างเก็บน้ำ จุดประสงค์ของการจำลองนี้คือ เพื่อช่วยวิเคราะห์และพยากรณ์พฤติกรรมของน้ำ เช่น ปริมาณน้ำท่า ระดับน้ำ การเกิดน้ำท่วม หรือความเพียงพอของน้ำต้นทุนในฤดูแล้ง โดยทำการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ลำน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบน และประเมินปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ตำภายใต้สภาพฝนหลายรูปแบบ เช่น ปีฝนมาก ปีฝนปกติ และปีฝนน้อย กระบวนการนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านอุทกภัย การจัดสรรน้ำต้นทุน และการวางแผนจัดการน้ำได้อย่างเป็นระบบ

2.1.5 แบบจำลอง (HEC-HMS Model Theory)

แบบจำลอง HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่พัฒนาโดย U.S. Army Corps of Engineers ใช้สำหรับวิเคราะห์และจำลองกระบวนการ Rainfall-Runoff ในลุ่มน้ำ มีโมเดลสำคัญ ได้แก่ Meteorological Model, Loss Model, Transform Model และ Routing Model ซึ่งช่วยวิเคราะห์การสูญเสีย การแปลงน้ำฝนส่วนเกินเป็น Hydrograph และการเคลื่อนตัวของน้ำในร่องน้ำ



2.1.6 Meteorological Model

Meteorological Model คือ แบบจำลองทางอุตุนิยมวิทยาซึ่งในแบบจำลอง HEC-HMS ใช้วิธี Gage wight ซึ่งฝนจะถูกแบ่งค่าน้ำหนักฝนตามวิธี (Thiessen polygon) ซึ่งจะมีวิธีทำดังนี้ มีสถานีฝนอยู่ 3 สถานีจะกำหนดเป็นจุดศูนย์กลางของพื้นที่แล้วลากเส้นเชื่อมทั้งสามจุดเป็นรูปสามเหลี่ยมจากนั้นลากเส้นผ่ากลางให้ทั้ง 2 ฝั่งเป็นมุมฉากจากนั้นลากเส้นผ่ากลางระหว่างส่วนล่างกับส่วนบนเป็นอันเสร็จสิ้น

2.1.7 กระบวนการ (Subbasin loss closs Modle): เลือกใช้วิธี SCS Curve Number

SCS Curve Number เป็นเส้นโค้งการไหลบ่า เป็นพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ที่ถูกพัฒนาโดย USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS) เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า (Runoff) ที่เกิดจากปริมาณน้ำฝนวิธี SCS Curve Number คำนวณปริมาณน้ำท่าสะสม (Pe) จากปริมาณฝนสะสม (P) โดยมีสูตรพื้นฐานดังนี้:

$$P_e = \frac{(P - I_a)}{(P - I_a) + S}$$

โดยที่ I_a คือ การสูญเสียเริ่มแรก และ S คือศักยภาพการกักเก็บน้ำสูงสุดของดิน ซึ่งสัมพันธ์กับค่า CN ด้วยสมการ $S = \frac{1000}{CN} - 10$ (สำหรับหน่วยเป็นนิ้ว) โดยทั่วไปแล้ว I_a จะประมาณเป็น 0.2S

2.1.8 กระบวนการ (Subbasin Transform): เลือกใช้วิธี Clark Unit Hydrograph

Clark Unit Hydrograph เป็นการคิดแบบหนึ่งของน้ำโดยใช้เวลาในการไหลถึงจุดออกจะได้เวลา โดยการที่ฝนตก หน่วยจะใช้ค่าทั้ง 2 ค่าในการในการใส่ในแบบจำลอง Time of Concentration (T_c)

$$T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times S^{-0.385}$$

L = ความยาวของสายน้ำ

S = ความลาดชันของทางน้ำ

โดยที่ Storage Coefficient เป็นการหวนวน้ำชั่วคราวก่อนจะนำลงสู่แม่น้ำสายหลักมีสูตรดังนี้

$$R = \frac{T_c}{k}$$

T_c = Time of Concentration

K = ค่าคงที่กับลักษณะของกลุ่มน้ำ $K = 1-1.5$

2.1.9 กระบวนการ (Subbasin BaseFlow): เลือกใช้วิธี Constant Monthly

Constant Monthly การสูญเสียน้ำฝนแบบคงที่รายเดือน เป็นวิธีการหนึ่งในการคำนวณการสูญเสียน้ำฝน (Loss Method) ที่ใช้ในแบบจำลองอุทกวิทยา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณปริมาณน้ำฝนที่ไม่ได้กลายป็นน้ำท่า (runoff) แต่ถูกกักเก็บ ซึมลงดิน หรือระเหยไป วิธีการนี้จัดเป็นวิธีการแบบง่าย (simplified approach) ที่กำหนดให้มีอัตราการสูญเสียน้ำฝนที่คงที่ในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี

2.1.10 9 กระบวนการ (Reach routing): เลือกใช้วิธี Muskinggum

Reach routing การเคลื่อนที่ของน้ำท่าในลำน้ำ

ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของกราฟน้ำท่า (hydrograph) เมื่อไหลผ่านช่วงลำน้ำ (river reach) หรือช่องทางระบายน้ำ การจำลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (attenuation) และเวลาการเดินทาง (lag) ของคลื่นน้ำท่วมที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งตามแนวลำน้ำ

Muskinggum คือ วิธีการทางอุทกวิทยาที่ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำในลำน้ำ ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ในลำน้ำเมื่อน้ำไหลผ่าน โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำไหลเข้าและไหลออกของลำน้ำ

2.1.11 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง (Model Calibration and Validation Theory)

การปรับค่าพารามิเตอร์ภายในแบบจำลองให้ผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด โดยอ้างอิงข้อมูลวัดจริงในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้โมเดลสะท้อนสภาพจริงของพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม โดยนำข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่า จากสถานี 1.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) สำหรับช่วงปี พ.ศ. 2546-2558 ในการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS และใช้ข้อมูลจริงในช่วงปี พ.ศ. 2559-2566 สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง เพื่อให้มั่นใจว่าโมเดลสามารถใช้วิเคราะห์และพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าได้อย่างถูกต้อง

2.1.12 ความแปรปรวนของภูมิอากาศ

ความแปรปรวนของภูมิอากาศ (Climate Variability) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของลักษณะภูมิอากาศในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้น และความถี่ของเหตุการณ์สุดขั้ว เช่น น้ำท่วมและภัยแล้ง

2.1.13 การจัดการน้ำ (Water Resources Management)

คือ กระบวนการวางแผนและดำเนินการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์น้ำอย่างยั่งยืน ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพครอบคลุมการเก็บกักน้ำ การกระจายน้ำ การใช้ประโยชน์ที่ดิน การควบคุมความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติ และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

2.1.14 กระบวนการ (Subbasin precipitation): เลือกใช้วิธี Gage Weights โดยใช้ทฤษฎีของ Thiessen Polygon Method

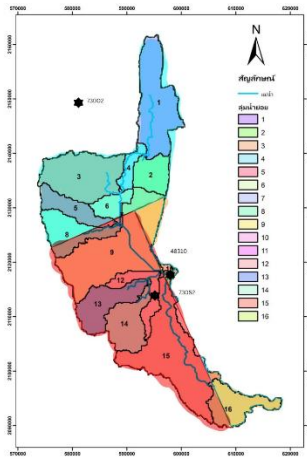
คือ เทคนิคทางอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยา ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในพื้นที่หนึ่ง โดยอิงจากข้อมูลจากสถานีวัดน้ำฝนหลายแห่ง โดยถือว่าปริมาณน้ำฝนภายในแต่ละรูปมีค่าเท่ากับที่วัดได้จากสถานีนั้น ดังภาพที่ 2

$$w_i = \frac{A_i}{A_{total}}$$

W_i = Weight ของแต่ละสถานีฝน

A_i = พื้นที่ขอบเขตแต่ละสถานีฝน

A_{Total} = พื้นที่รวมของทุกสถานีฝน Weight



ภาพที่ 2 ตำแหน่งสถานีฝน และรูปสามเหลี่ยมทิตเซน(Thiessen Polygon)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. การระเหยและการคายน้ำ (Evaporation and Evapotranspiration Theory)

การศึกษาการสูญเสียน้ำจากการระเหยของอ่างเก็บน้ำขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทย (อารียา ฤทธิมา และคณะ) ได้ทำการนำทฤษฎีการระเหยมาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการเก็บสำรวจ โดย 4 วิธี ได้แก่ วิธีกังน้ำ วิธีเอมไพริกัล วิธีเคลื่อนย้ายมวล และวิธีผสมผสาน เพื่อป้องกันการระเหยของอ่างเก็บน้ำที่อยู่ในพื้นที่เขตร้อนที่มีการสูญเสียปริมาณน้ำสูง

2.2.2 แบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrologic Modeling Theory)

การประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลองอุทกวิทยา HEC-HMS สถานี P.1 แม่น้ำปิง สะพานนารัฐ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ (สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา) ได้ทำการสอบเทียบแบบจำลองเพื่อพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของแต่ละสถานีน้ำท่าที่ได้ทำการศึกษา โดยการสอบเทียบเป็นกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง และการพิสูจน์แบบจำลองเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบมาแล้วโดยนำไปใช้กับเหตุการณ์อื่นๆ การสอบเทียบจึงทำไปเพื่อทราบถึงวิธีการที่ใช้ประเมินน้ำท่าได้ดีที่สุด

2.2.3. การจัดการน้ำ (Water Resources Management)

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศด้วยแบบจำลองภูมิอากาศ BCC-ESM_RCP4.5 บริเวณเทศบาลเมืองสุโขทัย-ลก จังหวัดนครราชสีมา (ณัฐพล แก้วทอง และคณะ) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในสภาพปัจจุบันและอนาคตด้วยแบบจำลอง HEC-HMS โดยใช้ชุดข้อมูลฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศ CNEM_CM5_RCP4.5 พบว่าสถานการณ์การเกิดน้ำท่าในลุ่มน้ำโขง-ลกในอนาคตมีปริมาณความรุนแรงในการเกิดอุทกภัยน้อยลง แต่มีความถี่ในการเกิดมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งถ้ามองในมิติด้านการบริหารจัดการน้ำจะสามารถจัดการได้ง่ายขึ้นเนื่องจากความรุนแรงในการเกิดมีความรุนแรงน้อยลง แต่จะมีปริมาณความถี่ที่สูงขึ้น

2.2.4. การจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation Theory)

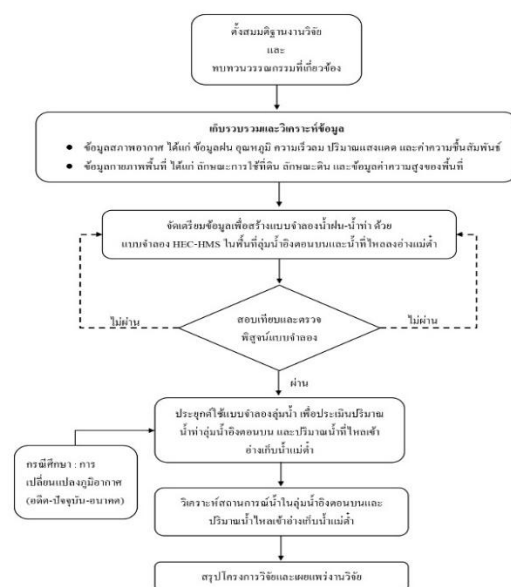
การสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าสำหรับน้ำท่วมฉับพลันในพื้นที่เมืองบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น (ชีรเมธ หิรัญพัฒนานนท์ และคณะ) ได้ทำการทำแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า เพื่อประเมินปริมาณและระยะเวลาการเกิดน้ำท่วมสูงสุดจากแบบจำลอง HEC-HMS ในพื้นที่เมืองบ้านไผ่ จ.ขอนแก่น โดยใช้โปรแกรม QGIS ช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข, แผนที่การใช้ที่ดิน แผนที่ลักษณะของดินในการประเมินลักษณะทาง และอุทกวิทยาซึ่งนำข้อมูลไปส่งแนวทางการเพื่อป้องกันและเตือนภัยน้ำท่วมต่อไปในอนาคต

2.2.5. เกี่ยวกับแบบจำลอง (HEC-HMS Model Theory)

จากการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าลุ่มน้ำลำพระเพลิง โดยใช้โปรแกรม HEC-HMS สำหรับสอบเทียบ และตรวจพิสูจน์ (ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง) ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าและค่าตรวจวัดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำลำพระเพลิงรายวัน โดยการประเมินประสิทธิภาพทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ RMSE, NSE และ PBAIS เพื่อประเมินประสิทธิภาพของผลที่ได้จากแบบจำลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ โดยใช้แบบจำลอง HEC-HMS เพื่อประเมินสถานการณ์น้ำภายใต้เงื่อนไข 3 กรณีการศึกษา คือ ปีฝนมาก ปีฝนน้อย และปีฝนปกติ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่โดยแผนผังดำเนินงานวิจัยดังแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลักดังภาพที่ 3

3. ดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย



3.1 การตั้งสมมติฐานงานวิจัย และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง: กำหนดประเด็นปัญหาและสมมติฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน และผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่า พร้อมทั้งทบทวนองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างกรอบแนวคิด ซึ่งรวมถึงทฤษฎีการไหลบ่าบนผิวดิน (Surface Runoff) การระเหยและการคายระเหย (Evaporation and Evapotranspiration) แบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrologic Modeling) การจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Simulation) การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง (Model Calibration and Validation) ความแปรปรวนของภูมิอากาศและการจัดการน้ำ (Climate Variability and Water Resources Management) รวมถึงทฤษฎีของแบบจำลอง HEC-HMS

3.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล: รวบรวมข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนรายวัน และข้อมูลกายภาพ ข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่า รายวันได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทานตามลำดับ

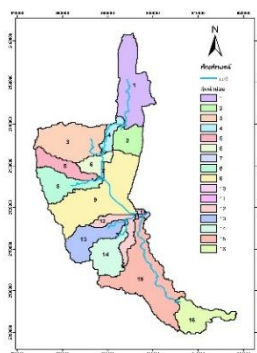
3.2.1 เลือกใช้ข้อมูลน้ำฝนรายวัน 3 สถานี คือ 1.) สถานี 480310 (ต.บ้านต้อม อ.เมือง จ.พะเยา) 2.) สถานี 73013 (ประมงน้ำจืดพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา) 3.) สถานี 73002 (อ.พาน จ.เชียงราย) ตั้งแต่ปี พ.ศ.2546-พ.ศ. 2566 (รวม 21ปี)

3.2.2 เลือกใช้ข้อมูลน้ำท่า 1 สถานีคือ สถานี i.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) สำหรับช่วงปี 2546-2566 (21ปี)

3.3 การจัดเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าด้วยแบบจำลอง HEC-HMS: เตรียมข้อมูลที่รวบรวมได้เพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง HEC-HMS สำหรับลุ่มน้ำอิงตอนบนและน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำแบบจำลอง HEC-HMS ใช้ในการจำลองกระบวนการน้ำฝนสู่ น้ำท่า โดยมีโมดูลสำคัญได้แก่ Sub-basinArea, Meteorological Model, Loss Model, Transform Model และ Routing Model

3.4 การสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำ (Basin Model)

3.4.1 การนำเข้าข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area) โดยแบ่งกลุ่มลุ่มน้ำย่อยตามเส้นทางการไหลของน้ำ แล้วใส่ข้อมูลขนาดพื้นที่นั้นลงในแบบจำลองลุ่มน้ำ ดังตัวอย่างภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 ลุ่มน้ำย่อยจากแบบจำลอง

Subbasin	Area (KM2)
Subbasin-2	176.445
Subbasin-1	110.655
Subbasin-5	189.63
Subbasin-4	69.7725
Subbasin-3	61.38
Subbasin-10	128.9925
Subbasin-11	103.185
Subbasin-8	63.45
Subbasin-9	61.785
Subbasin-7	36.1125
Subbasin-6	1.755

ภาพที่ 5 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)

3.4.2 ใส่ข้อมูลการสูญเสีย (Loss) ของแต่ละพื้นที่ย่อย (sub-basin-Area) ประกอบด้วย

1.) Initial abstraction (I) คือ ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้นโดยใช้วิธี SCS Runoff Curve Number (Soil Conservation Service, 1986)

จากความสัมพันธ์ $I_a = 0.2 S$ และ $S = (1,000/CN) - 10$ เมื่อ CN คือ หมายเลขโค้งน้ำท่า (Curve Number) S คือ การกักเก็บน้ำในชั้นดินสูงสุดหลังจากที่ฝนเริ่มตก ดังตัวอย่างในภาพที่ 6

2.) Curve Number (CN) คือ หมายเลขโค้งน้ำท่าโดยพิจารณาจากลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตลุ่มน้ำอิงตอนบนดังตัวอย่างในรูปที่ 5

3.) Impervious คือ ร้อยละของพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ โดยพิจารณาจากพื้นที่อยู่อาศัยของประชากรในเขตลุ่มน้ำอิงตอนบน ซึ่งพื้นที่มีประชากรที่อยู่อาศัยอยู่เป็นจำนวนมากจะประมาณค่า Impervious ได้สูงกว่าพื้นที่ที่มีประชากรที่อยู่อาศัยอยู่น้อย เช่น พื้นที่ป่า พื้นที่การเกษตร เป็นต้น ดังตัวอย่างภาพที่ 5

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
Subbasin-2	21.77	76.18091	5
Subbasin-1	28.12	77.077156	5
Subbasin-5	21.14	65.425958	5
Subbasin-4	18.14	66.322204	5
Subbasin-3	13.52	67.21845	5
Subbasin-10	16.19	77.077156	5
Subbasin-11	19.81	56.463498	5
Subbasin-8	15.17	61.840974	5
Subbasin-9	14.23	65.425958	5
Subbasin-7	8.25	64.529712	5
Subbasin-6	0.82	72.595926	5

ภาพที่ 6 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลการสูญเสีย (Loss) ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)

3.4.3 นำเข้าข้อมูลการไหลพื้นฐานของน้ำที่ไหลในลำน้ำก่อนที่จะเกิดน้ำท่าในแต่ละเดือน (Baseflow) ในแต่ละเดือนของแต่ละพื้นที่ย่อย (sub-basin Area) โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ดังตัวอย่างภาพที่ 7

Subbasin	January Baseflow (M3/S)	February Baseflow (M3/S)	March Baseflow (M3/S)	April Baseflow (M3/S)	May Baseflow (M3/S)
Subbasin-2	0.86082	0.85987	0.83020	0.44963	1.5086
Subbasin-1	1.3726	1.3711	1.3238	0.71696	2.4056
Subbasin-5	0.48099	0.48047	0.46389	0.25124	0.84296
Subbasin-4	0.54278	0.54218	0.52348	0.28351	0.95125
Subbasin-3	1.4752	1.4736	1.4227	0.77054	2.5853
Subbasin-10	0.0136527	0.0136377	0.0131671	0.0071312	0.0239269
Subbasin-11	0.28093	0.28062	0.27094	0.14674	0.49234
Subbasin-8	0.49360	0.49305	0.47604	0.25782	0.86505
Subbasin-9	0.48064	0.48012	0.46355	0.25106	0.84235
Subbasin-7	1.0035	1.0024	0.96778	0.52415	1.7586
Subbasin-6	0.80271	0.80183	0.77416	0.41928	1.4068

ภาพที่ 7 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในแต่ละเดือนลุ่มน้ำย่อย (sub-basin-Area)



3.4.4 นำเข้าข้อมูลการหน่วงของน้ำพื้นฐานที่ใช้เวลาในการเดินทางจากจุดการไหลของแต่ละลำน้ำจนถึงจุดวัดน้ำ 1.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) โดยมีค่าที่ต้องใส่คือ Muskingum K จะเป็นเวลาหน่วงของน้ำจนถึงจุดออก และ Muskingum X จะมีค่าประมาณ 0 ถึง 0.5 โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ดังตัวอย่างภาพที่ 8

Reach	Initial Type	Initial Discharge (M3/S)	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
Reach-1	Discharge = Inflow		49.75232	0.155453	1
Reach-2	Discharge = Inflow		39.54789	0.1654789	1
Reach-3	Discharge = Inflow		12.8452	0.268452	1

ภาพที่ 8 ตัวอย่างการใส่ข้อมูล (Reach routing): Muskingum

3.4.5 นำเข้าข้อมูลในการใส่ (Subbasin precipitation): เลือกใช้วิธี Gage Weights โดยใช้ทฤษฎีของ Thiessen Polygon Method โดยใช้ภาพที่ 2 ในการอ้างอิงการใช้ Gage Weights ของแต่ละ Subbasin โดยการดูแต่ละ Polygon ว่าอยู่ในเขตแต่ละสถานี โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ดังตัวอย่างภาพที่ 9

Element Name: Subbasin-9		
Gage Name	Depth Weight	Time Weight
48010	0.15	1
73002	0.15	1
73052	0.7	1

ภาพที่ 9 ตัวอย่างการใส่ข้อมูล Gage Weights แต่ละ Subbasin

3.5 การสอบเทียบและพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Validation)

- การสอบเทียบ (Calibration): ปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง HEC-HMS ให้ผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับข้อมูลน้ำท่าที่สังเกตได้จริง โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี 1.17 (บ้านเจดีย์งาม) ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2558

- การพิสูจน์ (Validation): ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองด้วยข้อมูลน้ำท่าที่สถานี 1.17 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2566 การประเมินประสิทธิภาพทั้งสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ใช้ค่า Coefficient of Determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) Percent Bias (PBIRS) ซึ่งมีการคำนวณดังนี้

E คือ Nash-Sutcliffe Efficiency O_i คือ ค่าข้อมูลตรวจวัดจริง $\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดจริง และ P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

r คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ O_i คือ ค่าข้อมูลตรวจวัดจริง

$\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดจริง

P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

$\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลค่าที่ได้จากแบบจำลอง

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right) \times 100 \quad (3)$$

PBIAS คือ Percent Bias O_i คือ ค่าข้อมูลตรวจวัดจริง และ P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

3.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำเพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า และน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ต้า ภายใต้กรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (ปีฝนมาก ฝนน้อย ฝนปกติ): นำแบบจำลอง HEC-HMS ที่ผ่านการสอบเทียบและพิสูจน์แล้ว มาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ต้า โดยจำลองภายใต้สถานการณ์ปีฝนมาก ปีฝนน้อย และปีฝนปกติ

3.6 การวิเคราะห์สถานการณ์น้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ต้า: วิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ต้า การวิเคราะห์นี้ช่วยสนับสนุนการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

3.7 การสรุปโครงการวิจัยและเผยแพร่งานวิจัย: สรุปผลการวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งจัดทำรายงานและเผยแพร่งานวิจัยเพื่อประโยชน์ทางวิชาการและการจัดการน้ำในอนาคต แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองสถานการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาหรือพัฒนาแบบจำลองในลุ่มน้ำอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

4. ผลการศึกษา

4.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพ ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอิง

จากการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพ ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน โดยทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2566 (21 ปี) จากกรมอุตุนิยมวิทยา ได้ผลดังนี้ ฝนเฉลี่ยรายปีที่มีปริมาณอยู่ระหว่าง โดยสถานี 1.17 เป็นพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน ซึ่งมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีโดยประมาณ 235.11 ล้าน ลบ.ม ปริมาณน้ำเฉลี่ยสูงสุด 513.60 ล้าน ลบ.ม และปริมาณน้ำเฉลี่ยต่ำสุด 8.41 ล้าน ลบ.ม

4.2 แบบจำลองน้ำฝนและน้ำท่าโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS และผลการสอบเทียบ และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Verification)

ได้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) ที่สามารถเป็นตัวแทนลุ่มน้ำอิงได้ โดยข้อมูลในการสอบเทียบแบบจำลอง ใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2558 และใช้ข้อมูลในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง แบบจำลอง ใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 กันยายน 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2565 ผลจากแบบจำลองปริมาณน้ำท่าก่อนที่มีการสอบเทียบแบบจำลองเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ จะมีผลสอดคล้องกับการค่าที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละช่วงเดือน เมื่อพิจารณาผลทางสถิติพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง

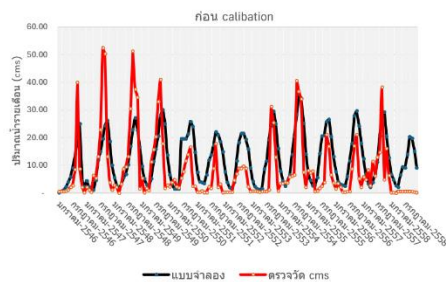


(Nash-Sutcliffe Efficiency: E) เท่ากับ 0.414 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination : R^2) เท่ากับ 0.17 และค่า Percent Bias (PBIAS) อยู่ที่ 52.90% ซึ่งยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงต้องมีการสอบเทียบแบบจำลอง ดังภาพที่ 8 แสดงผลจากแบบจำลองแบบปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนก่อนสอบเทียบแบบจำลองที่สถานี I.17 ดังภาพที่ 10

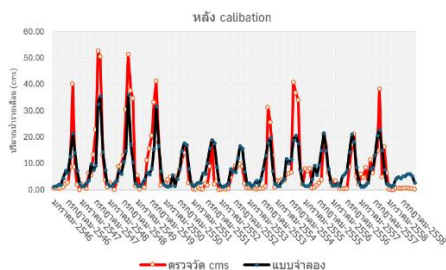
จากการสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) แบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2558 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Nash-Sutcliffe Efficiency: E) เท่ากับ 0.689 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination: R^2) เท่ากับ 0.648 และค่า Percent Bias (PBIAS) อยู่ที่ 2.75% ดังภาพที่ 11

จากการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) แบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 กันยายน 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2565 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Nash-Sutcliffe Efficiency: E) เท่ากับ 0.661 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination: R^2) เท่ากับ 0.634 และค่า Percent Bias (PBIAS) อยู่ที่ 0.17% ดังภาพที่ 12

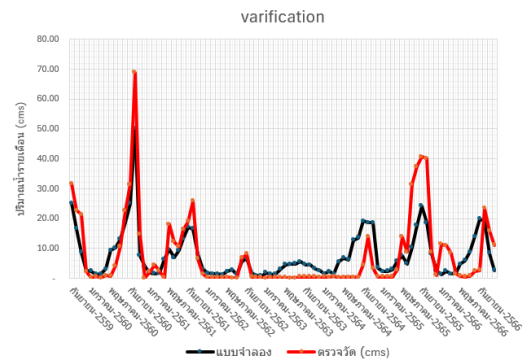
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า E , R^2 และ PBIAS ของก่อน-หลังการสอบเทียบแบบจำลอง และการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานี i.17 เมื่อพิจารณาความถูกต้องทางสถิติพบว่าค่า E , R^2 และ PBIAS หลังจากการสอบเทียบแบบจำลองของสถานี I.17 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังภาพที่ 10,11 และ 12 แสดงน้ำกราฟปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนของการสอบเทียบและการตรวจพิสูจน์ที่สถานี I.17



ภาพที่ 10 ผลการจำลองแบบปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน ก่อนการสอบเทียบแบบจำลองของสถานี I.17



ภาพที่ 11 ผลการสอบเทียบแบบจำลองปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนที่สถานี I.17



ภาพที่ 12 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนที่สถานี i.17

แบบจำลอง	สถานี I.17		
	E	R^2	PBIAS
ก่อนการสอบเทียบ	0.414	0.17	52.9
หลังการสอบเทียบ	0.689	0.648	2.75
ตรวจพิสูจน์	0.661	0.634	0.17

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า E , R^2 และ PBIAS ของก่อน-หลังการสอบเทียบแบบจำลอง และตรวจพิสูจน์แบบจำลองของสถานี i.17

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณฝนใน 3 กรณีการศึกษา (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย)

จากการวิเคราะห์ฝนมี 3 สถานี คือ 1.) สถานี 480310 (ต.บ้านต่อม อ.เมือง จ.พะเยา) 2.) สถานี 73013 (ประมงน้ำจืดพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา) 3.) สถานี 73002 (อ.พาน จ.เชียงราย) และได้วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนของแต่ละสถานี

สถานี 480310

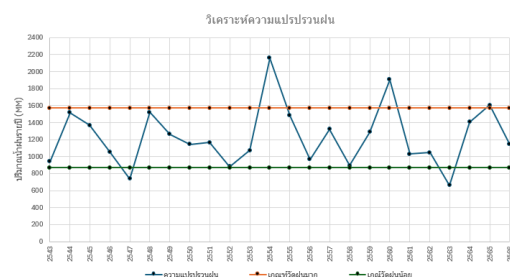
มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554,2560,2565 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2547,2563 ดังภาพที่ 13

สถานี 73052

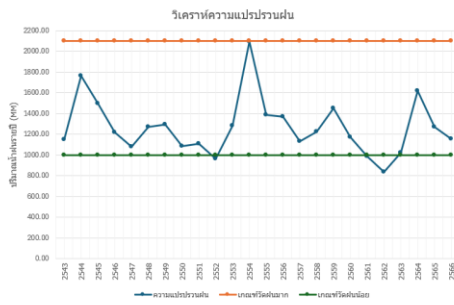
มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2552,2562 ดังภาพที่ 14

สถานี 73002

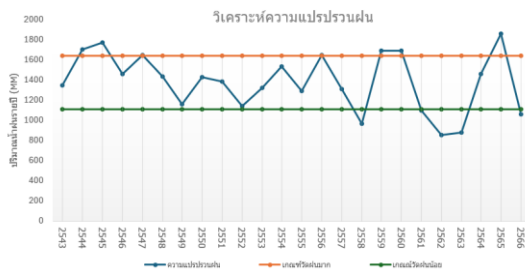
มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ.2544,2545,2547,2556,2559,2560,2565 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2552,2562 ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 13 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 480310



ภาพที่ 14 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 73052

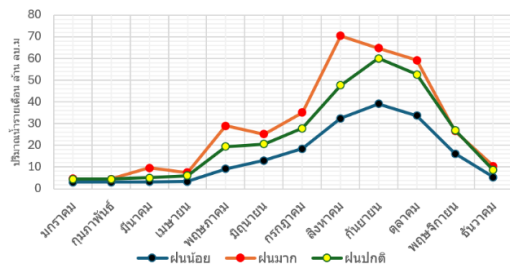


ภาพที่ 15 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 73002

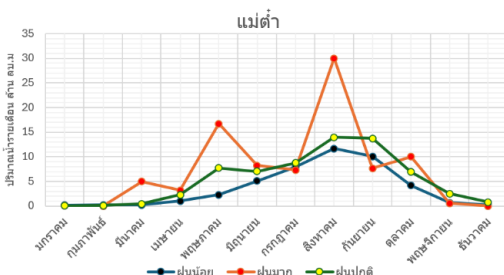
4.4 การประเมินปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างแม่ต้าด้วยแบบจำลองลุ่มน้ำอิง

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองลุ่มน้ำอิงเพื่อประเมินน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต้า พบว่าปริมาณ ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้ารายเดือนมีทั้ง 3 กรณีศึกษาปีฝนปกติ ฝนมาก ฝนน้อย เป็นดังตารางที่ ซึ่งสังเกตได้ว่าปีที่มีฝนปกติและฝนมาก ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าจะมีปริมาณมาก โดยวัดจุดวัดน้ำ I.17 มีปริมาณน้ำไหลลงอ่างแม่ต้าอยู่ที่ 347.13 ล้าน ลบ.ม และ 284.00 ล้าน ลบ.ม สำหรับกรณีปีฝนมาก และปีฝนปกติตามลำดับ และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าในปีฝนมาก และปีฝนปกติอยู่ที่ประมาณ 88.91 ล้าน ลบ.ม และ 64.51 ล้าน ลบ.ม ต่อปีตามลำดับส่วนปีฝนน้อย ปริมาณน้ำสถานีวัดน้ำ I.17 มีประมาณ 180.29 ล้าน ลบ.ม และปริมาณน้ำไหลลงอ่างแม่ต้าอยู่ที่ประมาณ 44.01 ล้าน ลบ.ม ดังรูปที่ 16 และ 17

i.17



ภาพที่ 16 ผลการวัดแบบจำลองปริมาณน้ำไหลที่สถานี I.17 ใน 3 กรณีการศึกษา



ภาพที่ 17 ผลการวัดปริมาณน้ำแบบจำลองที่ไหลลงอ่างแม่ต้า ใน 3 กรณีการศึกษา

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ Hec-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) การศึกษาครั้งนี้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา อุทวิทยา และข้อมูลทางกายภาพของลุ่มน้ำอิงตอนบนเพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนลุ่มน้ำอิงตอนบนและอ่างแม่ต้า โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 1) จัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ 2) สร้างแบบจำลองลุ่มน้ำ 3) สอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) และ 4) ตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) ทำการปรับพารามิเตอร์ให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลจริงทำให้ผลการสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) ได้ค่าก่อนการสอบเทียบ มีค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) มีค่าเท่ากับ 0.414 ค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.17 และค่า Percent Bias (PBIAS) มีค่าเท่ากับ 52.90% โดยที่ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงต้องมีการสอบเทียบแบบจำลอง และได้ค่าหลังการสอบเทียบ Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) มีค่าเท่ากับ 0.689 ค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.648 และค่า Percent Bias (PBIAS) มีค่าเท่ากับ 2.75% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2546 ถึง วันที่ 31 มีนาคม 2558 และในการตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลองใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1 มกราคม 2559 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม 2566 จากการตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) ได้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) มีค่าเท่ากับ 0.661 ค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.634 และค่า Percent Bias (PBIAS) มีค่าเท่ากับ 0.17% และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต้า ภายใต้กรณีศึกษา ปีฝนมากปีฝนปกติและปีฝนน้อย มีปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต้าอยู่ที่ประมาณ 88.91 ล้าน ลบ.ม./ปี และ 64.51 ล้าน ลบ.ม./ปี 44.01 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง HEC-HMS ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และคาดการณ์ปริมาณน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ การวางแผนรับมือกับภัยแล้งหรือน้ำท่วม และการจัดสรรน้ำสำหรับภาคการเกษตรและการอุปโภคบริโภคในพื้นที่ นอกจากนี้กระบวนการพัฒนาแบบจำลองและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้เป็นต้นแบบเพื่อศึกษาหรือพัฒนาแบบจำลองในลุ่มน้ำอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ในอนาคต



กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และคำแนะนำจากหลาย ฝ่าย คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ ดร. ขวัญสิรินภา ธนวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และเป็นกำลังสำคัญในการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของรายงานฉบับนี้มาโดยตลอด ตลอดจนถึงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้สนับสนุนงบประมาณและทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมอุทกวิทยาและการจัดการแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของโครงการฉบับนี้ และกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมชลประทาน ที่ได้ให้ข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่ารายวัน ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS และกองสำรวจและจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน ที่ได้สนับสนุนข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). รายงานสถานการณ์ภูมิอากาศประเทศไทยประจำปี 2565. สืบค้นจาก: กรมอุตุนิยมวิทยา
- [2] U.S. Army Corps of Engineers. (2020). HEC-HMS Hydrologic Modelling System User's Manual Version 4.8. สืบค้นจาก: HEC HMS
- [3] Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill.
- [4] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [5] Singh, V. P. (1995). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- [6] McCuen, R. H. (2005). Hydrologic analysis and design. Prentice Hall.
- [7] Holton, J. R. (2004). An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press.
- [8] USDA, Soil Conservation Service. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (TR-55).
- [9] Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Engineering News-Record, 108(15), 501-505.
- [10] Saltelli, A., Chan, K. P. S., & Scott, E. M. (2000). Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons.
- [11] Trenberth, K. E. (2011). The global water cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 39, 169-200.
- [12] Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). Water Resource Systems Planning and Management. Springer.
- [13] สิริเมธ หิรัญพัฒนานนท์ วรพงษ์ โล่ห์ไพศาลฤกษ์ (15 กรกฎาคม 2563), การสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าสำหรับน้ำท่วมฉับพลันในพื้นที่เมืองบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ที่มา : <https://conference.thaince.org/index.php/ncce25/article/download/440/77/4553>
- [14] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.ศาลายา จ.นครปฐม (พ.ศ.2556) การศึกษาการสูญเสียจากการระเหยของอ่างเก็บน้ำขนาดกลางและขนาดเล็กในประเทศไทย ที่มา : <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/R%26DT/10896745.pdf>
- [15] ณัฐพล แก้วทอง , ศศิมาภรณ์ แก้วจุลพันธ์ , วรณิศา สุขโสภ , วชิรเดช สงสุรินทร์ (เมษายน พ.ศ.2568) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศด้วยแบบจำลองภูมิอากาศBCC-ESM_RCP4.5 บริเวณเทศบาลเมืองสุโขทัย-โลก จังหวัดนครราชสีมา ที่มา : <https://www.repository.rmutsv.ac.th/bitstream/handle/123456789/3718/FullText.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [16] ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง (เมษายน พ.ศ.2568) ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทย จากการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าลุ่มน้ำลำพระเพลิง ที่มา : <https://water.rid.go.th/hydhome/hydmag/journal/April-12-142-68.pdf>
- [17] สำนักงานบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน จ.เชียงใหม่ (มกราคม พ.ศ.2561) การประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลองอุทกวิทยา HEC-HMS สถานี P.1 แม่น้ำปิง สะพานนวรัฐ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ที่มา : https://water.rid.go.th/hydrology/downloads/HEC_LAS.pdf



การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ตำโดยแบบจำลอง SWAT

Study of Rainfall Variation Impact on Streamflow in the Upper Ing River Basin and Inflow to Mae Tam Reservoir Using the SWAT Model

นายศุภกร แสนแก้วทอง^{1*} นายชยณานนท์ มหามิตร² และนายอัฐวุฒิ สีต้อย³

^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

^{*}Corresponding author; E-mail address: 65102598@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน ซึ่งเป็นลุ่มน้ำสำคัญของจังหวัดพะเยา มีบทบาทในการสนับสนุนการเกษตร การประปา การผลิตพลังงาน และการป้องกันอุทกภัย รวมทั้งประเมินปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำแม่ตำ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางอุทกวิทยาที่สามารถจำลองกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากน้ำฝนสู่น้ำท่าได้อย่างละเอียด แบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน ข้อมูลการใช้ที่ดิน ข้อมูลคุณสมบัติของดิน ข้อมูลความสูงภูมิประเทศ (DEM) และข้อมูลปริมาณน้ำท่าจากสถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) เพื่อนำไปทำการสอบเทียบ (Calibration) และ ตรวจสอบพิสูจน์ความถูกต้อง (Verification) ผลการสอบเทียบในช่วงปี พ.ศ. 2546–2558 พบว่าแบบจำลองให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.608, E เท่ากับ 0.593 และ PBIAS เท่ากับ 0.7% แสดงถึงความสอดคล้องที่ดีระหว่างค่าจำลองและค่าจริง ส่วนผลการตรวจสอบพิสูจน์ในช่วงปี พ.ศ. 2559–2566 พบว่าได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.540, E เท่ากับ 0.533 และ PBIAS เท่ากับ -7.05% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้และสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง การจำลองกรณีศึกษาปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ พบความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าและน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ตำอย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนจัดการน้ำ การบริหารจัดการน้ำท่า และการออกแบบมาตรการลดความเสี่ยงอุทกภัยและภัยแล้ง สรุปได้ว่า แบบจำลอง SWAT มีความเหมาะสมต่อการประเมินสถานการณ์น้ำท่า และสามารถประยุกต์ใช้สนับสนุนการจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบนอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

Abstract

This study aims to analyze the relationship between rainfall and streamflow in the Upper Ing River Basin, a crucial watershed in Phayao Province that supports agriculture, water supply, hydropower, and flood management, and to evaluate the inflow to Mae Tam Reservoir. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, a widely recognized hydrological tool capable of simulating the transformation of rainfall into streamflow in detail, was used. The model was developed using daily climate data, land use, soil properties, digital elevation model (DEM), and streamflow data from station I.17 (Ban Chedi Ngam, Tha Wang Thong Subdistrict, Mueang District, Phayao Province) for calibration and verification. Calibration for 2003–2015 yielded $R^2 = 0.608$, $E = 0.593$, and $PBIAS = 0.7\%$, indicating strong agreement between simulated and observed values. Verification for 2016–2023 showed $R^2 = 0.540$, $E = 0.533$, and $PBIAS = -7.05\%$, confirming model reliability within acceptable standards. Scenario simulations for wet, dry, and normal rainfall years revealed significant variations in streamflow and reservoir inflow. These results provide valuable information for water management planning, streamflow forecasting, and the design of flood and drought mitigation measures. In conclusion, the SWAT model is suitable for hydrological assessment and can effectively support sustainable water resources management in the Upper Ing River Basin.

คำสำคัญ: ปริมาณน้ำฝน, ปริมาณน้ำท่า, ลุ่มน้ำอิงตอนบน, SWAT, อ่างเก็บน้ำแม่ตำ, การสอบเทียบและตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง

Keywords: Rainfall, Streamflow, Upper Ing River Basin, SWAT model, Mae Tam Reservoir, Calibration and Verification



1. บทนำ

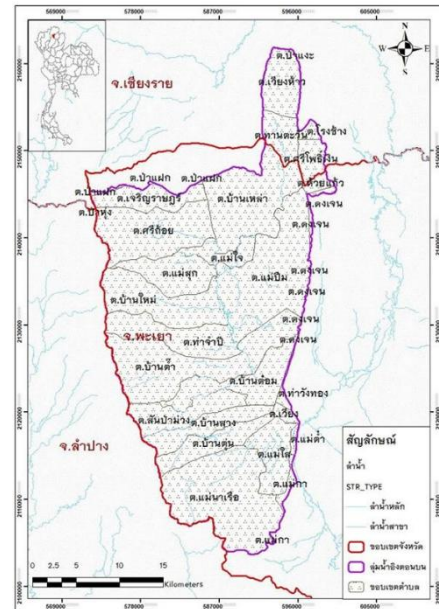
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเผชิญกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นทั้งในเชิงปริมาณและรูปแบบ เช่น การเกิดฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้น การทิ้งช่วงของฝน และความไม่สม่ำเสมอของฤดูกาลฝน ซึ่งปรากฏชัดเจนในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในลุ่มน้ำอิงตอนบนซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดเชียงรายและพะเยา พื้นที่นี้มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ลาดเชิงเขาและพื้นที่ราบสลับกัน มีการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อเกษตรกรรมเป็นหลัก และต้องพึ่งพาปริมาณน้ำฝนและน้ำจากอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กในการหล่อเลี้ยงกิจกรรมทางเศรษฐกิจและการดำรงชีวิต

อ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำเป็นโครงการเนื่องจากพระราชดำริ วัตถุประสงค์ของโครงการ คือ เพื่อให้เป็นแหล่งน้ำบรรเทาความเดือดร้อนในการขาดแคลนน้ำสำหรับทำการเกษตร และอุปโภค-บริโภคของราษฎรได้อย่างเพียงพอตลอดปี และมีประสิทธิภาพ โดยมีเป้าหมายสำหรับพื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกรทั้งสิ้น 7 หมู่บ้านได้อย่างทั่วถึง (จากการออกแบบและการคำนวณปริมาณน้ำ สามารถส่งน้ำได้ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2,600 ไร่ และในฤดูแล้งประมาณ 600 ไร่)

ที่ผ่านมามีการนำแบบจำลองทางอุทกวิทยาหลายชนิดมาใช้ในการวิเคราะห์ และบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ เช่น HEC-HMS, WEAP และ SWAT ซึ่งแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถวิเคราะห์กระบวนการไหลของน้ำตั้งแต่ต้นน้ำฝนไปจนถึงน้ำท่าได้อย่างละเอียด และสามารถนำไปประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสภาพภูมิอากาศได้ในระดับลุ่มน้ำขนาดกลางถึงใหญ่ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT กับพื้นที่เฉพาะอย่างลุ่มน้ำอิงตอนบนยังมีจำกัด และยังขาดการเชื่อมโยงข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำท่า เช่น สถานี I.17 ต.แม่ต๋ำ อ.เมือง จ.พะเยา และปริมาณน้ำอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ เข้ากับการวิเคราะห์และคาดการณ์แนวโน้มของน้ำท่าในพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ พื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนได้รับผลกระทบจากปริมาณฝน และน้ำท่าที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต ซึ่งในปัจจุบันมีค่าความรุนแรง และความถี่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากผลการวิจัย (สุจารี และ คณะ 2553, Chinvarno, S. and Srivibongs, A. 2007, Plangeon, P. et al. 2013, Shrestha et al. 2013) ที่ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณฝน ทำให้ปริมาณฝนและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าลดลงในอนาคต การเพิ่มความถี่ของภัยแล้ง และน้ำท่วม (Chang et al. 2010, Pruski and Nearing, 2002) และส่งผลกระทบต่อปริมาณฝน ปริมาณน้ำท่าหรือลำห้วย ทำให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต และจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศที่ส่งผลถึงปริมาณฝนที่เปลี่ยน ยังทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ลำน้ำก็มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปจากอดีตด้วย

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต๋ำ โดยใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อวิเคราะห์และประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่า โดยอาศัยข้อมูลปัจจัยทางภูมิอากาศรายวัน ข้อมูลดิน ลักษณะภูมิประเทศ และการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ เพื่อนำผลลัพธ์มาใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนบริหารจัดการน้ำสำหรับเกษตรกรและการอุปโภคบริโภคอย่างยั่งยืนในอนาคต



ภาพที่ 1 แสดงพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงตอนบนด้วยแบบจำลอง SWAT (Calibrate และ Verification ที่สถานี I.17)

1.2.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำฝน (กรณีศึกษา: ปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ)

1.2.3 ประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.17 และ ปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ (กรณีศึกษา: ปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ) จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองลุ่มน้ำอิงตอนบน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบน โดยใช้ แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความสามารถในการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในระดับลุ่มน้ำ โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย

- ข้อมูลน้ำฝน 3 สถานี คือ สถานีพะเยา สถานีพะเยากรมชล สถานีพานจากหน่วยงานกรมชลประทาน และน้ำท่ารายเดือนใช้ในแบบจำลอง SWAT จากสถานี I.17 เพื่อใช้ในการสอบเทียบ (Calibration) และตรวจสอบพิสูจน์ (Verification)



- ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนได้มาจากกองสำรวจและจำแนกดินกรมพัฒนาที่ดิน

- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ ได้จากแบบจำลองภูมิประเทศ (DEM) ซึ่งใช้วิเคราะห์ความลาดชัน เส้นทางไหลของน้ำ และขอบเขตลุ่มน้ำอิงตอนบน โดยข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลอง SWAT เพื่อจำลองกระบวนการไหลของน้ำในพื้นที่

1.3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration)

ข้อมูลที่ใช้ในการสอบเทียบใช้ข้อมูลอัตราการไหลที่สถานี I.17 โดยใช้ข้อมูลในช่วงในช่วงปี 1 มกราคม 2546 ถึง 31 ธันวาคม 2558 โดยการสอบเทียบแบบจำลองจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง เพื่อได้ผลการจำลอง ได้แก่ ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง ให้ใกล้เคียงข้อมูลจริงที่วัดได้มากที่สุดในช่วงเวลาพิจารณา

1.3.3 การตรวจพิสูจน์ (Verification)

ใช้ข้อมูลจากสถานี I.17 ในช่วง 1 มกราคม 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2566 เพื่อตรวจพิสูจน์แบบจำลองลุ่มน้ำอิง ที่ได้สอบเทียบในช่วงปี 2546-2566 โดยการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ (Verification) ความแม่นยำของแบบจำลอง SWAT จะดำเนินการโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบ (Calibration) จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจริง ด้วยตัวชี้วัดทางสถิติ มีดังต่อไปนี้ E (Nash-Sutcliffe Efficiency), R^2 (Coefficient of Determination) และ PBIAS (Percent Bias) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความแม่นยำของแบบจำลองในเชิงปริมาณ

1.3.4 แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ถูกใช้เพื่อสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงตอนบนและ วิเคราะห์กระบวนการทางอุทกวิทยา โดยสามารถจำลองกระบวนการจากน้ำฝนไปสู่น้ำท่าอย่างละเอียดในระดับพื้นที่ย่อย และจำลองการไหลของน้ำ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างแม่คำได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลการสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำอิงตอนบนด้วยแบบจำลอง SWAT พบว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าปริมาณน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง โดยมีค่าดัชนีชี้วัดทางสถิติ (E, R^2 และ PBIAS) อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจสะท้อนถึงความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลอง

1.4.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนโดยมีการจำแนกปีฝนออกเป็น กรณีปีฝนมาก กรณีปีฝนน้อย และกรณีปีฝนปกติ ทำให้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณน้ำฝนที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่าได้

1.4.3 ปริมาณน้ำที่ I.17 และ ปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่คำ (ปีฝนมาก ฝนน้อย และฝนปกติ) ข้อมูลดังกล่าวช่วยให้สามารถคาดการณ์และเตรียมแผนรับมือทั้งในกรณีที่น้ำมีมากเกินไป หรือในกรณีที่น้ำขาดแคลน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนใช้น้ำเพื่อการเกษตรและอุปโภคบริโภคในลุ่มน้ำอิงตอนบน

2. ทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีการไหลของน้ำ (Hydrology)

เป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาวัฏจักรน้ำ เช่น การตกของฝน การไหลบนผิวดิน การซึมผ่าน และการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำท่า แบบจำลอง SWAT ใช้หลักการการไหลของน้ำเพื่อจำลองการเกิดน้ำท่าในแต่ละส่วนย่อยของลุ่มน้ำ (Sub-basin)

2.1.2 ทฤษฎีแปรเปลี่ยนน้ำฝนสู่ น้ำท่า (Rainfall Runoff Transformation)

อธิบายกระบวนการที่น้ำฝนเปลี่ยนรูปเป็นน้ำท่า ผ่านการสูญเสียจากการระเหย การซึมผ่าน และการเก็บกักน้ำในดิน ซึ่ง SWAT จำลองได้โดยใช้พารามิเตอร์ เช่น CN (Curve Number), infiltration rate และ soil water capacity

2.1.3 ทฤษฎี SCS Curve Number Method (CN Method)

ใช้คำนวณน้ำท่าจากฝนตกตามประเภทการใช้ที่ดิน และกลุ่มดิน (Hydrologic Soil Group) โดยมีค่า CN เป็นตัวแทนความสามารถในการซึมซับของพื้นดิน ยิ่งค่า CN สูง ยิ่งเกิดน้ำท่ามาก SWAT ใช้วิธีนี้เป็นแกนหลักในกระบวนการจำลอง

2.1.4 ทฤษฎีการระเหย และการซึมผ่าน (Evapotranspiration and Infiltration)

SWAT คำนวณการระเหยและการซึมผ่านจากดินโดยใช้สูตร เช่น สมการ Penman-Monteith เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมาณค่า การระเหยคายน้ำ (Evapotranspiration หรือ ET) ซึ่งเป็นการรวมกันของการระเหยจากพื้นผิวโลกและการคายน้ำจากพืช สมการนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ การเกษตร และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สูตรที่ใช้กันแพร่หลายสำหรับ ET_0 คือ:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

ET_0 คือ การระเหยคายน้ำอ้างอิง , R_n = รังสีสุทธิที่พื้นผิวพืช

Δ คือ ความชันของเส้นโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว , γ = ค่าคงที่จิตวิทยา

G คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนในดิน , e_s = ความดันไอน้ำอิ่มตัว

T คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ความสูง 2 เมตร , e_a = ความดันไอน้ำจริง

u_2 คือ ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร , 0.408 = ค่าคงที่การแปลงหน่วย

0.34 คือ ค่าคงที่ในเทอมความต้านทานอากาศ

900 คือ ค่าคงที่ (ปรับหน่วย)

($e_s - e_a$) คือ ความบกพร่องของความดันไอน้ำอิ่มตัว

หรือ สมการ Hargreaves เป็นสมการเชิงประจักษ์ ที่ใช้สำหรับประมาณค่าการระเหยคายน้ำอ้างอิง (Reference Evapotranspiration หรือ ET_0) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่พืชอ้างอิง (เช่น หญ้า) คายน้ำออกมาจากพื้นผิวดินและพืช



สูตรที่ใช้กันแพร่หลายสำหรับการคำนวณ ET_0 คือ

$$ET_0 = 0.0023 \times R_a \times (T_{mean} + 17.8) \times \sqrt{T_{max} - T_{min}}$$

เมื่อ

- ET_0 คือ การระเหยคายน้ำอ้างอิง
- R_a คือ รังสีนอกชั้นบรรยากาศ ที่ได้รับบนพื้นผิวโลกในแนวนอน
- T_{mean} คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายวัน
- T_{max} คือ อุณหภูมิอากาศสูงสุดรายวัน
- T_{min} คือ อุณหภูมิอากาศต่ำสุดรายวัน

สมการ Penman-Monteith หรือ สมการ Hargreaves ใช้เพื่อประเมินการสูญเสียในระบบน้ำผืน-น้ำท่าอย่างแม่นยำ

2.1.5 ทฤษฎีการไหลของน้ำใต้ดิน (Baseflow)

Baseflow หรือ การไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ น้ำไหลในลำน้ำต่อเนื่องแม้ไม่มีฝนตก SWAT ใช้พารามิเตอร์เช่น GW_DELAY_ALPHA และ $GWQMN$ เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดินที่ส่งกลับคืนสู่ลำน้ำ

2.1.6 ทฤษฎีแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

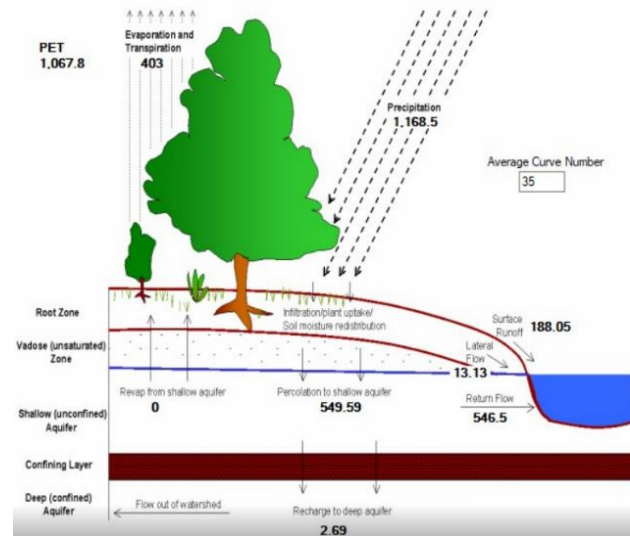
SWAT เป็นแบบจำลองกึ่งกระจายที่ใช้สำหรับจำลอง กระบวนการน้ำผืนน้ำท่าแบบรายวัน และรายเดือน โดยจำแนกพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นลุ่มน้ำย่อย (Sub-basin) และใช้ชื่อภาษาไทยของ (HRUs) ตามลักษณะดิน การใช้ที่ดิน และความลาดชัน ใช้พารามิเตอร์หลายตัวเพื่อจำลองการไหลบ่า การระเหย การซึมผ่าน และน้ำใต้ดิน เหมาะสำหรับการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงผืน การใช้ที่ดิน และการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระยะยาว

การประมาณค่าต่างๆ ทางอุทกวิทยาจะใช้หลักการทางดุลยภาพของน้ำแสดงดังภาพ โดยปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในดินจะเท่ากับ ปริมาณน้ำที่คืนได้รับ มาลบกับปริมาณน้ำที่ดินสูญเสียไป ปริมาณน้ำที่ดินได้รับมาประกอบด้วยปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำชลประทานส่วนปริมาณน้ำที่สูญเสียไปประกอบด้วยปริมาณน้ำไหลบ่า ปริมาณการคายระเหยของน้ำ ปริมาณการซึมลงไปได้ดินของน้ำ และปริมาณการไหลลงแม่น้ำ ดังสมการ

$$SW_t = SW_0 + \sum_i [1t(R_i - Q_i - ET_i - W_{seep_i} - QR_i)]$$

เมื่อ

- SW_t คือ ปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ในดินสุดท้าย (มม.)
- SW_0 คือ ปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ในดินในวันที่ i (มม.)
- t คือ เวลา (วัน)
- R_i คือ ปริมาณน้ำฝนในวันที่ i (มม.)
- Q_i คือ ปริมาณน้ำผิวดินในวันที่ i (มม.)
- ET_i คือ ปริมาณการคายระเหยในวันที่ i (มม.)
- W_{seep_i} คือ ปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ใต้ดินในวันที่ i (มม.)
- QR_i คือ ปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลกลับสู่ลำน้ำในวันที่ i (มม.)



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการวางจอรูทวิทยาในแบบจำลอง SWAT ของปีฝนปกติ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 SWAT Watershed Model Calibration using Deep Learning

ผู้แต่ง: M.K.Mudunuru, K.Son, P.Jiang, G.Hammond, และ X. Chen
สถานที่ตีพิมพ์: วารสาร Frontiers in Earth Science ปีที่ตีพิมพ์: 2022

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการปรับเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) จำนวน 21 ตัวแปร ให้มีความแม่นยำสูงขึ้น เพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการพยากรณ์ปริมาณ น้ำหลาก และการระเหยคายน้ำ ในพื้นที่ลุ่ม วิธีการใหม่นี้ให้ผลลัพธ์ที่ แม่นยำกว่าวิธี GLUE ดั้งเดิม และยังให้ค่าพารามิเตอร์ที่มี ช่วงแคบลง พร้อมกับมีความ ทนทานต่อ "noise" (สิ่งรบกวนในข้อมูล) ได้ดีกว่า

2.2.2 A SWAT-based Reinforcement Learning Framework for Crop Management

ผู้แต่ง: Malvern Madondo และคณะ
สถานที่ตีพิมพ์: Workshop paper ในการประชุม AAAI 2023
ปีที่ตีพิมพ์: 2023

งานวิจัยนี้เป็นการบุกเบิกการใช้ ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ประเภท Reinforcement Learning มาเชื่อมโยงกับ แบบจำลองทางสิ่งแวดล้อมอย่าง SWAT เพื่อให้สามารถพัฒนาและทดสอบกลยุทธ์การจัดการพืชผลที่ชาญฉลาดและยั่งยืนยิ่งขึ้น

2.2.3 SWAT model (Wikipedia overview)

ผู้แต่ง: Gassman, P. W.; Reyes, M. R.; Green, C. H.; Arnold, J. G. สถานที่ตีพิมพ์: Transactions of the ASABE ปีที่ตีพิมพ์: 2007

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาและการขนส่งสารมลพิษระดับลุ่มน้ำ (watershed hydrological transport model) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก และยังคงได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินผลกระทบของกิจกรรมการจัดการที่ดิน (land management practices) ที่มีต่อทรัพยากรน้ำ ตะกอนต่างๆ และสารเคมีทางการเกษตรในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ที่มีสภาพดิน การใช้ที่ดิน และเงื่อนไขการจัดการที่หลากหลายตลอดระยะเวลานาน



2.2.4. SWOT analysis applications: An integrative literature review
ผู้แต่ง: Mostafa Ali Benzaghta, Abdulaziz Elwalda, Mousa Mohamed Mousa, Ismail Erkan, Mushfiquir Rahman

สถานที่ตีพิมพ์: Journal of Global Business Insights ปีที่พิมพ์: 2021
งานวิจัยนี้ใช้วิธีการ ทบทวนวรรณกรรมแบบบูรณาการ (integrative review method) เพื่อเข้าถึง วิเคราะห์ และสังเคราะห์ วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ SWOT โดยมีเป้าหมายเพื่อนำเสนอภาพรวมของ ฐานความรู้ SWOT และรวบรวมข้อมูลเชิงลึกจากสาขาต่างๆ ให้มุมมองทาง ประวัติศาสตร์แบบบูรณาการของการวิเคราะห์ SWOT ซึ่งอาจนำไปสู่การ พัฒนาแนวคิดและกรอบทฤษฎีใหม่ๆ และเป็นการทบทวนวรรณกรรม SWOT ในหลากหลายสาขาเป็นครั้งแรก ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างทางความรู้ ในบริบทของการวางแผนกลยุทธ์.

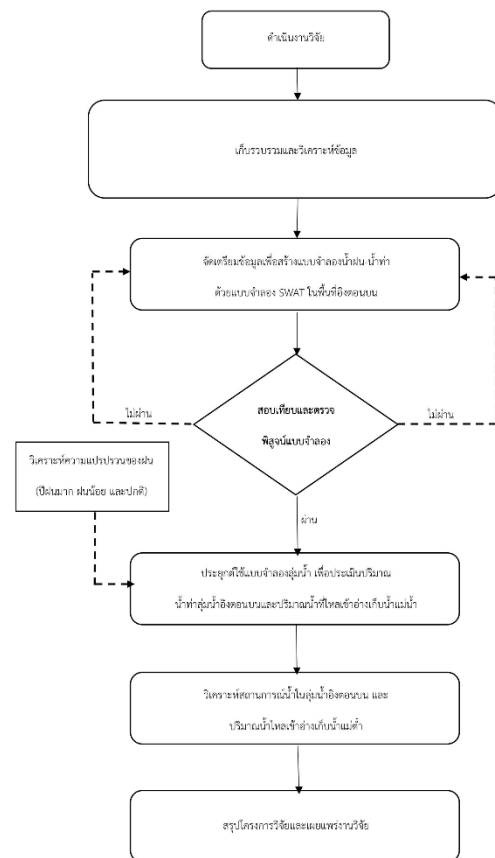
2.2.5. SWAT-IRR: A new irrigation algorithm for SWAT
ผู้แต่ง: Zhiqiang Xiang, Daniel N. Moriasi; M. Samimi, Ali Mirchi, S. Taghvaeian, Jeffrey L. Steiner; J. A. Verser, P. J. Starks สถานที่ตีพิมพ์: Computers and Electronics in Agriculture ปีที่พิมพ์: 2025

งานวิจัยนี้นำเสนอ SWAT-IRR ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการให้น้ำ (irrigation algorithm) ตัวใหม่สำหรับแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) โดยมีจุดประสงค์เพื่อ เพิ่มประสิทธิภาพการ จำลองผลกระทบของระบบและตารางการให้น้ำที่แตกต่างกัน ต่อการไหล ของน้ำ (hydrologic fluxes) ในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการให้น้ำ สามารถ จับภาพประเด็นเชิงปฏิบัติของการจัดสรรน้ำ จากแหล่งต่างๆ และการใช้น้ำ ด้วยระบบการให้น้ำที่แตกต่างกันได้ดีขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

แบบจำลอง SWAT อาศัยข้อมูลเชิงกายภาพ โดยมีส่วนประกอบ หลักๆ ได้แก่ ข้อมูลด้านภูมิอากาศ ด้านอุทกวิทยา ด้านอุณหภูมิตามดิน และด้านการจัดการที่ดิน โดยการแบ่งขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นพื้นที่ลุ่ม น้ำย่อยด้วยกระบวนการ Automatic watershed delineation และในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยก็จะถูกแบ่งเป็นหน่วยจัดการอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units, HRUs) ซึ่งเป็นการซ้อนทับกันของชั้น ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน การจัดการที่ดิน และ คุณสมบัติดินที่มีลักษณะ คล้ายคลึงกัน

3.1 แผนผังการดำเนินงานเป็นดังแผนผัง และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



แผนผังการดำเนินงาน

3.1.1. ตั้งสมมติฐานงานวิจัยและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สมมติฐาน: ปริมาณน้ำฝนที่เปลี่ยนแปลงไปในพื้นที่ต้นน้ำของลำ น้ำอิงส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงลำน้ำอิง และมีผลต่อการ บริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่คำ

3.1.2. เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลสภาพอากาศ: ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ปริมาณ รวม และค่าความชื้นสัมพัทธ์

ข้อมูลกายภาพพื้นที่: ได้แก่ ลักษณะการใช้ที่ดิน ลักษณะดิน และข้อมูลค่าความสูงของพื้นที่

3.1.3. จัดเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ด้วยแบบจำลอง SWAT ในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

วัตถุประสงค์: เพื่อสร้างแบบจำลองที่แม่นยำในการจำลอง กระบวนการน้ำฝนสู่ลำน้ำ

ข้อมูลที่ใช้: ข้อมูลน้ำฝนและภูมิอากาศรายวัน ปริมาณน้ำท่า รายวันจากสถานี I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา) ในช่วง ปี พ.ศ. 2546-2566



3.1.4. สอบเทียบและตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง

สอบเทียบ (Calibration): ใช้ข้อมูลช่วงปี 2546–2558 เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ให้แบบจำลอง SWAT สามารถจำลองการไหลของน้ำได้ใกล้เคียงสถานการณ์จริง

ตรวจพิสูจน์ (Verification): ใช้ข้อมูลช่วงปี 2559–2566 เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายการไหลของน้ำ

โดยดูจากผลลัพธ์:

ค่า R^2 คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Determination, R^2) คือ ตัวแปรทางสถิติที่ใช้อธิบายความผันแปรของปัจจัยที่เกิดจากความสัมพันธ์กับอีกปัจจัยเชิงเส้นตรง R^2 จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่ามากกว่า 0.50 แสดงว่าปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในระดับที่มีความน่าเชื่อถือ ค่า R^2 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

เมื่อ

- i คือ ลำดับที่
- n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด
- O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด
- $\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด
- P_i คือ ค่าจากแบบจำลอง
- $\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด

ค่า E คือ Nash-Sutcliffe Efficiency ในปี ค.ศ. 1970 Nash and Sutcliffe ได้พัฒนาวิธีการหาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางอุทกวิทยา ผ่านตัวแปรที่เรียกว่า Nash-Sutcliffe Efficiency (E) โดยที่ E จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 Moraisi et al. (2007) ได้แนะนำว่าถ้าค่า E เท่ากับ 1 หมายความว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองตรงกับค่าที่ได้จากการวัดค่าในสนาม หรือ แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุด ปกติถ้าค่า E อยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 1 ถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ แต่ถ้าค่า E น้อยกว่า 0 จะถือว่าแบบจำลองไม่มีประสิทธิภาพ

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

เมื่อ

- E คือ Nash-Sutcliffe Efficiency
- O_i คือ ค่าที่ได้จากการวัด
- $\bar{O}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการวัดทั้งหมด
- P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

และ ค่า PBIAS คือ Percent Bias ค่าร้อยละความเอนเอียงของการประมาณร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าจริง (หรือค่าจากการตรวจวัด) กับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง ค่าที่ดีที่สุดคือ PBIAS = 0 ค่า PBIAS เข้าใกล้ 0 มากเท่าใด แปลว่าค่าที่ได้จาก แบบจำลองมีความถูกต้องมากเท่านั้น ถ้าค่า PBIAS เป็นบวกมาก แปลว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าตรวจวัดมาก แต่ถ้าค่า PBIAS เป็นลบมาก แปลว่า ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่ามากกว่าค่าตรวจวัดมาก โดยมีค่าเกณฑ์ความเอนเอียงที่ยอมรับได้ต่ำสุดคือไม่เกินร้อยละ 25 PBIAS สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right) \times 100$$

เมื่อ

- PBIAS คือ Percent Bias
- O_i คือ ค่าข้อมูลตรวจวัดจริง และ
- P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

หาก "ไม่ผ่าน" ให้ย้อนกลับไปขั้นตอน "จัดเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า..." หาก "ผ่าน" ให้ดำเนินการต่อ

3.1.5. วิเคราะห์ความแปรปรวนของฝนแบ่งเป็นกรณีศึกษา ปีฝนมาก ฝนน้อยและฝนปกติ

3.1.6. ประยุกต์ใช้แบบจำลองกลุ่มน้ำอิงตอนบนเพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าที่กลุ่มน้ำอิงตอนบน และปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ตำ

3.1.7. วิเคราะห์สถานการณ์น้ำในลุ่มน้ำอิงตอนบนและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ตำ

3.1.8. สรุปผลการศึกษาและเผยแพร่

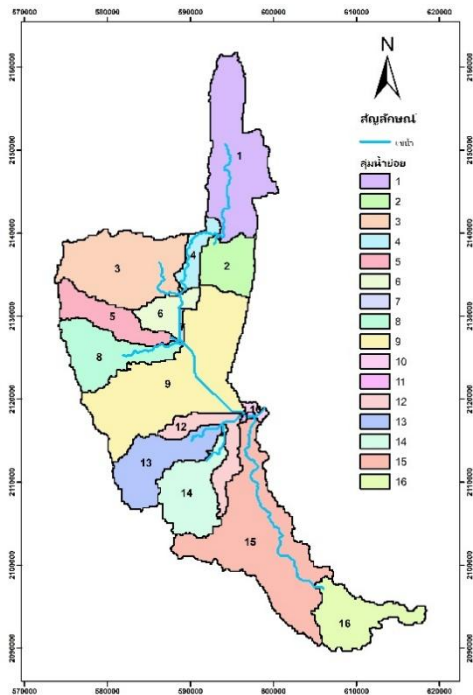
4. ผลการศึกษา

4.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านอุทกนิยมนวิทยา

อุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพ ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

4.1.1 การแบ่งขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยด้วยกระบวนการ Automatic watershed delineation

หลังจากเตรียมข้อมูลนำเข้าแบบจำลองตามรูปแบบที่เหมาะสมแล้วจึง เริ่มดำเนินการสร้างจำลองแบบ โดยขั้นแรกจะเริ่มจากการแบ่งขอบเขตลุ่ม น้ำและลุ่มน้ำย่อยด้วยกระบวนการ Automatic Watershed Delineation ได้ผลการแบ่งขอบเขตลุ่มน้ำและลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่ศึกษามี 16 ลุ่มน้ำย่อยดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งขอบเขตลุ่มน้ำที่ศึกษามีพื้นที่รวม 1006.65 ตารางกิโลเมตร และรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 ลุ่มน้ำย่อยลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่ศึกษาที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 3 แผนผังการดำเนินงานขอบเขตลุ่มน้ำ (Basin) และลุ่มน้ำย่อย (Sub-basin) ในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

ตารางที่ 1 ลุ่มน้ำย่อยลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่ศึกษาที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง

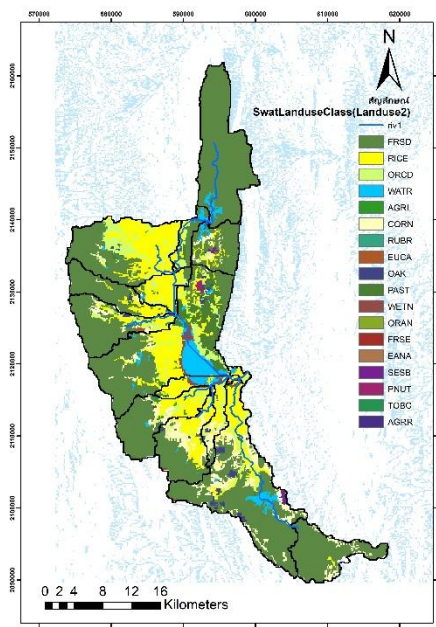
ลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ (ตร.กม)	ความชันเฉลี่ย (%)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล เฉลี่ย(เมตร)	ร้อยละของ พื้นที่
1	116.595	14.06	585.48	11.58248
2	40.3425	6.34	479.01	4.007599
3	110.655	6.05	512.40	10.9924
4	19.5075	4.15	429.27	1.937863
5	42.48	11.79	582.09	4.219937
6	25.7175	4.11	402.15	2.554761
7	1.575	0.50	393.59	0.15646
8	61.83	9.35	624.39	6.142155
9	189.63	7.32	479.26	18.83773
10	3.3525	1.59	393.59	0.333035
11	1.44	0.97	393.20	0.143049
12	36.1125	10.93	377.83	3.587394
13	63.45	4.00	580.11	6.303084
14	61.785	7.85	530.16	6.137684
15	173.6775	6.25	503.91	17.25302
16	58.5	10.72	624.06	5.811354
รวม	1006.65			100

4.1.2 การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic response units: HRUs)

เมื่อแบ่งขอบเขตลุ่มน้ำออกเป็นลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ แล้ว จากนั้นนำเข้าข้อมูลการใช้ที่ดิน และกลุ่มชุดดินซึ่งแยกตามประเภทของดินที่เตรียมไว้ โดยการนำมาซ้อนทับกับลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่ได้ เพื่อกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs Definition) โดยมีการกำหนดระดับ HRU Thresholds ในด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน กลุ่มชุดดิน และความชันของพื้นที่เป็น 5% 20% และ 30% ตามลำดับ สรุปข้อมูลได้ดังนี้

■ Land use class

แบบจำลอง SWAT สามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษาได้ 18 ประเภท โดยมีการใช้ประโยชน์ที่ดินมากที่สุดคือเป็นพื้นที่ป่าเบญจพรรณ (Forest-Deciduous) สัดส่วนร้อยละ 56.34 รองลงมาคือพื้นที่ข้าว (Rice) ร้อยละ 20.13 และพื้นที่สวนผลไม้ (Orchard) ร้อยละ 6.64 ตามลำดับ ดังรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 4 และรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนจากแบบจำลอง SWAT



ภาพที่ 4 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษาจากแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน



ตารางที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนจากแบบจำลอง

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย	ร้อยละของพื้นที่
1	FRSD	Forest-Deciduous	56.34
2	RICE	Rice	20.13
3	ORCD	Orchard	6.64
4	CORN	Corn	6.56
5	PAST	Pasture	3.91
6	WATR	Water	3.77
7	OAK	Oak	0.94
8	WETN	Wetlands-Non-Forested	0.71
9	AGRL	Agricultural Land-Generic	0.35
10	SESB	Sesbania	0.21
11	PNUT	Peanut	0.14
12	EUCA	Eucalyptus	0.09
13	TOBC	Tobacco	0.08
14	FRSE	Forest-Evergreen	0.07
15	RUBR	Rubber Trees	0.02
16	ORAN	Orange	0.01
17	BANA	Banana	0.01
18	AGR	Agricultural Land-Row Crops	0.01

Soil Class

แบบจำลอง SWAT สามารถจำแนกกลุ่มชุดดินในพื้นที่ศึกษาได้ 25 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกลุ่มชุดดินที่มีมากที่สุดคือกลุ่มชุดดิน 62 กลุ่ม ชุดดิน 29 และกลุ่มชุดดิน 55 ตามลำดับ โดยกลุ่มชุดดิน 62 เป็นดินบนพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อนหรือพื้นที่ภูเขาที่มีความลาดชันสูงมาก กลุ่มชุดดิน 29 เป็นกลุ่มดินเหนียวลึกจนถึงลึกมากที่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินเนื้อละเอียด ปฏิกิริยาของดินเป็นดินที่มีกรดมาก การระบายน้ำจะระบายน้ำได้ดีจนถึงปานกลางมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและกลุ่มชุดดิน 55 เป็นกลุ่มดินลึกปานกลางถึงชั้นหินพื้นเศษหิน ก้อนหินหรือลูกรัง ปฏิกิริยาดินเป็นกลางหรือเป็นด่าง การระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง ความอุดมสมบูรณ์ปานกลางดังภาพที่ 5 และ ตารางที่ 3

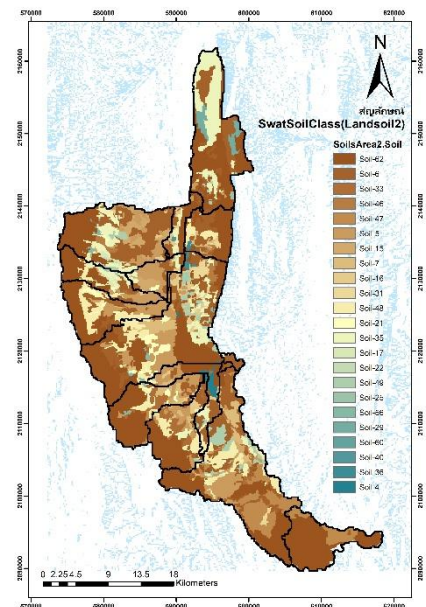
HRUs Definition จาก Soil class และ Land Use class ที่ได้จึงสามารถกำหนดหน่วยการตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ได้ทั้งสิ้น 112 หน่วย จาก 16 ลุ่ม น้ำย่อย (Subbasins)

4.1.3 การสร้างแบบจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำอิงตอนบน

การสร้างแบบจำลองน้ำท่าด้วย SWAT เริ่มจากการเตรียมข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ภูมิประเทศ (DEM) การใช้ที่ดิน ดิน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลน้ำท่า จากนั้นนำ DEM มาประมวลผลในระบบเพื่อกำหนดแนวลำน้ำ จุดควบคุม และแบ่งลุ่มน้ำย่อย เมื่อได้ขอบเขตพื้นที่แล้วจึงสร้างหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) จากการซ้อนทับข้อมูลการใช้ที่ดิน ดิน และความลาดชัน ขั้นตอนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองใช้ช่วงข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ย รายเดือนจากการตรวจวัดตั้งแต่พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2566 รูปที่ 4 กลุ่มชุดดินในพื้นที่ศึกษาจากแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

เมื่อได้โครงสร้างลุ่มน้ำและ HRUs แล้วจึงตั้งค่าแบบจำลอง โดยใส่ข้อมูลสภาพอากาศและการจัดการพื้นที่เพาะปลูก จากนั้นรันแบบจำลองเพื่อตรวจสอบสมมูลน้ำ และเข้าสู่กระบวนการสอบเทียบพารามิเตอร์ (Calibration) แล้วจึงตรวจสอบความถูกต้องด้วยชุดข้อมูลอีกช่วงหนึ่ง (Verification)

ผลลัพธ์ที่ได้คือกราฟการไหลน้ำท่า สมมูลน้ำ และการกระจายพื้นที่ที่เกิดน้ำท่าสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการวางแผนและจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 5 กลุ่มชุดดินในพื้นที่ศึกษาจากแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบน

ตารางที่ 3 กลุ่มชุดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำอิงตอนบนจากแบบจำลอง SWAT

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ความหมาย	ร้อยละของพื้นที่
1	soil-62	กลุ่มชุดดิน-62	28.52
2	soil-29	กลุ่มชุดดิน-29	22.38
3	soil-55	กลุ่มชุดดิน-55	7.10
4	soil-46	กลุ่มชุดดิน-46	5.93
5	soil-35	กลุ่มชุดดิน-35	4.74
6	soil-48	กลุ่มชุดดิน-48	4.65
7	soil-24	กลุ่มชุดดิน-24	4.31
8	soil-33	กลุ่มชุดดิน-33	3.88
9	soil-47	กลุ่มชุดดิน-47	3.69
10	soil-40	กลุ่มชุดดิน-40	2.80
11	soil-15	กลุ่มชุดดิน-15	2.62
12	soil-31	กลุ่มชุดดิน-31	2.12
13	soil-21	กลุ่มชุดดิน-21	1.68
14	soil-49	กลุ่มชุดดิน-49	1.62
15	WATER	น้ำ	1.56
16	soil-1	กลุ่มชุดดิน-1	1.34
17	soil-6	กลุ่มชุดดิน-6	0.23
18	soil-7	กลุ่มชุดดิน-7	0.18
19	soil-4	กลุ่มชุดดิน-4	0.14
20	soil-18	กลุ่มชุดดิน-18	0.13
21	soil-3	กลุ่มชุดดิน-3	0.10
22	soil-5	กลุ่มชุดดิน-5	0.10
23	soil-56	กลุ่มชุดดิน-56	0.10
24	soil-52	กลุ่มชุดดิน-52	0.04
25	soil-59	กลุ่มชุดดิน-59	0.04

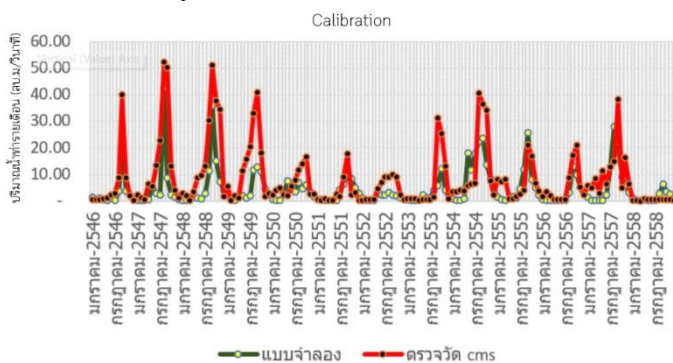


4.2 การสอบเทียบ ตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง และ วิเคราะห์ปริมาณฝนใน 3 กรณีการศึกษา (ฝนมาก ฝนปกติ ฝนน้อย)

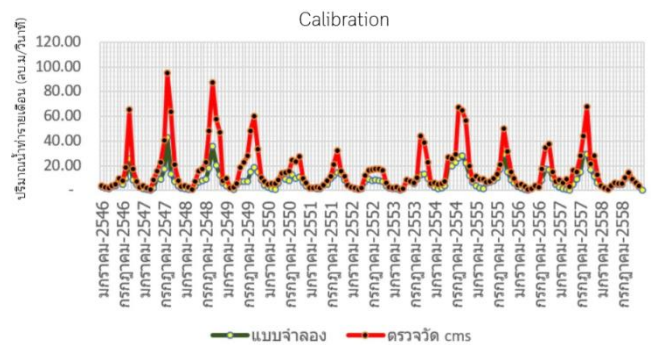
4.2.1 แบบจำลองน้ำฝนและน้ำท่าโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT และผลการสอบเทียบ และ ตรวจสอบพิสูจน์แบบจำลอง (Calibration and Verification)

จากการทดลองจำลองปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.17 โดยใช้ข้อมูล ช่วง 1 มกราคม พ.ศ.2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2566 (21 ปี) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเข้าข้อมูลสู่แบบจำลอง SWAT และแบบจำลองสามารถสั่งให้คำนวณอัตราการไหลที่สถานี I.17 ได้ และจากการคำนวณค่าดัชนีเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่จำลองจากแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด พบว่า R^2 เท่ากับ 0.578 ,E เท่ากับ 0.448 และ PBIAS เท่ากับ 45.630 % ซึ่งค่าในบางกรณียังไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับได้ และได้เข้าสู่การตรวจพิสูจน์ พบว่า R^2 เท่ากับ 0.608 ,E เท่ากับ 0.593 และ PBIAS เท่ากับ 0.7 % ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับได้ การเทียบแบบจำลอง ภาพที่ 6 เป็นการแสดงผลจากแบบจำลองแบบปริมาณมีน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนก่อนการสอบเทียบ แบบจำลองที่สถานี i.17

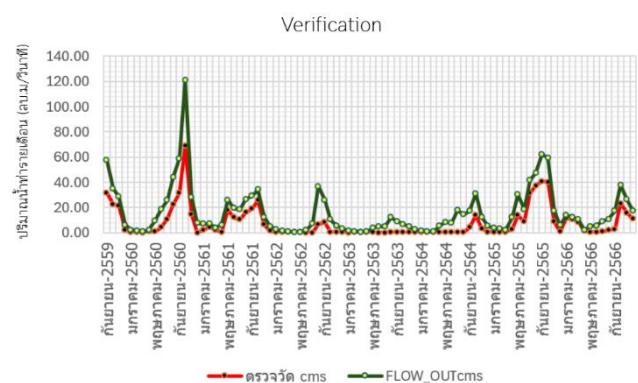
ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า R^2 , E และ PBIAS ของก่อน-หลังการสอบเทียบแบบจำลอง และการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานี i.17 เมื่อพิจารณาความถูกต้องทางสถิติพบว่า R^2 , E และ PBIAS หลังจากการสอบเทียบแบบจำลองของสถานี i.17 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ภาพที่ 7 และ ภาพที่ 8 แสดงน้ำกราฟปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนของการสอบเทียบ และการตรวจพิสูจน์ที่สถานี i.17



ภาพที่ 6 ผลการจำลองแบบปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน ก่อนการสอบเทียบ แบบจำลองที่สถานี I.17



ภาพที่ 7 ผลการจำลองแบบปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน หลังการสอบเทียบ แบบจำลองที่สถานี I.17



ภาพที่ 8 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน ที่สถานี I.17

4.2.2 จากการวิเคราะห์ฝนมี 3 สถานี คือ

1. วิเคราะห์ความแปรปรวนของฝนของสถานี 48310 (ต.บ้านต้อม อ.เมือง จ. พะเยา) มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2544,2556,2560 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2546,2562,2563,2566 ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 48310

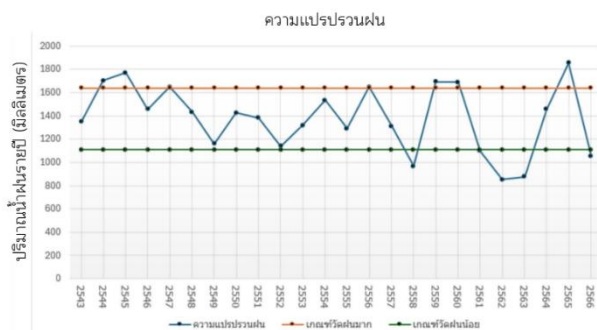


2. วิเคราะห์ความแปรปรวนของฝนของสถานี 73052 (ประมงน้ำจืดพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา) มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปี พ.ศ. 2554 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2552,2562 ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 73052

3. วิเคราะห์ความแปรปรวนของฝนของสถานี 73002 (อ.พาน จ.เชียงราย) มีปีที่มีฝนมากได้แก่ปีพ.ศ.2544,2545,2547,2556,2559,2560,2565 และปีที่มีฝนน้อยได้แก่ปี พ.ศ. 2558,2561,2562,2563,2566 ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 วิเคราะห์ความแปรปรวนฝนสถานี 73002

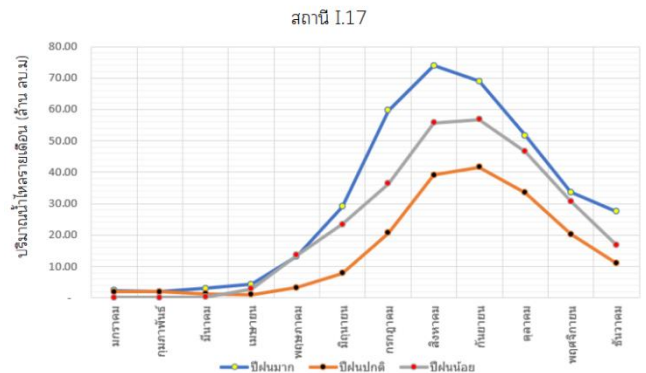
ตารางที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่า R^2 , E และ PBIAS ของก่อน-หลังการสอบเทียบ แบบจำลอง และการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานี I.17

แบบจำลอง	สถานี I.17		
	R^2	E	PBIAS (%)
ก่อนการสอบเทียบ	0.578	0.448	45.630
หลังการสอบเทียบ	0.608	0.593	0.7
การตรวจพิสูจน์	0.540	0.533	-7.05

4.3 การประเมินประมาณน้ำไหลเข้าอ่างแม่ต้าด้วยแบบจำลองลุ่มน้ำอิง

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองลุ่มน้ำอิงเพื่อประเมินน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแม่ต้า พบว่าปริมาณ ปริมาณน้ำไหลลงอ่างแม่ต้ารายเดือนมีทั้ง 3 กรณีศึกษาปีฝนปกติ ฝนมาก ฝนน้อย เป็นดังตารางที่ 5 ซึ่งสังเกตได้ว่าปีที่มีฝนปกติและฝนมาก ปริมาณน้ำไหลที่สถานีวัด I.17 มีปริมาณน้ำไหลอยู่ที่ 369.12 ล้าน ลบ.ม และ 283.22 ล้าน ลบ.ม สำหรับกรณีปีฝนมาก และปี

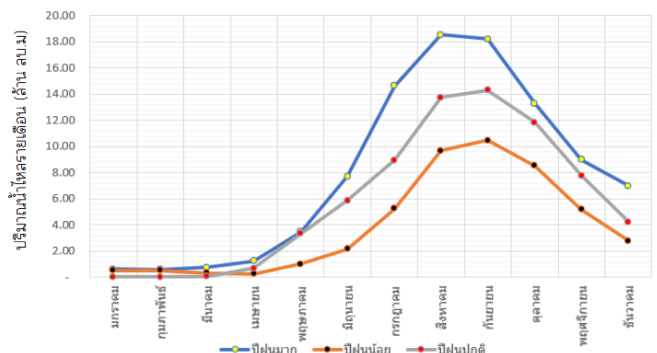
ฝนปกติตามลำดับ และปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าในปีฝนมาก และ ปีฝนปกติอยู่ที่ประมาณ 95.10 ล้าน ลบ.ม และ 70.96 ล้าน ลบ.ม ต่อปีตามลำดับ ส่วนปีฝนน้อยปริมาณน้ำสถานีวัดน้ำ I.17 มีประมาณ 183.74 ล้าน ลบ.ม และปริมาณน้ำลงอ่างแม่ต้าอยู่ที่ประมาณ 46.89 ล้าน ลบ.ม ภาพที่ 12 และ ภาพที่ 13 และ ตารางที่ 5 แสดงปริมาณน้ำปริมาณน้ำสถานีวัดน้ำ I.17 และ ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้า กรณีศึกษาปีฝนปกติ-มาก-น้อย



ภาพที่ 12 ผลการวัดแบบจำลองปริมาณน้ำไหลที่สถานี I.17

ใน 3 กรณีการศึกษา

แม่ต้า



ภาพที่ 13 ผลการวัดปริมาณน้ำแบบจำลองที่ไหลลงอ่างแม่ต้า

ใน 3 กรณีการศึกษา

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณน้ำปริมาณน้ำสถานีวัดน้ำ I.17 และ ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้า กรณีศึกษาปีฝนปกติ-มาก-น้อย

เดือน	ปริมาณน้ำไหลลงอ่าง (ล้าน ลบ.ม.)					
	สถานีวัดน้ำ I.17			อ่างเก็บน้ำแม่ต้า		
	ปีฝนปกติ	ปีฝนน้อย	ปีฝนมาก	ปีฝนปกติ	ปีฝนน้อย	ปีฝนมาก
ม.ค.	0.10	1.98	2.28	0.03	0.55	0.62
ก.พ.	0.11	1.96	1.95	0.04	0.53	0.59
มี.ค.	0.24	1.31	3.05	0.07	0.35	0.78
เม.ย.	2.81	1.00	4.27	0.70	0.29	1.25
พ.ค.	13.66	3.31	13.15	3.35	1.03	3.49
มิ.ย.	23.43	7.88	29.06	5.89	2.19	7.70
ก.ค.	36.32	20.71	59.70	8.97	5.27	14.63
ส.ค.	55.74	39.10	73.92	13.76	9.69	18.53
ก.ย.	56.78	41.65	69.00	14.30	10.48	18.22
ต.ค.	46.63	33.53	51.67	11.84	8.53	13.30
พ.ย.	30.72	20.32	33.64	7.79	5.19	9.00
ธ.ค.	16.70	10.97	27.43	4.23	2.80	6.99
รวม	283.22	183.74	369.12	70.96	46.89	95.10



5.สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำท่าในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำลุ่มน้ำอิง จะต้องทำการศึกษาศักยภาพของลุ่มน้ำทั้งทางอุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา และคุณลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ แบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT เป็นแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาดังกล่าวได้ โดยการใช้ข้อมูลหตุภูมิมาสร้างแบบจำลองที่สามารถเป็นตัวแทนลุ่มน้ำอิง ซึ่งขั้นตอนการสร้างแบบจำลองนั้น แบ่งออกเป็น การจัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลอง การสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำ การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification)

การสอบเทียบแบบจำลองใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2546 ถึง วันที่ 31 ธันวาคม 2566 และข้อมูลในการตรวจพิสูจน์แบบจำลองใช้ข้อมูล ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2559 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2566 และ ได้ทำการพิจารณาค่าทางสถิติได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (Nash-Sutcliffe efficiency : E) และ Percent Bias (PBIAS) ที่สถานีวัดปริมาณน้ำ I.17 (บ้านเจดีย์งาม ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ. พะเยา) จะเห็นได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลองค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัว ของทั้งสามสถานี อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ จึงต้องทำการสอบ เทียบแบบจำลองโดยการปรับแก้ตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม SWAT เป็นตัวช่วยในการปรับค่าตัวแปรต่างๆที่ควรแก้ไข เมื่อพิจารณาความถูกต้องทางสถิติพบว่าค่า R^2 , E และ PBIAS หลังจากการสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Verification) พบว่า ค่า R^2 ก่อนสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.578 และหลังสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.608, ค่า E ก่อนสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.448 และหลังสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.593 ค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และ พบว่าค่า PBIAS มีค่า ก่อนสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 45.630 หลังสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.70 และ การตรวจพิสูจน์แบบจำลอง เท่ากับ -7.05 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำท่าในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอิงที่มีความร้ายแรงได้ และสามารถนำแบบจำลองนี้ไปศึกษาสภาพอุทกวิทยาในลุ่มน้ำ เช่น ถ้าสามารถพยากรณ์ข้อมูลฝนได้ก็จะสามารถใช้แบบจำลองลุ่มน้ำอิงในการศึกษาสภาพอุทกวิทยาของลุ่มน้ำ ประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานี I.17 ได้ เป็นต้น หรือนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงข้อมูลทาง อุตุณิยมวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือสภาพทาง กายภาพของพื้นที่ เช่น การเปลี่ยนการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าได้

6.อภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง SWAT มีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับลุ่มน้ำอิง เนื่องจากสามารถสะท้อนกระบวนการไหลของน้ำได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การเปลี่ยนแปลง

การใช้ประโยชน์ที่ดิน การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ตลอดจนผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทำให้ปริมาณฝนเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำโดยตรง การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจึงเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์และเตรียมมาตรการจัดการทรัพยากรน้ำได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ผลลัพธ์จากการจำลองยังสามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงวิชาการเพื่อสนับสนุนการวางแผนและการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านการจัดการน้ำ ไม่ว่าจะเป็นการป้องกันหรือลดความเสี่ยงจากปัญหาน้ำท่วมและภัยแล้ง หรือการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านน้ำ เช่น อ่างเก็บน้ำ ฝายทดน้ำ ระบบชลประทาน รวมทั้งมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำในพื้นที่ต้นน้ำ ทั้งหมดนี้มีส่วนช่วยให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำอิงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำท่าปีสำหรับลุ่มน้ำอิงตอนบน และ ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างแม่ต้าโดยแบบจำลอง SWAT สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ

อาจารย์ ดร.ขวัญสิริณา ธนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ มาโดยตลอดผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คณะผู้จัดทำที่ช่วยกันค้นคว้า และจัดทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษดา ธนะวงศ์, เกรนิทร สดุดใจ, สุริยาจุฑา ประอ้าย, ขวัญสิริณา ธนะวงศ์ (2567). การศึกษาสภาพอุทกวิทยาโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT: กรณีศึกษา ลุ่มน้ำอิง ประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29, เชียงใหม่.
- [2] เอก อารีสุโข (2548). ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบน โดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] เทวินทร์ แก้วเมืองมูล และ ชาญชัย แสงชัยสวัสดิ์. อิทธิพลของการเกษตรต่อปริมาณน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ทาโดยใช้แบบจำลอง SWAT. ใน: รายงานการ สัมมนาระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 5 :พลังงาน ทดแทนและความมั่นคงทางอาหารเพื่อมนุษยชาติ ระหว่างวันที่ 2-4 กรกฎาคม 2552 ณ โรงแรมอูบล อินเตอร์ เนชั่นแนล อุบลราชธานี. น.356-364.



- [4] เทวินทร์ แก้วเมืองมูล (2552). การประเมินประสิทธิภาพการใช้น้ำเพื่อการเกษตรในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ทา จังหวัดลำพูนโดยใช้แบบจำลอง SWAT. ปรินญาณพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยเจริญ และ เจริญ สารพันธ์ (2556). การประเมินปริมาณน้ำในลุ่มน้ำแม่แจ่มโดยใช้แบบจำลอง SWAT. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 5. บทความที่ 128.
- [6] พิทักษ์ งามเมืองดิง (2560). การประเมินแนวทางการจัดการมลพิษจากธาตุอาหารพืชในลุ่มน้ำกว๊านพะเยาด้วยแบบจำลอง SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา.
- [7] ศรายุทธ วงศาศรี (2554). การประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำของจังหวัดหนองบัวลำภูโดยใช้แบบจำลอง SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [8] ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยเจริญ และ นรินทร์ แก้วผัน (2557). การประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยในลุ่มน้ำแม่แจ่มโดยใช้แบบจำลอง SWAT. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19. บทความที่ 5.
- [9] สุจริต คุณธนกุลวงศ์ วิรัช ฉัตรตรงค์, วินัย เขาวนวิวัฒน์, โชคชัย สุทธิธรรมจิต, วิษญาณ เจริญกุล, วิชุดา เหมเสถียร (2553). ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกต่อปริมาณน้ำฝน/น้ำท่ารายเดือน ของประเทศไทย และผลกระทบต่อการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ภาค ตะวันออก, รายงานการวิจัย, ศูนย์ข้อมูลการวิจัย Digital "วช."
- [10] โอฟาร เวศอุไร (2548). ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม แหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] Dhami,B.,Himanshu,S.K.,Pandey,A.and Gautam, A.K. (2018),Evaluation of the SWAT model for water balance study of a mountainous snowfed river basin of Nepal. Environmental Earth Sciences.77,21 (2018).
- [12] Abbaspour, K. C.,Rouholahnejad, E.,Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H.,& Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe:Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model.Journal of Hydrology 524, 733-752.
- [13] Van Liew M. W. and Garbrecht J. (2003). Hydrologic simulation of the Little Washita River Experimental Watershed using SWAT. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2), pp. 413-426.
- [14] R Jayakrishnan., Srinivasan R., Santhi C. and Arnold J. G. (2005). Advances in the Application of the SWAT Model for Water Resources Management. Hydrological Processes, 2005, 19(3), pp. 749-762.
- [15] Pruski FF. and Nearing MA. (2002) Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. Water Resources Research 38 (12), Article no. 1298
- [16] Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah S., Williams J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American Water Resources Association, Vol 34 No.1,
- [17] Vilaysanea B., Takara K., Luoblnth P., Akkharath I. and Duan W. (2015). Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. Procedia Environmental Sciences, 2015, 28, pp. 380-390.
- [18] Tabares D. R., Tarquis A. M., Willaarts B. and Miguel A. D. (2019). An accurate evaluation of water availability in sub arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega Eresma-Adaja. Agricultural Water Management, 2019, 212, pp. 211-225.
- [19] Pechlivanidis I., Jackson B., McIntyre N. and H. Wheeler. (2011). Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. Global NEST Journal, 2011, 13(3), pp. 193-214.
- [20] Tessema S. (2011). Hydrological Modeling as a Tool for Sustainable Water Resources Management: a Case Study of the Awash River Basin. PhD Thesis, 2011, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.



การวิเคราะห์สมดุลน้ำเพื่อการบริหารจัดการน้ำ : กรณีศึกษาพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา

Analysis of water balance for water Management : Case Study of University of Phayao Area

นายมนูญกานต์ ชัยชนะ^{1*} นายณัฐนันท์ ศรีเมือง² นายธนกร บุญช่วย³ และนายปฏิพัทธ์ นุบุญมา⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102363@up.ac.th

บทคัดย่อ

จากการเกิดปัญหาด้านทรัพยากรน้ำที่ขาดแคลน และการบริหารสมดุลน้ำในประเทศไทยที่มีแนวโน้มจะเป็นปัญหามากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มหาวิทยาลัยพะเยา ได้พบกับปัญหาภัยแล้งในปี พ.ศ. 2558-2559 ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อการใช้ของบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยพะเยา จึงทำให้การบริหารจัดการสมดุลของน้ำจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อรับมือในสถานการณ์ต่างๆที่จะเกิดขึ้นทั้งด้านการขาดแคลนน้ำและน้ำท่วมในมหาวิทยาลัยพะเยา การศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปด้านการบริหารจัดการน้ำ และหาแนวทางเพื่อรับมือกับการเกิดปัญหาน้ำขึ้นภายในอนาคต โดยประเมินน้ำต้นทุน เปรียบเทียบกับปริมาณความต้องการใช้น้ำในการทำกิจกรรมต่างๆ จากการศึกษาสามารถหาปริมาณน้ำดิบอยู่ที่ประมาณ 2,249,653 ลบ.ม โดยนำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา 1,447,000 ลบ.ม ซึ่งจำเป็นจะต้องหาปริมาณน้ำดิบเพิ่มเติม เพื่อให้เพียงพอและสามารถรับรองปริมาณความต้องการของน้ำที่จะเพิ่มขึ้นได้ ผลการศึกษานี้ทำให้สามารถเข้าใจกับสถานการณ์น้ำภายในปัจจุบัน และเป็นแนวทางบริหารจัดการน้ำเพื่อลดปัญหาผลกระทบด้านทรัพยากรน้ำ เพื่อสร้างความมั่นคงด้านทรัพยากรน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยา

คำสำคัญ : มหาวิทยาลัยพะเยา สมดุลน้ำ ปริมาณน้ำต้นทุน ความมั่นคงด้านน้ำ การผลิตน้ำประปา ความต้องการใช้น้ำของมหาวิทยาลัยพะเยา

Abstract

Due to the lack of water resource problems and water balance management in Thailand that is more likely to be a problem. As a result, University of Phayao encountered drought problems in 2015-2016, which affects the water use of Personnel in University of Phayao. Therefore making the water balance of water is important To cope in various situations that will occur in both the lack of water and flooding in University of Phayao.

This study will focus on water management and find ways to deal with problems within the future. By evaluating water costs Compare with the amount of water demand for various activities. The study can find the amount of raw water at approximately 2,249,653 cubic meters, which is used in the production of water supply 1,447,000 cubic meters, which requires additional raw water. To be sufficient and able to guarantee the amount of water to increase This study makes it possible to understand the current water situation. And is a water management guideline to reduce the problem of water resources To build a water resources of University of Phayao

Keywords: Kwan Phayao, water diversion canal, reservoir, Mae Na Rua Subdistrict

1. บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

จากอดีตที่ผ่านมาพบว่า ประเทศไทยเผชิญกับวิกฤตภัยแล้งที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการขาดแคลนแหล่งน้ำเพื่อการเกษตรและการอุปโภคบริโภค ปรากฏการณ์นี้ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก และเมื่อมีการติดตามสถานการณ์ ปรากฏการณ์เอนโซ (ENSO) ในเดือนพฤษภาคม 2558 พบว่า อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณตอนกลาง และทางตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีค่าสูงกว่าค่าปกติและสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่เพียงเท่านั้น อุณหภูมิผิวน้ำทะเลที่อยู่ลึกลงไปจนถึงระดับประมาณ 300 เมตร ก็สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับเดือนก่อนหน้า

การเปลี่ยนแปลงนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบบรรยากาศ โดยลมฝ่ายตะวันตกที่ระดับ 850 hPa และลมฝ่ายตะวันออกที่ระดับ 200 hPa ซึ่งพัดปกคลุมบริเวณเขตศูนย์สูตรของมหาสมุทรแปซิฟิก มีค่าผิดปกติและมีแนวโน้มสูงกว่าค่าปกติอย่างต่อเนื่อง การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและ



แบบจำลองเชิงพลวัตยืนยันว่านี่คือ ปรากฏการณ์เอลนีโญ ซึ่งคาดว่าจะดำเนินไปจนถึงสิ้นปี 2558 และมีโอกาสพัฒนาเป็นเอลนีโญกำลังแรงได้ ผลกระทบที่ตามมาคือ ปริมาณฝนในประเทศไทยมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าปกติ ในหลายพื้นที่ และอุณหภูมิเฉลี่ยจะสูงกว่าค่าปกติ ทำให้ปัญหาภัยแล้งยิ่งทวีความรุนแรง

มหาวิทยาลัยพะเยา ได้เข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 โดยจากปัญหาลำเลียงระดับประเทศดังกล่าว ก็ได้เผชิญกับวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรงในช่วงปี พ.ศ. 2558-2559 วิกฤตการณ์ครั้งนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อนิสิต บุคลากร และผู้มาติดต่องานในมหาวิทยาลัย ทำให้ไม่สามารถใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างเพียงพอ ผู้ที่พักอาศัยภายในมหาวิทยาลัยต้องใช้น้ำอย่างประหยัด โดยมหาวิทยาลัยจำเป็นต้องจำกัดการเปิดน้ำให้ใช้เพียงวันละ 1 ครั้งในเวลาที่กำหนด ซึ่งหลายครั้งก็ไม่เพียงพอ เนื่องจากน้ำที่จัดเตรียมไว้หมดลงก่อนเวลาปิดการใช้น้ำ

วิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยาและบริเวณโดยรอบส่งผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตน้ำประปา โดยเฉพาะอย่างยิ่งอ่างเก็บน้ำห้วยนาบอย ซึ่งเป็นแหล่งน้ำหลักสำหรับใช้ผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยพะเยา ไม่มีน้ำคงเหลืออยู่ในอ่างและไม่สามารถจ่ายน้ำให้แก่มหาวิทยาลัยได้เลย นอกจากนี้ อ่างเก็บน้ำแห่งนี้ 1 และแห่งที่ 2 ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำรองภายในมหาวิทยาลัย ก็มีปริมาณน้ำไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในช่วงหน้าแล้ง ด้วยสถานการณ์ที่บีบคั้นนี้ มหาวิทยาลัยพะเยาจึงจำเป็นต้องกำหนดมาตรการต่าง ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ และประคับประคองให้ผ่านพ้นวิกฤตการณ์ในครั้งนั้นไปได้ ซึ่งรวมถึงการซื้อน้ำจากการประปาส่วนภูมิภาคมาเพิ่มเติม เพื่อให้มีน้ำเพียงพอต่อความต้องการขั้นพื้นฐานของนิสิตและบุคลากร

จากการประเมินปัญหาดังกล่าว พบว่าอ่างเก็บน้ำหลักที่ใช้ คือ ห้วยนาบอย, อ่างหลวง, และอ่างนกยูง มีปริมาณความจุที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำของบุคลากรและนิสิตภายในมหาวิทยาลัยพะเยา ดังข้อมูลอ้างอิงจากปีที่เกิดภัยแล้งรุนแรงในปี พ.ศ. 2558 ที่ชี้ให้เห็นว่าอ่างเก็บน้ำทั้งสามแห่งมีความจุที่ไม่สอดคล้องกับปริมาณการใช้น้ำ การคาดการณ์จำนวนนิสิตนักศึกษาและบุคลากรในสถานศึกษาที่เพิ่มขึ้นทุกปี ยิ่งตอกย้ำว่าความต้องการใช้น้ำจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจนำไปสู่การขาดแคลนน้ำอีกครั้งในอนาคต

ด้วยเหตุผลและความท้าทายที่กล่าวมาข้างต้น ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ ปริมาณน้ำต้นทุน ที่มีอยู่ในพื้นที่ศึกษา วิเคราะห์ ปริมาณความต้องการน้ำ ที่แท้จริงของมหาวิทยาลัยพะเยา และที่สำคัญคือ การวิเคราะห์ สมดุลน้ำ เพื่อทำความเข้าใจว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่สามารถรองรับความต้องการได้มากน้อยเพียงใด การวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้จะ

นำไปสู่การกำหนดแนวทางการ บริหารจัดการน้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา ที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีน้ำเพียงพอต่อการอุปโภคบริโภคของทุกคนในมหาวิทยาลัย แม้ในยามที่เกิดวิกฤตภัยแล้งในอนาคต

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1. เพื่อประเมินปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณความต้องการน้ำ และวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา
- 1.2.2. เพื่อวิเคราะห์ หาวิธีการป้องกันและแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำภายในมหาวิทยาลัยที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

1.3. ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1. พื้นที่ศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
- 1.3.2. ข้อมูลสาธารณูปโภค จากหน่วยงาน กองอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ใช้ในการศึกษา เป็นข้อมูลทุติยภูมิเท่านั้น
- 1.3.3. ระยะเวลาการศึกษา 1 ภาคการศึกษา

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ทราบข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุนภายใน มหาวิทยาลัยพะเยา
- 1.4.2. ทราบข้อมูลปริมาณน้ำใช้ภายใน มหาวิทยาลัยพะเยา
- 1.4.3. ทราบข้อมูลการสมดุลน้ำในปัจจุบัน และสามารถนำไปวิเคราะห์ คาดคะเนข้อมูลสมดุลน้ำในปีต่อ ๆ ไปได้
- 1.4.4. ได้แนวทางการบริหารจัดการน้ำภายในพื้นที่ มหาวิทยาลัยพะเยา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎี

2.1.1 สมดุลน้ำ (Water Balance)

สมดุลน้ำเป็นหลักสำคัญในการคำนวณการจัดการทรัพยากรแหล่งน้ำ โดยพิจารณาหน่วย ๆ หนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณซึ่งอาจจะเป็นพื้นที่รับน้ำ อ่างเก็บน้ำ แพล่งนา หรือส่วนของแม่น้ำก็ได้ เรียกหน่วยที่พิจารณาว่าปริมาตรควบคุม (Control Volume) โดยหลักการของสมดุลน้ำกล่าวว่าในปริมาตรควบคุมอันหนึ่ง อัตราการไหลเข้าของน้ำลบด้วยอัตราการไหลออกย่อมมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ (Storage) ในปริมาตรควบคุมนั้นซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I - Q = dS/dt \quad (1)$$

เมื่อ I คืออัตราการไหลเข้า Q คือ อัตราการไหลออก S คือปริมาณน้ำใน Control Volume และ t คือเวลา ส่วน dS/dt คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ ในการคำนวณสมดุลน้ำ ทำการพิจารณา ส่วนประกอบของการไหลเข้า และการไหลออกให้ครบถ้วนที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยปกติส่วนประกอบของการไหลเข้า (Inflow) ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน



การไหลเข้าทางผิวดิน (Surface Inflow) การไหลเข้าใต้ดิน (Subsurface Inflow) ส่วนประกอบของการไหลออก (Outflow) ได้แก่ การระเหย (Evaporation) การไหลออกทางผิวดิน (Surface Outflow) และการไหลออกทางใต้ดิน (Subsurface Outflow) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P + R_i + G_i - E - R_o - G_o = \Delta S / \Delta t \quad (2)$$

เมื่อ P คือ ปริมาณน้ำฝน R_i และ R_o คือ อัตราการไหลผิวดินไหลเข้าและการไหลออกตามลำดับ G_i และ G_o คืออัตราการไหลใต้ผิวดินไหลเข้าและไหลออกตามลำดับ $\Delta S / \Delta t$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเก็บกัก

2.1.2. ภัยแล้ง (Drought)

ภัยแล้ง คือ ภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดสภาวะแห้งแล้งในอากาศ รวมถึงพื้นดินจากการขาดแคลนน้ำ และหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) เป็นระยะเวลานาน โดยทั่วไปแล้วระดับความรุนแรงของภัยแล้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งความชื้นในอากาศและดิน ปริมาณที่ฝนตกน้อย การเกิดพายุหมุนเขตร้อนและไซโคลน เป็นต้น หากความแห้งแล้งเกิดขึ้นในพื้นที่กว้างเป็นระยะเวลานานโดยมีปริมาณฝนตกเล็กน้อย บริเวณดังกล่าวจะถูกจัดอยู่เป็นพื้นที่วิกฤตภัยแล้งระดับรุนแรง ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องหาทางแก้ไขภัยแล้งนี้อย่างเร่งด่วน

ภัยแล้ง ส่งผลให้ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ รวมถึงความชื้นในอากาศลดน้อยลง จนนำมาสู่วิกฤตขาดแคลนน้ำและอาหาร เนื่องจากไม่สามารถเพาะปลูกได้ หรือทำให้ปศุสัตว์ล้มตาย นอกจากนี้ ความขาดแคลนจากภัยแล้งยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สุขอนามัย ตลอดจนการสร้างความเสียหาย

การเกิดภัยแล้งทั่วโลกมีปัจจัยหลักมาจาก 2 สาเหตุ ดังนี้

ภัยแล้งจากธรรมชาติ : เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศระดับน้ำทะเล และอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโลก ส่งผลให้มีสภาพอากาศแปรปรวนในช่วงฤดูกาลปกติ ปริมาณฝนตกทั้งช่วงนานกว่าปกติ ตลอดจนกระตุ้นให้เกิดพายุหมุนเขตร้อนในมหาสมุทร หรือไซโคลน การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้นับเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดภัยธรรมชาติอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น แผ่นดินไหว หรือพายุไต้ฝุ่นกระหน่ำ เป็นต้น

ภัยแล้งจากการกระทำของมนุษย์ : กิจกรรมทางภาคเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม เกษตรกรรม การสร้างมลภาวะจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า เป็นพฤติกรรมที่กระตุ้นให้เกิดภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ หรือ Climate change ที่นำมาสู่ปัญหาภัยแล้งในหลายพื้นที่ทั่วโลก

การประยุกต์ใช้สมมูลน้ำในการแก้ไขปัญหาภัยแล้งเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำความเข้าใจและหาวิธีแก้ไขปัญหามันได้อย่างมีประสิทธิภาพ การที่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งประสบปัญหาภัยแล้ง นั้นหมายความว่าอัตราการไหลเข้าของน้ำ (Inflow) มีน้อยกว่าอัตราการไหลออกของน้ำ

(Outflow) อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่กักเก็บ (Storage) ลดลงอย่างต่อเนื่องจนอยู่ในระดับวิกฤต ดังนั้น การจัดการภัยแล้งจึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มองค์ประกอบของ Inflow และ/หรือ ลดองค์ประกอบของ Outflow ในปริมาณควบคุมนั้นๆ เช่น การเพิ่มปริมาณน้ำฝนเทียม (P), การสร้างแหล่งกักเก็บน้ำเพิ่มเติมเพื่อเพิ่ม Surface Inflow (R_i) หรือลด Surface Outflow (R_o) ในช่วงฤดูแล้ง, การปรับปรุงระบบชลประทานให้มีประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสียจากการระเหย (E) และการรั่วไหล, และการฟื้นฟูสภาพป่าเพื่อเพิ่มการซึมซับน้ำลงใต้ดิน (G_i) และลดการไหลบ่าผิวดิน (R_o) อย่างรวดเร็ว การทำความเข้าใจสมการสมมูลน้ำและองค์ประกอบต่างๆ อย่างถ่องแท้ จะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนและดำเนินมาตรการแก้ไขปัญหาภัยแล้งได้อย่างแม่นยำและยั่งยืน โดยพิจารณาทั้งปัจจัยทางธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ เพื่อให้เกิดการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างสมดุลที่สุด.

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์สมมูลน้ำ การจัดทำบัญชีสมมูลน้ำและผลิตภาพจากน้ำ (Water Balance Analysis, Water Accounting and Water Productivity) ภายใต้ โครงการวิเคราะห์สถานะของความมั่นคงด้านน้ำ ผลิตภาพจากน้ำ และภัยพิบัติ เพื่อใช้ในการจัดทำแผนแม่บทโดยเฉพาะด้านน้ำ โดย : รศ.ดร.สุจิต คุนธนกุลวงศ์ และ ดร.โชคชัย สุทธิธรรมจิต (27 เม.ย. 2562)

ศึกษาทำความเข้าใจ สถานะของทรัพยากรน้ำในประเทศไทยอย่างรอบด้าน โดยมีเป้าหมายหลักคือการวิเคราะห์และประเมินภาพรวมของความมั่นคงด้านน้ำในปัจจุบัน ผลิตภาพจากการใช้น้ำในภาคส่วนต่าง ๆ และความเสี่ยงจากภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ไม่ว่าจะเป็นภาวะน้ำท่วมหรือภัยแล้ง การศึกษานี้จึงเป็นรากฐานสำคัญในการรวบรวมข้อมูลและสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพลวัตของน้ำในแต่ละพื้นที่ เพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่ยั่งยืน และมีประสิทธิภาพ

ใช้วิธีการ ที่เป็นระบบและครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้แนวคิดหลัก 3 ประการ ได้แก่ การวิเคราะห์สมมูลน้ำ (Water Balance Analysis) เพื่อติดตาม และประเมินปริมาณน้ำที่เข้าและออกจากระบบ การจัดทำบัญชีสมมูลน้ำ (Water Accounting) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการบันทึกและจำแนกการใช้น้ำในแต่ละภาคส่วนอย่างละเอียด เพื่อให้เห็นภาพการจัดสรร และการไหลเวียนของน้ำอย่างชัดเจน และ ผลิตภาพจากน้ำ (Water Productivity) เพื่อวัดประสิทธิภาพของการใช้น้ำในการสร้างมูลค่าหรือผลผลิต ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการระบุโอกาสในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การวิเคราะห์สมมูลน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนนโยบายด้านน้ำของประเทศ การทำความเข้าใจสถานะของสมมูลน้ำ การทราบถึงบัญชีน้ำที่ชัดเจน และการประเมินผลิตภาพจากการใช้น้ำ จะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถจัดทำ แผนแม่บทโดยเฉพาะด้านน้ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การจัดสรรทรัพยากรน้ำที่เหมาะสม การ



พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านน้ำ การส่งเสริมการใช้น้ำอย่างประหยัด และการเตรียมความพร้อมในการรับมือกับภัยพิบัติด้านน้ำในอนาคต เพื่อสร้างความมั่นคงด้านน้ำในระยะยาวให้กับประเทศ.

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน : กรณีศึกษาหมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอกุเวียง จังหวัดขอนแก่น (Analysis of water amount as a guide for water management in non-irrigated area: a case study of Nongphon village, Kudkhonkean sub- district, Phuwiang district; Khonkean province) โดย รัชยา ธรากุลทิพย์ และ ทรงวุฒิ แสงจันทร์

ศึกษาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในพื้นที่หมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอกุเวียง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นพื้นที่นอกเขตชลประทาน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทำความเข้าใจและประเมินสถานการณ์น้ำในชุมชนดังกล่าว การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์แหล่งน้ำที่มีอยู่ ความต้องการใช้น้ำของชุมชนในกิจกรรมต่าง ๆ รวมถึงความท้าทายและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการขาดแคลนน้ำหรือการจัดการน้ำที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการวางแผน และพัฒนาแนวทางการบริหารจัดการน้ำที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสำรวจภาคสนาม การสัมภาษณ์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในชุมชน เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับรูปแบบการใช้น้ำ ปัญหาที่ประสบ และความต้องการของประชาชน นอกจากนี้ อาจมีการใช้ข้อมูลทุติยภูมิ เช่น ข้อมูลสภาพอากาศ ปริมาณน้ำฝน หรือข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อประกอบการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในพื้นที่ และการทำประมาณการความสมดุลของน้ำ (water balance) ในระดับชุมชน ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจที่ชัดเจนเกี่ยวกับช่องว่างระหว่างปริมาณน้ำที่ต้องการและปริมาณน้ำที่มีอยู่จริง

ผลของการวิจัย นำไปสู่การระบุแนวทางและมาตรการที่เป็นรูปธรรมในการจัดการน้ำในพื้นที่หมู่บ้านหนองโพน โดยเฉพาะในบริบทของพื้นที่นอกเขตชลประทาน ผลการศึกษายังช่วยให้ชุมชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนการบริหารจัดการน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การพัฒนาระบบกักเก็บน้ำ การส่งเสริมการใช้น้ำอย่างประหยัด หรือการแสวงหาแหล่งน้ำสำรอง การวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในระดับท้องถิ่น เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ และสร้างความมั่นคงด้านน้ำให้กับชุมชนในพื้นที่ชนบท.

การศึกษาศักยภาพการกักเก็บน้ำเพิ่มเติมด้วยขนาดเล็กในพื้นที่ลุ่ม น้ำย่อยป่าสักส่วนที่ 2 Study of Small Pond Water Storage Increment Potential in Pasak II-Subbasin โดยธนพันธ์ ตรีชั้น 1, ลิตา ศ์ พิลัยหล้า 2 1 นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เม.ย. 2561)

ศักยภาพ และโอกาสในการเพิ่มปริมาณการกักเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยป่าสักส่วนที่ 2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์จาก สระขนาดเล็ก งานวิจัยมุ่งเน้นการประเมินว่าการสร้างหรือปรับปรุงสระน้ำขนาดเล็กที่มีอยู่จะสามารถช่วยเสริมสร้างความมั่นคงด้านน้ำในพื้นที่ได้อย่างไร ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำสำรองสำหรับอุปโภคบริโภค การเกษตร หรือเพื่อลดผลกระทบจากภัยแล้งและน้ำท่วม การศึกษานี้จึงมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจถึงบทบาทของโครงสร้างพื้นฐานด้านน้ำขนาดเล็กในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระดับท้องถิ่น

การสำรวจข้อมูลภาคสนาม การวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศ (GIS) และการสร้างแบบจำลองทางอุทกวิทยา เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าที่สามารถกักเก็บได้ในสระขนาดเล็ก รวมถึงการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำ เช่น ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ ปริมาณน้ำฝน และรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน การใช้เทคนิคเหล่านี้ช่วยให้นักวิจัยสามารถระบุตำแหน่งที่มีศักยภาพในการสร้างสระน้ำเพิ่มเติม และประเมินปริมาณน้ำที่คาดว่าจะกักเก็บได้ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนการพัฒนาแหล่งน้ำในอนาคต

ศักยภาพที่สำคัญของสระขนาดเล็กในการเพิ่มขีดความสามารถในการกักเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยป่าสักส่วนที่ 2 โดยงานวิจัยได้ระบุพื้นที่เป้าหมายและประมาณการปริมาณน้ำเพิ่มเติมที่สามารถกักเก็บได้ ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในระดับลุ่มน้ำ ผลลัพธ์นี้สามารถนำไปเป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานภาครัฐและท้องถิ่นในการส่งเสริมการพัฒนาและปรับปรุงสระน้ำขนาดเล็ก เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านน้ำให้กับชุมชนเกษตรกรรม และเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.

การวิเคราะห์สมดุลน้ำ และศักยภาพการส่ง น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรัง (An analysis of water balance and water supply potential of Sakaekrang River Basin) โดยปริญญวิศกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา - ชลประทาน) ภาควิชา วิศวกรรมชลประทาน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ: รองศาสตราจารย์บัญชา ขวัญยืน (พ.ศ. 2562)

ทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรัง โดยมุ่งเน้นที่การทำความเข้าใจถึงสมดุลน้ำภายในลุ่มน้ำ และการประเมินศักยภาพของระบบในการส่งน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำของภาคส่วนต่างๆ การศึกษานี้ครอบคลุมถึงแหล่งน้ำที่มีอยู่ ปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้น การใช้น้ำของกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเกษตร อุตสาหกรรม และการอุปโภคบริโภค ตลอดจนปัญหาและข้อจำกัดในการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำสะแกกรัง เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่จำเป็นสำหรับการวางแผน และพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำอย่างยั่งยืนในอนาคต



ทำเป็นระบบเพื่อวิเคราะห์สมดุลน้ำและศักยภาพการส่งน้ำ โดยอาจประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยา เช่น ปริมาณน้ำฝน การระเหย การคายน้ำ ปริมาณน้ำไหลในลำน้ำ รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการใช้น้ำในแต่ละภาคส่วน อาจมีการนำข้อมูลเหล่านี้มาทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อจำลองการไหลเวียนของน้ำในระบบ และประเมินความสามารถในการส่งน้ำของแหล่งน้ำและโครงข่ายการกระจายน้ำ เพื่อหาจุดที่ต้องปรับปรุงหรือพัฒนาเพิ่มเติม

ผลของการวิจัย สถานะปัจจุบันของสมดุลน้ำในลุ่มน้ำสะแกกรัง และประเมินศักยภาพที่แท้จริงของระบบในการรองรับความต้องการใช้น้ำในอนาคต ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวางแผน และตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำ เช่น การกำหนดนโยบายการจัดสรรน้ำ การพัฒนาระบบชลประทาน การก่อสร้างหรือปรับปรุงแหล่งกักเก็บน้ำ และการวางแผนรับมือกับสถานการณ์น้ำท่วม และภัยแล้งอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำสะแกกรังให้เกิดประโยชน์สูงสุดและมีความยั่งยืน.

การบริหารและการประมวลผลการศึกษาโครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อเสนอแนะสมดุลน้ำ และ มาตรการลดการใช้น้ำเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนในการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ ภาคตะวันออก (EEC) Administration and syntheses the study of research project on water balance and water saving for sustainable development in Eastern Economic Corridor (EEC) โดย บัญชา ขวัญยืน จุติเทพ วงษ์เพชร, ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ (พ.ศ. 2563)

ศึกษากระบวนการบริหารจัดการโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมดุลน้ำ และมาตรการลดการใช้น้ำในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) โดยมีเป้าหมายเพื่อสังเคราะห์และประมวลผลองค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยต่างๆ เพื่อนำไปสู่การจัดทำข้อเสนอแนะและแนวทางปฏิบัติที่เป็นรูปธรรมสำหรับการพัฒนา EEC อย่างยั่งยืน การศึกษานี้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์นโยบาย กลไกการดำเนินงาน และความท้าทายในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ EEC เพื่อให้มั่นใจว่าการพัฒนาเศรษฐกิจจะไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้านน้ำ และสิ่งแวดล้อม

การทบทวนวรรณกรรม การวิเคราะห์เอกสาร และการสัมภาษณ์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยด้านน้ำในพื้นที่ EEC อาจมีการใช้เทคนิคการสังเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (qualitative data synthesis) เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์ผลการวิจัยจากโครงการต่างๆ ที่มีความหลากหลาย ทั้งในด้านประเด็นการศึกษา วิธีการวิจัย และกลุ่มเป้าหมาย จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาประมวลผลและจัดกลุ่ม เพื่อให้ได้ข้อเสนอแนะ และมาตรการที่ครอบคลุมและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนพัฒนา EEC

ข้อเสนอแนะและมาตรการที่เป็นรูปธรรมสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนในพื้นที่ EEC ซึ่งอาจรวมถึงแนวทางการจัดสรรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การส่งเสริมเทคโนโลยีการประหยัดน้ำ การปรับปรุงกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำ และการสร้างความร่วมมือระหว่างภาคส่วนต่างๆ ในการบริหารจัดการน้ำ ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา EEC เพื่อให้มั่นใจว่าการเติบโตทางเศรษฐกิจจะควบคู่ไปกับการรักษาสมดุลของทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อมในระยะยาว.

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1. สมมติฐานงานวิจัย

ศึกษาสมดุลน้ำระหว่างปริมาณน้ำต้นทุน และปริมาณการใช้น้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา จะส่งผลให้สามารถวิเคราะห์ และประเมินศักยภาพของทรัพยากรน้ำที่มีอยู่ ซึ่งจะนำไปสู่การวางแผนบริหารจัดการน้ำอย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพในอนาคต

3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1. โปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ Excel

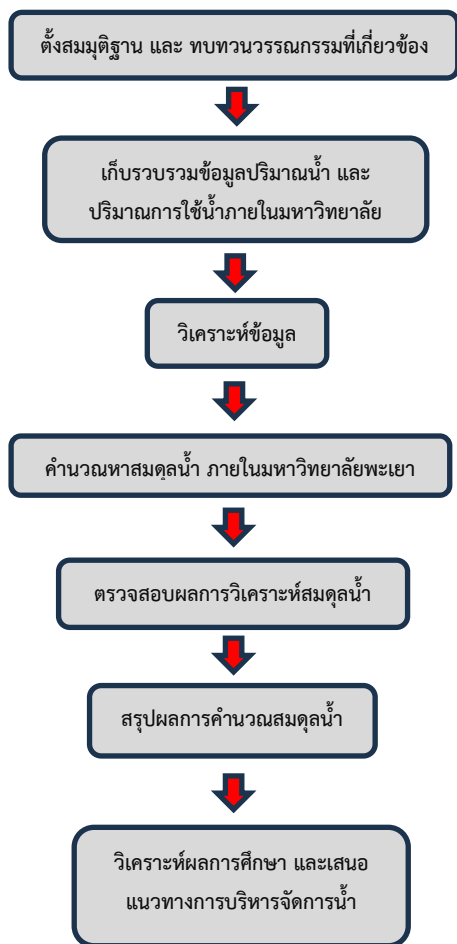
3.2.2. ข้อมูลทุติยภูมิจากเว็บไซต์กองอาคารสถานที่มหาวิทยาลัยพะเยา

3.2.3. ข้อมูลทุติยภูมิของกรมประปา มหาวิทยาลัยพะเยา

3.3. ขั้นตอนการวิจัย

แผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมติฐานงานวิจัย และ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณการใช้น้ำในปัจจุบัน และในอดีต และอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรของมหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งแปรผันโดยตรงกับปริมาณการใช้น้ำ
3. นำข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า และการวิเคราะห์ มาทำการประมวลผล
4. คำนวณสมดุลน้ำระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา
5. ทำการตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำของ มหาวิทยาลัยพะเยาว่ามีสมดุลระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำหรือไม่
6. สรุปผลการคำนวณสมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยา
7. วิเคราะห์ผลการศึกษา และเสนอแนวทางการบริหารจัดการน้ำที่จะทำให้สมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยามีความมั่นคงและยั่งยืน

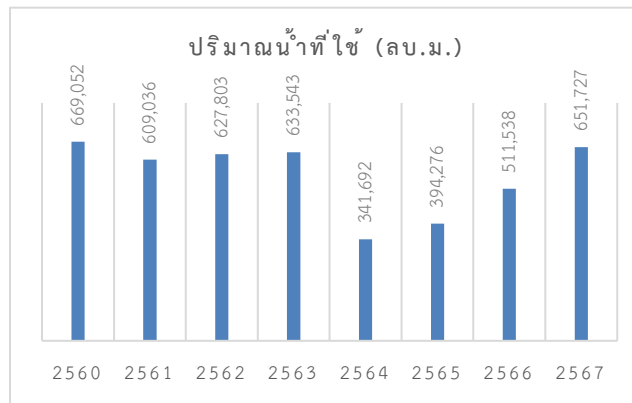


รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการศึกษา

4.1. ปริมาณการใช้น้ำ

รูปที่ 2 จะแสดงถึงข้อมูลการใช้น้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2567 โดยเป็นปริมาณการใช้น้ำทั้งหมดในกิจกรรมต่างๆ ในปี พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2565 จะมีการใช้ปริมาณน้ำที่น้อย เพราะการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยเป็นแบบออนไลน์ส่งผลให้มีบุคลากร น้อยกว่าปกติ โดยในปี พ.ศ.2564 ถึง พ.ศ.2567 จะเริ่มมีแนวโน้มการใช้ ปริมาณน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากทางมหาวิทยาลัยได้เปลี่ยนจากการเรียนการ สอนแบบออนไลน์มาเป็นการเรียนการสอนแบบปกติและยังมีจำนวนของ บุคลากรมากขึ้นจากการเติบโตของมหาวิทยาลัยจึงส่งผลให้การใช้ปริมาณน้ำ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้



รูปที่ 2 ปริมาณการใช้น้ำ พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2567

4.2. ปริมาณน้ำต้นทุน

แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ

4.2.1. ปริมาณน้ำจากอ่างเก็บน้ำ

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการเก็บปริมาณน้ำทั้ง 3 อ่าง ประกอบด้วย อ่างหลวง อ่างนกกุง อ่างห้วยนาบอย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2566 โดยเฉลี่ยปริมาณในอ่างทั้งหมดได้ปริมาณ 967,485 ลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยการสังเกตในปี พ.ศ. 2564 จะมีปริมาณน้ำในอ่างที่น้อยเนื่องจากปัญหาภัยแล้งในประเทศไทยที่ส่งผลกับปริมาณน้ำ

ปี	อ่างหลวง (ลบ.ม.)	อ่างนกกุง (ลบ.ม.)	อ่างห้วยนาบอย (ลบ.ม.)	รวม (ลบ.ม.)
2564	280,231	156,315	123,479	560,025
2565	548,487	319,168	265,417	1,133,072
2566	596,775	304,548	308,035	1,209,358
2567	596,775	304,548	308,035	1,209,358

ตารางที่ 1 รายละเอียดปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ

4.2.2. แหล่งน้ำผิวดิน

จากตารางที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงชื่อสถานที่และปริมาณน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินในมหาวิทยาลัยพะเยาพื้นที่ต่าง ๆ โดยสามารถรวมปริมาณน้ำทั้งหมดได้ 802,653 ลบ.ม. แต่ปริมาณน้ำนี้จะไม่นำไปใช้ในการผลิตน้ำใช้แต่จะนำไปใช้ในการดูแลรดน้ำต้นไม้หรือกิจกรรมต่างๆในการดูแลมหาวิทยาลัย ตารางที่ 2 แสดงถึงปริมาณน้ำผิวดิน

แหล่งน้ำ	ประมาณน้ำ(ลบ.ม)
อ่างห้วยทับช้าง	299,000
สระเก็บน้ำหน้าตึกสถาปัตยกรรม	80,000
สระเก็บน้ำอาคารเวียงพะเยา	30,000
อ่างเก็บน้ำโรงพยาบาล	87,000
สระน้ำห้วยทับช้าง	49,000
อ่างห้วยเคียน	210,000
ศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง	27,653
สระเก็บน้ำโรงประปา 2	20,000



4.2.3. แหล่งน้ำใต้ผิวดินหรือบ่อบาดาล

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงสถานที่ต่างๆและความลึกของแหล่งน้ำใต้ผิวดินหรือบ่อบาดาลทั้งหมดภายในมหาวิทยาลัยพะเยา โดยสามารถรวมข้อมูลอัตราการไหลได้ทั้งหมดที่ 86 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นแหล่งน้ำใต้ผิวดิน

ลำดับ	สถานที่	ความลึก (ม.)	อัตราการไหล (ลบ.ม/ชม.)	เวลาในการสูบ (ชม.)	ปริมาณใช้งาน 1 ปี (ลบ.ม.)
1	อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ	138	7	6	15,330
2	อาคารเรียนและหอสมุด	150	10	6	21,900
3	อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา	162	10	6	21,900
4	อาคารเรียนรวมตึกเก่า	150	10	6	21,900
5	อาคารปฏิบัติการ 12 พหุ	150	10	6	21,900
6	หอพักนิสิต มห.1	138	5	6	10,950
7	โรงประปา 1 บ่อที่ 1	150	8	6	17,520
8	โรงประปา 1 บ่อที่ 2	150	10	6	21,900
9	โรงประปา 1 บ่อที่ 3	150	8	6	17,520
10	หอประชุมกาญจนาภิเษก	150	8	6	17,520
	รวม		86	รวม	188,340

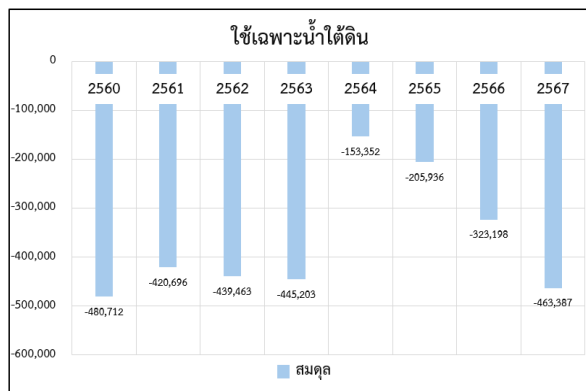


รูปที่ 3 แสดงแหล่งที่ตั้งบ่อบาดาล

ที่มา: งานสาธารณูปโภคและบำรุงรักษา กองอาคารสถานที่

4.3. วิเคราะห์สมดุลน้ำ

4.3.1. วิเคราะห์สมดุลน้ำโดยคำนวณโดยใช้เพียงแค่น้ำใต้ผิวดินเพียงอย่างเดียว ผลวิเคราะห์ที่ได้ คือ ปริมาณน้ำใต้ดินเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอกับปริมาณการใช้น้ำ ดังรูปที่ 4

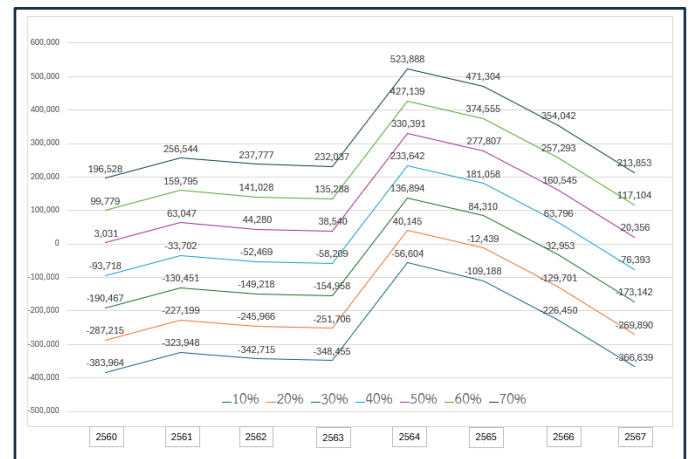


รูปที่ 4 สมดุลน้ำจากการใช้น้ำบาดาลเพียงอย่างเดียว

4.3.2. วิเคราะห์สมดุลน้ำโดยการใช้น้ำต้นทุนจากอ่างเก็บและน้ำใต้ผิวดิน

โดยจะแบ่งเป็น 4 กรณีดังนี้

1. ใช้น้ำบาดาลทั้งหมดและน้ำจากอ่างเก็บน้ำปริมาณ 10% สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปริมาณยังไม่เพียงพอกับการใช้ในทุกปี
2. ใช้น้ำบาดาลทั้งหมดและน้ำจากอ่างเก็บน้ำปริมาณ 30% สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปริมาณน้ำเริ่มมีการเพียงพอต่อการใช้ในเฉพาะแค่บางปี
3. ใช้น้ำบาดาลทั้งหมดและน้ำจากอ่างเก็บน้ำปริมาณ 50% สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปริมาณน้ำมีความเพียงพอกับการใช้ในทุกๆปีแล้วแต่ยังไม่เพียงพอในการสำรองการใช้น้ำหากเกิดสถานการณ์ต่างๆ
4. ใช้น้ำบาดาลทั้งหมดและน้ำจากอ่างเก็บน้ำปริมาณ 70% สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปริมาณน้ำเพียงพอกับการใช้ และ มีสำรองการใช้น้ำจำนวนมาก



รูปที่ 5 สมดุลน้ำจากการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำและน้ำใต้ดิน

5.สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัย เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำ และปริมาณน้ำต้นทุน พบว่าแหล่งน้ำภายในพื้นที่ที่ความเพียงพอต่อการใช้งานในภาพรวมอย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบปริมาณต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินอย่างเดียว พบว่าปริมาณน้ำใต้ดินไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยเฉพาะปีที่มีประสพปัญหาภัยแล้งต้องใช้ใช้น้ำใต้ผิวดิน และน้ำจากอ่างเก็บน้ำถึงประมาณ 50% ถึงจะเพียงพอต่อความต้องการการใช้น้ำ

การวิเคราะห์สมดุลน้ำจากน้ำใต้ดินร่วมกับน้ำผิวดิน และน้ำในอ่างเก็บน้ำจะแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีใช้น้ำใต้ผิวดิน และอ่างเก็บน้ำ 10% พบว่าปริมาณน้ำยังไม่เพียงพอกับการใช้น้ำ โดยเฉพาะปี 2560 ที่มีค่าสมดุลน้ำ -383,964 ลบ.ม ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพออย่างชัดเจน

กรณีใช้น้ำใต้ผิวดิน และอ่างเก็บน้ำ 30% พบว่ามีปริมาณน้ำที่ยังไม่เพียงพอกับการใช้น้ำในบางปี เช่น ปี 2560 ที่มีการใช้ปริมาณน้ำมาก ทำให้มีค่าสมดุลน้ำที่ -190,467 ลบ.ม แสดงถึงปริมาณน้ำที่ยังขาดแคลน



กรณีใช้น้ำผิวดิน และอ่างเก็บน้ำ 50% พบว่ามีปริมาณน้ำที่เพียงพอกับการใช้น้ำในทุกๆปีแล้ว แต่เนื่องจากมหาวิทยาลัยพะเยามีแนวโน้มที่มีบุคลากรเพิ่มขึ้นในทุกๆปี ทำให้ในอนาคตอาจมีปริมาณความต้องการน้ำมากขึ้น จึงควรมีปริมาณน้ำสำรองมากกว่านี้

กรณีใช้น้ำผิวดิน และอ่างเก็บน้ำ 70% พบว่ามีปริมาณน้ำที่มากกว่าความต้องการในทุกๆปี และมีปริมาณน้ำสำรองที่มากกว่าที่จะรองรับต่อแนวโน้มของบุคลากรที่เพิ่มขึ้นในมหาวิทยาลัยพะเยา

โดยปริมาณน้ำผิวดินที่ได้จากการศึกษานั้นจะไม่นำมารวมกับการอุปโภค บริโภค แต่จะนำไปใช้ในการดูแลมหาวิทยาลัยในด้านต่างๆ เช่น การรดน้ำต้นไม้ การดูแลสิ่งแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น

6.ข้อเสนอแนะ

1. จากการวิเคราะห์เห็นได้ว่า การใช้น้ำในสัดส่วน 50% ของน้ำใต้ดิน และอ่างเก็บน้ำสามารถรองรับการใช้น้ำได้ แต่ยังมีความเสี่ยงต่อการคลาดเคลื่อนน้ำภายในอนาคตได้ หากเกิดภัยแล้ง และจำนวนของบุคลากรที่มากขึ้น

2. เพื่อให้เกิดการบริหารสมมูลน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และลดปริมาณต้นทุนของการสูบน้ำบาดาล และอ่างเก็บน้ำเป็นแหล่งน้ำหลัก เนื่องจากปัจจุบันมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการใช้น้ำ และยังช่วยลดค่าใช้จ่าย และพลังงานในการสูบน้ำบาดาลอีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ยั่งยืนในการจัดการทรัพยากรน้ำ

3. เสนอให้มีการหาแหล่งน้ำดิบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหากใช้ปริมาณอ่างเก็บน้ำมากถึง 70% อาจส่งผลให้บริเวณของน้ำผิวดิน และอ่างเก็บน้ำ ได้รับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น ภูมิทัศน์ดูแห้งแล้ง กระบะต่อสัตว์และระบบนิเวศ คุณภาพน้ำอาจเกิดการลดลง

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษากีววิเคราะห์สมมูลน้ำในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการในการใช้น้ำ และปริมาณน้ำในพื้นที่สำเร็จโครงการนี้ได้ลุล่วงด้วยความร่วมมือ และการสนับสนุนจากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้ที่คำแนะนำช่วยตรวจสอบ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินการทำโครงการนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้และขอขอบคุณกองอาคารสถานที่ของมหาวิทยาลัยพะเยาที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษาที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณต่อสมาชิกในกลุ่มทุกคนที่ร่วมมือกันด้วยความตั้งใจและมุ่งมั่น จนโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] การวิเคราะห์สมมูลน้ำ การจัดทำบัญชีสมมูลน้ำและผลผลิตจากน้ำ (Water Balance Analysis, Water Accounting and Water Productivity) ภายใต้ โครงการวิเคราะห์สถานะของความมั่นคงด้านน้ำ ผลผลิตจากน้ำ และภัยพิบัติ เพื่อใช้ในการจัดทำแผนแม่บท โดยเฉพาะด้านน้ำโดย : รศ.ดร.สุจิตร์ คุณธนกุลวงศ์ และ ดร.โชคชัย สุทธิธรรมจิต (27 เม.ย. 2562)
แหล่งที่มา : http://projectwre.eng.chula.ac.th/watercu_eng/sites/default/files/research/รายงานบัญชีน้ำ.pdf
- [2] การวิเคราะห์ปริมาณน้ำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน : กรณีศึกษาหมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอกุเวียง จังหวัดขอนแก่น โดย รชยา ธาตุกุลทิพย์ และ ทรงวุฒิ แสงจันทร์ (8 ธ.ค. 2558)
แหล่งที่มา : [https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/download digital file/20002162/144989](https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/download%20digital%20file/20002162/144989)
- [3] การศึกษาศักยภาพการกักเก็บน้ำเพิ่มเติมด้วยสระขนาดเล็กในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยป่าสักส่วนที่ 2 (เมษายน 2561)
แหล่งที่มา : https://www.rid.go.th/Thaacid/_5_article/14symposium/Study-of-Small-Pond-WaterStorageIncrementPotential.pdf
- [4] โครงการวิศวกรรมชลประทาน เรื่องการวิเคราะห์สมมูลน้ำ และศักยภาพการส่งน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรัง (An analysis of water balance and water supply potential of Sakaekrang River Basin)คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน
แหล่งที่มา : <https://irre.ku.ac.th/project/pdf/256226.pdf>
- [5] โครงการการบริหารและการประมวผลการศึกษาโครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อเสนอแนะสมมูลน้ำและมาตรการลดการใช้น้ำเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนในการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ ภาคตะวันออก (EEC) แหล่งที่มา : https://irre.ku.ac.th/rreport/pdf/FinalReport%20EEC_SIP6230009.pdf

การประเมินพลวัตการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอดีต ปัจจุบัน และอนาคตด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์อโตมาตา (CA-ANN)

Assessment of Land Use Change Dynamics in the Past, Present, and Future Using a Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA-ANN) Model

นายกณวรรณ รุ่งโรจน์วงศ์¹, นายอมสิน ธงไชย¹

¹ นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย จ.พะเยา

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเมืองและสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์อโตมาตา (Cellular Automata - Artificial Neural Network: CA-ANN) ซึ่งผสมผสานการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับการจำลองเชิงพื้นที่ของเซลล์อโตมาตา เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลการใช้ที่ดินในช่วงเวลาต่าง ๆ และปัจจัยเชิงพื้นที่ เช่น ระยะทางจากถนนหลัก แหล่งน้ำ และพื้นที่ชุมชน โดยนำมาวิเคราะห์และฝึกแบบจำลอง CA-ANN เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง CA-ANN มีประสิทธิภาพในการจำลองและคาดการณ์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินได้อย่างแม่นยำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืน และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในระดับพื้นที่

บทนำ

1.1) ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การใช้ที่ดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมของประเทศ การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในแต่ละช่วงเวลาเกิดจากหลายปัจจัย เช่น การขยายตัวของเมือง การเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจ การลงทุนภาคเอกชน นโยบายของรัฐ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ซึ่งล้วนมีผลต่อโครงสร้างพื้นที่และการใช้ทรัพยากรในระยะยาวแม้ว่าจะมีแบบจำลองหลายประเภทที่ถูกนำมาใช้ในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เช่น แบบจำลองเชิงสถิติ หรือแบบจำลองเชิงพื้นที่ทั่วไป แต่แบบจำลองเหล่านั้นยังคงมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำ การพิจารณาปัจจัยเชิงพื้นที่และเชิงเวลา รวมถึงการตอบสนองต่อพลวัตของระบบที่ซับซ้อน

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์อโตมาตา (CA-ANN) เป็นการผสมผสานระหว่างการจำลองการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ด้วยเซลล์อโตมาตา (CA) และการเรียนรู้จากข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ซึ่งสามารถวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การนำแบบจำลอง CA-ANN มาประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลภูมิสารสนเทศในโปรแกรม QGIS จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการประเมินพลวัตการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอดีต ปัจจุบัน และคาดการณ์ในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการวางแผนการใช้ที่ดิน การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการกำหนดนโยบายเชิงพื้นที่ที่ยั่งยืน

1.2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-ANN ในการคาดการณ์การใช้ที่ดิน

1.3) ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาเฉพาะ โดยใช้ข้อมูลจากกรมที่ดินและข้อมูลเชิงพื้นที่ในช่วงปี พ.ศ. 2550 ถึง 2600 เพื่อฝึกและทดสอบแบบจำลอง CA-ANN ขอบเขตของการศึกษาเน้นเฉพาะการเปลี่ยนแปลงประเภทการใช้ที่ดินหลัก เช่น พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ชุมชน และพื้นที่ป่าไม้ โดยไม่รวมถึงการเปลี่ยนแปลงในระดับรายแปลงหรือการใช้ที่ดินเฉพาะทางอื่น ๆ การวิเคราะห์จะดำเนินการในระดับภูมิศาสตร์ที่กำหนด และใช้ข้อมูลจากแหล่งที่เชื่อถือได้เพื่อความแม่นยำของผลการคาดการณ์

1.4) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองที่สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตได้อย่างแม่นยำ

1.4.2 ได้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผนการใช้ที่ดินอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

1.4.3 สนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรที่ดิน

1.4.4 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่

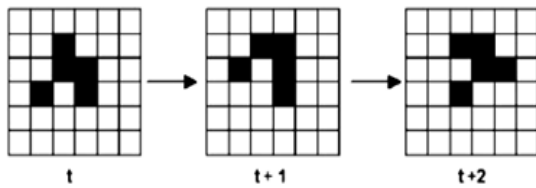
2. เอกสาร แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1) แนวคิดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีพลวัตสูง โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองซึ่งได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน และการขยายตัวทาง



เศรษฐกิจและสังคม การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลต่อรูปแบบการใช้



ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่เกษตรกรรมไปสู่พื้นที่อุตสาหกรรม ที่อยู่อาศัย และพาณิชยกรรม

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจึงมีความสำคัญต่อการวางแผนการใช้ที่ดินในอนาคตอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะการใช้แบบจำลองเพื่อคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระยะยาว

2.2) ทฤษฎีแบบจำลองเซลล์ลอว์อัตโนมัติ (Cellular Automata: CA) Cellular Automata เป็นแบบจำลองที่มีความสามารถในการอธิบายข้อมูลเชิงพื้นที่ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นพลวัตตามการประมาณค่าอธิบายได้ว่าพื้นที่การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินรอบข้างที่มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งการใช้ Cellular Automata จะแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กฎการเปลี่ยนแปลงที่ใช้ส่วนใหญ่ประกอบขึ้นมาจากกระบวนการการกรอง (Filtering) และการจัดชั้นข้อมูล (Reclassification) ในปี พ.ศ.2513 นักคณิตศาสตร์ชื่อ John Conway ได้นำ Cellular Automata มาใช้ร่วมกับทฤษฎี “Game of Life” โดยกำหนดให้หนึ่งหน่วยของเซลล์แทน ค่า ด้วย 1 หรือ เซลล์ที่มีชีวิต (Live) และกำหนดให้ 0 หรือ เซลล์ที่ไม่มีชีวิต (Dead) ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ซึ่งมีสมมติฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ไม่มี ชีวิตไว้ตามเงื่อนไขดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 2

โดย

n-west	North	n-east
west	Central	east
s-west	South	s-east

สามารถอธิบายได้ดังนี้

ภาพประกอบ 1 ตำแหน่งของเซลล์แวดล้อมทั้ง 8 หรือ 3x3 Neighborhood

2.2.1 เซลล์ที่ตายแล้วในช่วงเวลา T จะเปลี่ยนเป็นเซลล์ที่มีชีวิตในช่วงเวลา T+1 ถ้าเซลล์รอบ ๆ เซลล์ที่ว่างอยู่นั้นมีจำนวนเท่ากับ 3 เซลล์ ในเซลล์ล้อมรอบ (Neighborhood) ขนาด 3 x 3

2.2.2 เซลล์ที่มีชีวิตอยู่ในช่วงเวลา T จะตายในช่วงเวลา T+1 ถ้ามีเซลล์ล้อมรอบ ด้วยจำนวนน้อยกว่า 2 หรือมากกว่า 3 เซลล์ ในเซลล์ล้อมรอบ

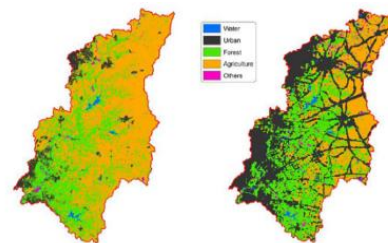
ภาพประกอบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเซลล์ในแต่ละช่วงเวลาตามกฎการเปลี่ยนแปลง “Game of Life” ของ John Conway (ชุดฟังก์ชันสนธิ, 2551)

ทฤษฎี “Game of Life” ถูกนำไปประยุกต์ร่วมกับ Cellular Automata เพื่อใช้ คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ที่เรียกว่า “CA-Markov” กระบวนการการทำงานของ CA-Markov เพื่อใช้การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน สามารถสรุปกระบวนการทำงานได้ 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่1ใช้ Markov Chain เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินเชิงปริมาณ

ขั้นตอนที่2 ใช้การวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติก หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการที่ดินและสิ่งปกคลุมดินกับปัจจัยทางกายภาพเพื่อหาความน่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและ สิ่งปกคลุมดินเชิงพื้นที่ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ความหลากหลายเงื่อนไข (Multi-Criteria Evaluation)

ขั้นตอนที่3 ใช้ Cellular Automata เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดินเชิงพื้นที่ โดยใช้ CA Filter ขนาด 5 x 5



แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปีฐาน แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินคาดการณ์อนาคต

Neighborhood ในการกรองข้อมูลทีละ เซลล์ในพื้นที่ศึกษาตามทฤษฎี “Game of Life” เป็นกฎการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง CA Markov โดยได้ผลลัพธ์สุดท้ายแสดงเป็นแผนที่การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินที่ได้จากการคาดการณ์ภาพประกอบ เป็นตัวอย่างที่แสดงแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตที่ สังเคราะห์ได้จาก IDRISI โดยใช้ข้อมูลแผนที่ ในอดีตและปัจจุบันเป็นแผนที่ฐานข้อมูล ซึ่งเป็นงานวิจัย ของ Tong et al., (2555) เรื่อง “Predicting Plausible Impact of Set of Climate and Land Use Change Scenarios on Water Resource.”

2.3) ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN)

โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการแรงบันดาลใจจากการทำงานของสมองมนุษย์ โดยสามารถเรียนรู้จากข้อมูล และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ANN ถูกนำมาใช้ในงานด้านการพยากรณ์ การจำแนกประเภท และการวิเคราะห์



ข้อมูลเชิงซ้อน โดยเฉพาะในด้านภูมิสารสนเทศและการวางแผนพื้นที่เมือง

การนำ ANN มาประยุกต์ใช้ร่วมกับ CA ทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการเรียนรู้จากข้อมูลเชิงพื้นที่และเชิงเวลา เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตได้อย่างแม่นยำ

2.4) แบบจำลอง CA-ANN ในการคาดการณ์การใช้ที่ดิน

แบบจำลอง CA-ANN (Cellular Automata - Artificial Neural Network) เป็นการผสมระหว่างแบบจำลองเชิงพื้นที่และแบบจำลองการเรียนรู้จากข้อมูล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคต โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีพลวัตสูง เช่น พื้นที่เมืองหรือพื้นที่ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

หลักการทำงานของแบบจำลอง CA-ANN

ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่:

1. ส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ANN ทำหน้าที่เรียนรู้จากข้อมูลในอดีตเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน โดยใช้ตัวแปรอธิบาย เช่น ระยะทางจากถนนหลัก ระยะทางจากแหล่งน้ำ ความสูงของพื้นที่ ความหนาแน่นของประชากร และการใช้ที่ดินในอดีต เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเซลล์

2. ส่วนของเซลล์ลาร์อโตมาตา (CA) CA ใช้ผลลัพธ์จาก ANN ในการกำหนดกฎการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ โดยพิจารณาจากสถานะของเซลล์ข้างเคียงและความน่าจะเป็นที่ได้จาก ANN เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในเชิงพื้นที่

ข้อดีของแบบจำลอง CA-ANN ได้แก่:

- สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- มีความสามารถในการเรียนรู้จากข้อมูลจริง ทำให้สามารถปรับตัวตามบริบทของพื้นที่ได้

• สามารถนำไปใช้ในการวางแผนการใช้ที่ดินในอนาคต เช่น การจัดสรรพื้นที่เมือง การอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-ANN:

- งานวิจัยของ Silva and Clarke (2002) ได้ใช้แบบจำลอง CA-ANN เพื่อคาดการณ์การขยายตัวของเมืองในรัฐแคลิฟอร์เนีย โดยพบว่าแบบจำลองสามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง
- งานวิจัยในประเทศไทย เช่น สุภัทรา พงษ์ไพบูลย์ (2563) ได้ใช้แบบจำลอง CA-ANN เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในจังหวัดเชียงใหม่ โดยพบว่าการใช้แบบจำลองร่วมกันสามารถเพิ่มความแม่นยำในการคาดการณ์ได้มากกว่าการใช้แบบจำลองเดี่ยว

2.5) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ชูเดช โลศิริ (2564) ได้รวบรวมแนวคิดและประเภทของแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงปริมาณเชิงคุณภาพ และเชิงที่ตั้ง รวมถึงปัจจัยขับเคลื่อนทางชีวกายภาพ เศรษฐกิจ และสังคม ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เมืองในอนาคต

• Bhatta (2010) และ Verburg et al. (2004) ได้เสนอกรอบแนวคิดการจำลองการใช้ที่ดินที่คำนึงถึงปัจจัยทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ในการวางแผนพื้นที่อย่างยั่งยืน

• Silva and Wu (2012) ได้พัฒนาแบบจำลอง CA-ANN เพื่อคาดการณ์การขยายตัวของเมือง โดยพบว่าแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอดีต

3.ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้แบบจำลองเชิงพื้นที่ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อศึกษาพลวัตการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอดีต ปัจจุบัน และคาดการณ์แนวโน้มในอนาคต โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์ลาร์อโตมาตา (Cellular Automata - Artificial Neural Network: CA-ANN) ผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรม QGIS และเครื่องมือเสริมที่เกี่ยวข้อง

3.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาคือ จังหวัดพะเยา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาที่ศึกษา โดยพิจารณาจากข้อมูลการใช้ที่ดินย้อนหลัง

3.3 ขอบเขตการวิจัย

- ขอบเขตด้านพื้นที่: ครอบคลุมพื้นที่ จังหวัดพะเยาโดยมีพื้นที่ทั้งหมด 6,187.54 sq.km.

ลำดับที่	ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ	อักษรย่อ
1	พื้นที่เกษตร	Agricultural areas	A
2	พื้นที่ป่าไม้	Forest area	F
3	พื้นที่รกร้าง	Wasteland	M
4	พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	Communities and buildings	U
5	พื้นที่น้ำ	water area	W

- ขอบเขตด้านเวลา: ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงปี 2550-2558 และคาดการณ์อนาคตไปถึงปี 2600

• ขอบเขตด้านเนื้อหา: วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินประเภทหลัก เช่น พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชน และพื้นที่น้ำ

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- โปรแกรม QGIS สำหรับการประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่
- โปรแกรม MOLUSCE Plugin (Modules for Land Use Change Evaluation) สำหรับการสร้างแบบจำลอง CA-ANN
- ข้อมูลการใช้ที่ดินจากหน่วยงานราชการ
- โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและสร้างกราฟเพื่อมาวิเคราะห์

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

- รวบรวมข้อมูลการใช้ที่ดินจากหน่วยงานหรือเว็บดินออนไลน์
- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำเข้า QGIS ได้



2. การเตรียมข้อมูล

- ทำการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบ Raster

3. การสร้างแบบจำลอง CA-ANN

- ใช้ปลั๊กอิน MOLUSCE ใน QGIS เพื่อสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน
- บ่อนข้อมูลการใช้ที่ดินในอดีตและปัจจุบันเพื่อฝึกแบบจำลอง
- กำหนด Reference ข้อมูลดินในปี 2561 เพื่อสร้าง simulation ของปี 2561 เพื่อมาเปรียบค่าความสามารถสร้างแบบจำลองของปีอนาคตได้
- สร้างแบบจำลองการคาดการณ์การใช้ที่ดินในอนาคต

4. การประเมินผลแบบจำลอง

- เปรียบเทียบผลการคาดการณ์กับข้อมูลจริง
- คำนวณค่าความแม่นยำ เช่น % of correctness,

Kappa(Overall), Kappa(histogram), Kappa(location) โดย % of correctness ควรมีค่ามากกว่า 90%

Kappa(histogram), Kappa(location) ควรเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

- วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคต

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

- ใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง
- วิเคราะห์เชิงพื้นที่ด้วย QGIS เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดิน

ในรูปแบบแผนที่

- วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตโดยการแสดงในรูปแบบของกราฟ

ผลการศึกษา

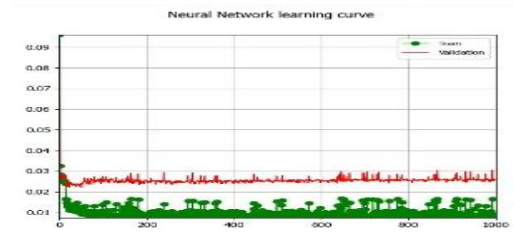
4.1 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินฐาน

การสร้างแผนที่การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตด้วย CA-ANN นั้น จำเป็นจะต้องมีแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอดีตที่มีการจัดทำแล้วโดยมีระยะเวลาห่างกันอย่างน้อย 1 ปี ในวิธีการศึกษานี้ ผู้ศึกษาเลือกแผนที่ฐาน 2 ชุดแผนที่ ชุดที่ 1 เป็นแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2550 และ 2558 โดยได้รับอนุเคราะห์ข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดิน สำหรับการแบ่งประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินฐานในการศึกษานี้ ได้จัดหมวดชนิดของการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นทั้งหมด 5 ประเภท แสดงในตารางที่ 1 และภาพประกอบ (a) และ (b) โดยแผนที่ทั้ง 2 ชุดนี้จะเป็นแผนที่ฐานสำหรับนำเข้าสู่ CA-ANN เพื่อให้แบบจำลองคำนวณแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินคาดการณ์ในอนาคต

ในขั้นตอนการประเมินความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจาก CA-ANN ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2561 ได้ถูกนำมาใช้เป็นแผนที่ฐานเพื่อตรวจสอบความแม่นยำ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2550

และ พ.ศ. 2558 จะเป็นแผนที่ฐานสำหรับการคำนวณแผนที่ในอนาคตปี พ.ศ. 2561 ด้วย CA-ANN การสอบเทียบความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจากแบบจำลองได้ยึดตามวิธีการประเมินโดยจะได้กราฟ Neural network learning curve มา

4.2 วิเคราะห์กราฟของ Neural network learning curve



ค่าความผิดพลาดของการฝึก (Train – สีเขียว)

- อยู่ในช่วงประมาณ 0.01–0.02 และค่อนข้างนิ่ง
- แสดงว่าโมเดลเรียนรู้ข้อมูลฝึกได้ดีมาก (ค่าความผิดพลาดต่ำ)

ค่าความผิดพลาดของการทดสอบ (Validation – สีแดง)

- อยู่ประมาณ 0.02–0.03
- เส้นไม่แกว่งมาก แสดงว่าผลการทดสอบมีความเสถียร
- การที่เส้น validation สูงกว่า train เล็กน้อยเป็นเรื่องปกติ

ลักษณะของกราฟทั้งสองเส้น

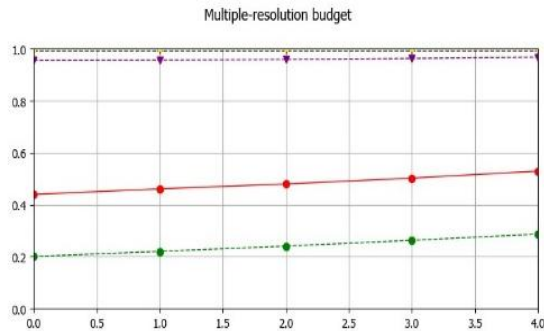
- ทั้งสองเส้นค่อนข้าง ขนานกันและไม่แยกห่างกันมาก
- หมายความว่า โมเดลไม่ได้ overfitting หรือ underfitting
- เส้นไม่มีแนวโน้มพุ่งขึ้น แสดงว่า การเรียนรู้มีเสถียรภาพ

ค่าสถิติของกราฟ

รายการ	ความหมาย	ค่าที่ได้	การตีความ
Learning Rate = 0.1	ความเร็วในการอัปเดตน้ำหนัก	ปานกลาง	ค่าพอเหมาะ ไม่สูงเกินไป
Hidden Layers = 10	จำนวนชั้นซ่อน	10	โมเดลมีความซับซ้อนพอสมควร
Momentum = 0.05	ช่วยให้การเรียนรู้ลื่นไหล	ต่ำ	ควบคุมการสั่นของ loss ได้ดี
Δ Overall Accuracy = -0.00369	การเปลี่ยนแปลงของความแม่นยำ	น้อยมาก	โมเดลคงที่
Min Validation Overall Error = 0.02196	ค่าความผิดพลาดต่ำสุดของชุดทดสอบ	ต่ำมาก	ดีมาก
Current Validation Kappa = 0.85991	ค่าความสอดคล้อง (Kappa)	~0.86	ดีมาก (>0.8 ถือว่า “ยอดเยี่ยม”)



4.3 ทำการวิเคราะห์กราฟ Multiple-resolution budget



ในขั้นตอนการประเมินความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจาก CA-ANN ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2561 ได้ถูกนำมาใช้เป็นแผนที่ฐานเพื่อตรวจสอบความแม่นยำ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2550 และ พ.ศ. 2558 จะเป็นแผนที่ฐานสำหรับการคำนวณแผนที่ในอนาคตปี พ.ศ. 2561 ด้วย CA-ANN การสอบเทียบความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจากแบบจำลองได้ยึดตามวิธีการประเมินด้วย 4 ค่าตัวแปรดังนี้

1. % of correctness
2. Kappa(Overall)
3. Kappa(histograme)
4. Kappa(location)

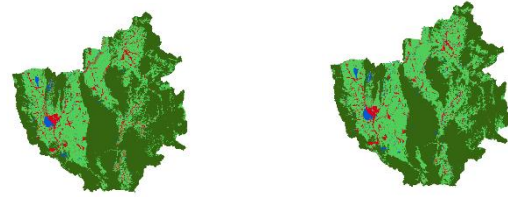
4.3.1 ค่าร้อยละของผลลัพธ์ที่ถูกต้อง (% of Correctness) ซึ่งจะเป็นการประเมินความแม่นยำของจุดภาพ (Pixel) ในแผนที่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและแผนที่จริง โดยจะแสดงค่าความแม่นยำที่เข้าใกล้ร้อยละ 100

4.3.2 ค่า Kappa(Overall), Kappa(histograme), Kappa(location) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่แผนที่ที่สร้างจากแบบจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกับแผนที่จริง

ผลการสอบเทียบความแม่นยำของแผนที่จำลองปี 2561 แสดงค่า Kappa(Overall), Kappa(histograme), Kappa(location) อยู่ระหว่าง 0.91-0.98 และค่าร้อยละของผลลัพธ์ที่ถูกต้องคือ 95.52 ดังแสดงในตาราง และภาพประกอบ (c) และ (d) เป็นการแสดงการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันระหว่างแผนที่จำลอง พ.ศ. 2561 และแผนที่จริง พ.ศ. 2561 แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณจาก CA-ANN มีความเหมาะสมในการสร้างแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

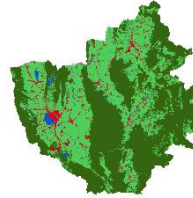
ตาราง

ชนิดของการประเมินความละเอียด	ผลลัพธ์
% of Correctness	95.52737
Kappa(overall)	0.92027
Kappa(histogram)	0.98649
kappa(location)	0.93288



a.แผนที่ปี2550(ใช้จริง)

b.แผนที่ปี2558(ใช้จริง)



c.แผนที่ปี2561(ใช้จริง)

d.แผนที่ปี2561(จำลอง)

ภาพประกอบ (c) และ (d) เป็นการแสดงการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันระหว่างแผนที่จำลอง พ.ศ. 2561 และแผนที่จริง พ.ศ. 2561 แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณจาก CA-ANN

4.4.แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

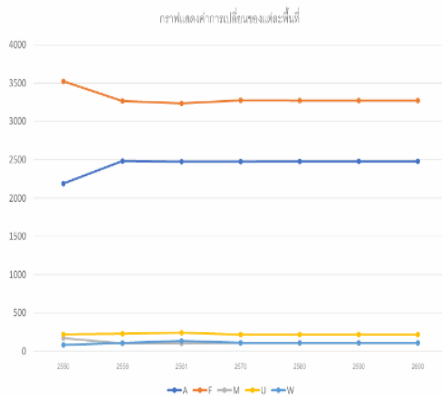
แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต การสร้างแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตด้วย CA-ANN ระหว่าง พ.ศ. 2550- 2600 จำนวน 50 แผนที่ โดยจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินทุก ๆ 1 ปีนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงในระดับรายวันในช่วงเวลาคาดการณ์ตลอด 50 ปีอนาคต เมื่อได้เปรียบเทียบพื้นที่ในแผนที่ พ.ศ. 2550 (ปีฐาน) กับพื้นที่ในอนาคตจากแบบจำลอง ดังแสดงในตารางต่อไปนี้ พบว่าพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่มี

ประเภท	ปีฐาน(พ.ศ.)		ปีคาดการณ์(พ.ศ.)			
	2550	2558	2561	2570	2580	2600
A	2188.98	2483.44	274.91	2476.83	2479.22	2479.84
F	3524.04	3266.87	3236.8	3275.81	3272.69	3272.67
M	170.96	101.23	10.25	108.24	106.82	106.84
U	220.71	227.92	21.66	216.78	218.51	218.55
W	82.85	108.08	134.24	109.88	110.3	110.24
sum	6187.54	6187.54	6187.54	6187.54	6187.54	6187.54



ตารางแสดงการใช้ที่ดิน
กราฟแสดงค่าการใช้ที่ดินในแต่ละปี

4.5 เส้นกราฟสีแดงคือพื้นที่ป่าไม้ พบว่าช่วงปี2550-2558 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งคาดการณ์ได้ว่าพื้นที่ป่าไม้ลดลงเป็นจำนวนมาก



และในป้อนาคตถึงปีจนปี2600พบว่ามีการเปลี่ยนของพื้นที่ป่าไม้เปลี่ยนแปลงไปไม่มากหรือแทบที่ไม่เปลี่ยน

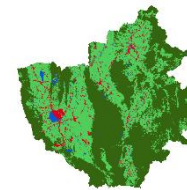
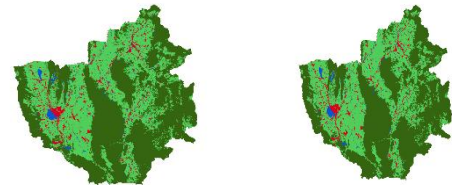
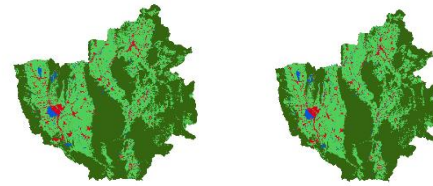
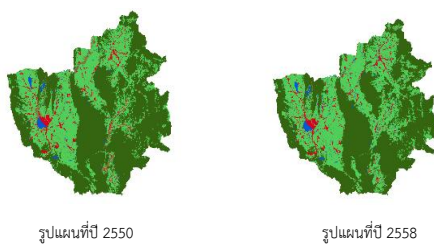
4.6 เส้นกราฟสีน้ำเงินคือพื้นที่การเกษตร พบว่าช่วงปี2550-2558มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับเส้นกราฟสีแดงที่ลดลงซึ่งในช่วงปี 2550-2558 มีพื้นที่การเกษตรมากขึ้นเป็นจำนวนมากคาดการณ์ได้ว่า ในช่วงปี2550-2558ของพื้นที่ป่าไม้ที่ลดลงเพราะพื้นที่การเกษตรเพิ่มขึ้น

4.7 เส้นกราฟสีเหลืองคือพื้นที่เมือง จากกราฟวิเคราะห์ได้ว่าพื้นที่เมืองตั้งแต่ปี2550-2600 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

4.8 เส้นกราฟสีเทาคือพื้นที่รกร้าง พบว่าช่วงปี2550-2558มีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากซึ่งพบว่าพื้นที่รกร้างมีพื้นที่น้อยลงและในปีถัดไปมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.9 เส้นกราฟสีฟ้าคือพื้นที่น้ำจากกราฟวิเคราะห์ได้ว่าพื้นที่น้ำตั้งแต่ปี2550-2600 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.10 ภาพแสดงการเปลี่ยนการใช้ที่ระหว่างปี2550-2600 ดังรูปต่อไปนี้



สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการใช้ที่ดินในจังหวัดพะเยาเพื่อสร้างแบบจำลองที่ดินในอนาคตโดยหลักการโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์ลาร์ออโตมาตา (Cellular Automata–Artificial Neural Network: CA-ANN)ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการจำลองและทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดินในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1ผลการเรียนรู้ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Learning Curve)

ขั้นตอนการประเมินความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจาก CA-ANN ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2561 ได้ถูกนำมาใช้เป็นแผนที่ฐานเพื่อตรวจสอบความแม่นยำ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2550 และ พ.ศ. 2558 จะเป็นแผนที่ฐานสำหรับการคำนวณแผนที่ในอนาคตปี พ.ศ. 2561 ด้วย CA-ANN การสอบเทียบความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างจากแบบจำลองโดยีตตามวิธีการประเมินโดยจะได้กราฟ Neural network ค่าความผิดพลาดของการฝึก (Train – สีเขียว)

- อยู่ในช่วงประมาณ 0.01–0.02 และค่อนข้างนิ่ง
- แสดงว่าโมเดลเรียนรู้ข้อมูลฝึกได้ดีมาก (ค่าความผิดพลาดต่ำ)

ค่าความผิดพลาดของการทดสอบ (Validation – สีแดง)

- อยู่ประมาณ 0.02–0.03
- เส้นไม่แกว่งมาก แสดงว่าผลการทดสอบมีความเสถียร



- การที่เส้น validation สูงกว่า train เล็กน้อยเป็นเรื่องปกติ ลักษณะของกราฟทั้งสองเส้น
- ทั้งสองเส้นค่อนข้างขนานกันและไม่แยกห่างกันมากหมายความว่าโมเดลไม่ได้ overfitting หรือ underfitting
- เส้นไม่มีแนวโน้มพุ่งขึ้น แสดงว่า การเรียนรู้มีเสถียรภาพ จากการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้จากการเรียนรู้ที่มีเสถียรภาพที่สูงและมีความผิดพลาดน้อย

5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล (Multiple-Resolution Budget)

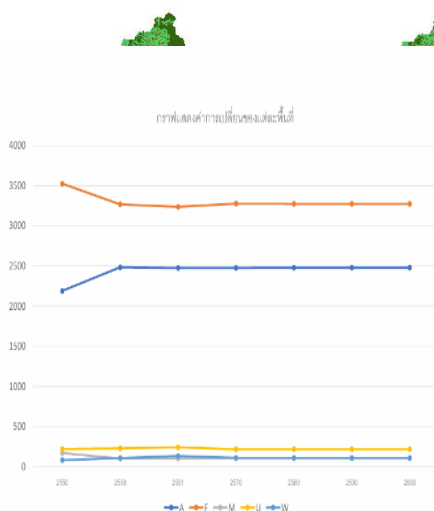
ผลการสอบเทียบความแม่นยำของแผนที่จำลองปี 2561 แสดงค่า Kappa(Overall), Kappa(histogram), Kappa(location) อยู่ระหว่าง 0.91-0.98 และค่าร้อยละของผลลัพธ์ที่ถูกต้องคือ 95.52 ดังแสดงในตาราง

ชนิดของการประเมินความละเอียด	ผลลัพธ์
% of Correctness	95.52737
Kappa(overall)	0.92027
Kappa(histogram)	0.98649
kappa(location)	0.93288

และภาพประกอบ (c) และ (d) เป็นการแสดงการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันระหว่างแผนที่จำลอง พ.ศ. 2561 และแผนที่จริง พ.ศ. 2561 แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณจาก CA-ANN มีความเหมาะสมในการสร้างแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

a. แผนที่ปี 2561 (ใช้จริง) b. แผนที่ปี 2561 (จำลอง)

5.3 การคาดการณ์การใช้ที่ดินใน ปี 2550-2600 ว่าเปลี่ยนแปลงมากน้อย



เพียงใดโดยแสดงดังภาพกราฟดังนี้

อธิบายแนวโน้มของเส้นกราฟไดดังนี้ คือ

1. เส้นกราฟสีแดงคือพื้นที่ป่าไม้ พบว่าช่วงปี 2550-2558 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งคาดการณ์ได้ว่าพื้นที่ป่าไม้ลดลงเป็นจำนวนมาก และในปียอดถัดๆ ไปจนถึงปี 2600 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ป่าไม้เปลี่ยนแปลงไปไม่มากหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง
2. เส้นกราฟสีน้ำเงินคือพื้นที่การเกษตร พบว่าช่วงปี 2550-2558 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับเส้นกราฟสีแดงที่ลดลงซึ่งในช่วงปี 2550-2558 มีพื้นที่การเกษตรมากขึ้นเป็นจำนวนมากคาดการณ์ได้ว่าในช่วงปี 2550-2558 ของพื้นที่ป่าไม้ที่ลดลงเพราะพื้นที่การเกษตรเพิ่มขึ้น
3. เส้นกราฟสีเหลืองคือพื้นที่เมือง จากการวิเคราะห์ได้ว่าพื้นที่เมืองตั้งแต่ปี 2550-2600 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย
4. เส้นกราฟสีเทาคือพื้นที่รกร้าง พบว่าช่วงปี 2550-2558 มีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากซึ่งพบว่าพื้นที่รกร้างมีพื้นที่น้อยลงและในปียอดถัดๆ ไปมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง
5. เส้นกราฟสีฟ้าคือพื้นที่น้ำจากการวิเคราะห์ได้ว่าพื้นที่น้ำตั้งแต่ปี 2550-2600 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

แหล่งอ้างอิง

- [1] Jankowski, P. (2538). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. International Journal of Geographical Information Systems, 9
- [2] Mundia, C.N., & Aniya, M. (2549). Dynamics of land use/cover changes and modelling urban growth of Nairobi City using cellular automata and geographical information systems. Dissertation for PhD Program in Integrative Environmental Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Japan
- [3] Kamusoko, C. (2550). Modelling land use/cover changes in the Bindura District, Zimbabwe. Dissertation for PhD Program in Integrative Environmental Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Japan.
- [4] ชุตินันท์ ร่มพงษ์. (2551). การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน โดยใช้แบบจำลอง CA-MARKOV บริเวณลุ่มน้ำแม่ข่า จังหวัดเชียงใหม่. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2564, จาก <http://dric.nrct.go.th/Search/SearchDetail/219959>
- [5] Nur Aisyah Mohd Baharudin & Noradila Rusli. (2560). Forecasting Spatial Pattern of Land Use and Land Cover Changes Using Cellular Automata. Geomatics Research Innovation Competition. Retrieved from
- [6] สุธี อนันต์สุขวงศ์, ดิชาพงษ์ ภูมิเลิศศักดิ์, ดิชาพงษ์ ตัดศิริพร. 2560. การประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบซับซ้อน (Complex System) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในภาคตะวันออกของประเทศไทย. วารสารวิชาการการวางแผนภาคและเมือง.



https://www.researchgate.net/publication/327200726_Forecasting_Spatial_Pattern_of_Land_Use_and_Land_Cover_Changes_Using_Cellular_Automata

[7] จิตรกรณ สุมทร. (2561). การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตอำเภอเมืองนครปฐมจังหวัดนครปฐม. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn UniversitySilpakorn University. สืบค้นเมื่อวันที่ 19 มีนาคม 2564, จาก <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/135014>

[8] Chaipat ncm. (2562). Download Sentinel 2 high-resolution optical images with Python. Retrieved from <https://medium.com/geo-datascience/download-sentinel-2-high-resolution-optical-images-with-python-2581c6fec0e>

[9] Ender Buğday & Seda Erkan Buğday. (2562). Modeling and Simulating Land use/cover Change Using Artificial Neural Network From Remotely Sensing Data. Retrieved from <https://www.scielo.br/j/cerne/a/CTrT6xJmC6XqFDzbzhJJSHT9q/?lang=en>

[10] นิพนธ์ วิเชียรน้อยมร. (ม.ป.ป.). การผังเมืองและการใช้ประโยชน์ที่ดินในประเทศไทย. วารสารกรมโยธาธิการและผังเมือง. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2564, จาก https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/urban_planning_land_use.pdf

[11] ชีรเวทย์ ลิ้มโกลเลิศศักดิ์. 2557. การคาดการณ์การใช้ที่ดินจังหวัดตากของ พ.ศ. 2567 ด้วยแบบจำลอง CA-MARKOV. วารสารศิลปศาสตร์มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ปีที่5.

[12] ALGhaliya Nasser Mohammed AL-Rubkhi. (n.d.). Land Use Change Analysis and Modeling Using Open Source (QGIS) Case Study: Boasher Willayat. Retrieved from <https://www.researchgate.net/profile/ALghaliya->

[13] Asia Air Survey & Next GIS. (n.d.). *Quick Help Modules for Land Use Change Evaluation*. Retrieved from <https://www.coursehero.com/file/43207182/QuickHelppdf/>

[14] Matteo Gismondi et al. (n.d.). MOLUSCE an open source land use change analyst for QGIS. Retrieved from https://www.qjiko.co.jp/download/pdf_tf2014/p6263.pdf



โครงการวิศวกรรมโยธา ประจำปี 2568

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

Civil Engineering Project 2025

Bachelor of Engineering Program in Civil Engineering



การจำลองผลกระทบที่เกิดจากเขื่อนพังทลายต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัย น้ำท่วมฉับพลัน

Simulation of Dam Break Impacts on Critical Infrastructure in Flash Flood Risk Zones

ยศภัทร พรหมพิมพ์¹, สุธารณ์ เครืออ่อนเรือน¹, และ อนุชา เผ่าทอง¹

¹ นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย จ.พะเยา

บทคัดย่อ

การพังทลายของเขื่อนเป็นภัยพิบัติที่มีความรุนแรงสูงและเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ท้ายน้ำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายของเขื่อนกิ่วลม จังหวัดลำปาง โดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS 2D เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นน้ำท่วมฉับพลันที่เกิดขึ้น และประเมินผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยง

ข้อมูลที่ใช้ประกอบการจำลอง ได้แก่ ข้อมูลภูมิประเทศ (DEM) ข้อมูลโครงสร้างของเขื่อน และข้อมูลโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน สะพาน และอาคารสาธารณะ โดยจำลองสถานการณ์การพังทลายและวิเคราะห์ผลลัพธ์ในเชิงพื้นที่ ได้แก่ ความลึก ความเร็ว และเวลาที่น้ำเดินทางถึงจุดต่าง ๆ ในพื้นที่ท้ายน้ำ

ผลการจำลองพบว่า คลื่นน้ำจากการพังทลายของเขื่อนสามารถไหลเข้าสู่พื้นที่ชุมชนได้ภายในเวลาไม่เกิน 0-2 วัน-ชั่วโมง โดยมีระดับความลึกมากกว่า 4 เมตรในหลายจุด และความเร็วเฉลี่ยของน้ำอยู่ในช่วง 2.4 เมตรต่อวินาที โครงสร้างพื้นฐานจำนวนมากตั้งอยู่ในแนวการไหลของคลื่นน้ำและมีความเสี่ยงต่อความเสียหายอย่างรุนแรง จากผลการวิเคราะห์สามารถจัดลำดับระดับความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่ และนำไปใช้ประกอบการวางแผนรับมือภัยพิบัติ การวางแผนอพยพ และการออกแบบแนวป้องกันในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เขื่อนพังทลาย, โครงสร้างพื้นฐาน, น้ำท่วมฉับพลัน, HEC-RAS, เขื่อนกิ่วลม

Abstract

Dam failure is a high-impact and rapid-onset disaster that can cause widespread damage to lives, property, and especially critical infrastructure in downstream areas. This study aims to simulate a dam break scenario of the Kiew Lom Dam in Lampang Province, Thailand, using the two-dimensional HEC-RAS model. The objective is to analyze the characteristics of flash flood

waves and assess the impacts on infrastructure located in flood-prone zones.

The simulation incorporates various datasets including high-resolution digital elevation models (DEM), structural data of the dam, and geospatial data of infrastructure such as roads, bridges, and public buildings. The dam break scenario was modeled and the results were analyzed in terms of flood depth, flow velocity, and flood arrival time.

The simulation results show that flood waves can reach downstream communities within 0-2 day-hr, with water depths exceeding 4 meters and average flow velocities between 2.4 to meters per second. Many critical infrastructure elements are located directly in the flood path and are at high risk of severe damage. The risk levels of each area were classified and visualized, providing essential data for emergency planning, evacuation strategies, and future mitigation design.

Keywords: Dam Break, Infrastructure, Flash Flood, HEC-RAS, Kiew Lom Dam

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีระบบทรัพยากรน้ำที่หลากหลาย ทั้งแม่น้ำลำธาร และอ่างเก็บน้ำ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชาชน การเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และการผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการก่อสร้างเขื่อนและอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ในหลายพื้นที่ เพื่อรองรับการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตาม เขื่อนซึ่งแม้จะมีความแข็งแรงเพียงใด ก็ยังคงมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายหรือ พังทลาย (Dam Break) ได้ในบางสถานการณ์ เช่น ฝนตกหนักเกินขนาดความจุ, ความล้มเหลวของวัสดุโครงสร้าง, การกัดเซาะภายในเขื่อน, หรือภัยธรรมชาติรุนแรง เช่น แผ่นดินไหว หรือดินถล่ม

เหตุการณ์เขื่อนพังทลายแม้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่หากเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบรุนแรง โดยเฉพาะต่อพื้นที่ท้ายน้ำที่อยู่ใกล้เขื่อน ซึ่งจะถูก



กระทบจาก “คลื่นน้ำหลาก” หรือ “flood wave” ที่มีความเร็วและความลึกสูงในระยะเวลาอันสั้น เรียกว่า น้ำท่วมฉับพลัน (Flash Flood) ซึ่งสร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ (Critical Infrastructure) เช่น ถนน สะพาน อาคารราชการ ระบบสาธารณูปโภค และโครงข่ายไฟฟ้า โครงสร้างเหล่านี้เป็นหัวใจสำคัญในการดำเนินชีวิตและระบบการบริหารจัดการภัยพิบัติ หากได้รับผลกระทบจากคลื่นน้ำ อาจทำให้การช่วยเหลือผู้ประสบภัยเป็นไปอย่างยากลำบาก

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การศึกษาผลกระทบจากการพังทลายของเขื่อนเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะการนำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชลศาสตร์ เช่น HEC-RAS มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์เขื่อนพัง เพื่อคาดการณ์การไหลของน้ำหลังพังทลาย และวิเคราะห์ผลกระทบต่อพื้นที่ downstream ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ การจำลองเช่นนี้สามารถใช้ประกอบการวางแผนเตือนภัย การออกแบบระบบป้องกัน และการเตรียมความพร้อมสำหรับเหตุการณ์ไม่คาดฝันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เขื่อนก๊วลม เป็นเขื่อนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Gravity Dam ตั้งอยู่บนแม่น้ำวังในจังหวัดลำปาง มีบทบาทในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังน้ำและควบคุมปริมาณน้ำในลุ่มน้ำวัง ด้วยทำเลที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภูเขาและมีชุมชนขนาดใหญ่ downstream เช่น เขตเมืองลำปาง เขื่อนก๊วลมจึงถือเป็นหนึ่งในเขื่อนที่มีความสำคัญและมีผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานของจังหวัดอย่างมาก หากเกิดกรณีเขื่อนพังทลาย อาจก่อให้เกิดคลื่นน้ำที่เคลื่อนตัวเข้าสู่พื้นที่ชุมชนภายในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งมีทั้งถนนสายหลัก โรงเรียน โรงพยาบาล อาคารราชการ และระบบไฟฟ้า ที่มีความเปราะบางต่อความเสียหาย

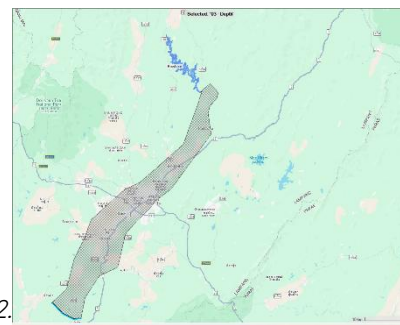
ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อ จำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายของเขื่อนก๊วลม และประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมฉับพลัน โดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติสำหรับการจำลองสถานการณ์น้ำท่วมอย่างละเอียด งานวิจัยนี้จะมีส่วนช่วยสนับสนุนหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กรมชลประทาน และหน่วยงานด้านการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย ในการวางแผนการเตือนภัยและการจัดการความเสี่ยงจากเหตุการณ์เขื่อนแตกในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research) โดยใช้การจำลองสถานการณ์น้ำท่วมจากการพังทลายของเขื่อน เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมฉับพลัน โดยเน้นการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขด้านชลศาสตร์ ได้แก่ โปรแกรม HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) เพื่อสร้างแบบจำลองน้ำหลาก (Flood Routing) จากการพังทลายของเขื่อนก๊วลม และประเมินความเสี่ยงต่อโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่พื้นที่ท้ายน้ำ (downstream)

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาคือบริเวณพื้นที่ท้ายน้ำ ของ เขื่อนก๊วลม จังหวัดลำปาง ซึ่งตั้งอยู่บนแม่น้ำวัง โดยครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่เขื่อนถึงเขตเมืองลำปาง และชุมชนริมแม่น้ำที่อาจได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมฉับพลัน ภูมิประเทศของพื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นหุบเขาแคบ มีความลาดชัน และมีโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนนสายหลัก อาคารราชการ โรงเรียน และโรงพยาบาล กระจายอยู่ตลอดแนวลำน้ำ



การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ต้องอาศัยข้อมูลที่หลากหลาย ทั้งข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลโครงสร้างของเขื่อน ข้อมูลลำน้ำ รวมถึงข้อมูลด้านโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ศึกษาที่จะนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลจากการจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลาย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพจริงมากที่สุด การเลือกใช้ข้อมูลจึงต้องมีความละเอียดและความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะข้อมูลภูมิประเทศซึ่งเป็นฐานหลักในการสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำ

ตาราง 1 ข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ประเภทข้อมูล	รายละเอียด
ข้อมูลภูมิประเทศ	DEM (Digital Elevation Model) ความละเอียด 30 เมตร จาก GISTDA หรือแหล่งอื่น
ข้อมูลลำน้ำ	ขนาดตลิ่งลำน้ำ, แนวทางไหล, ความผิด (Manning's n), ความยาวช่วงน้ำไหล
ข้อมูลเขื่อน	ความสูงเขื่อน, ความยาวสันเขื่อน, ความจุอ่าง, พิกัดเขื่อน, พารามิเตอร์การพังทลาย
ข้อมูลโครงสร้างพื้นฐาน	ถนน, สะพาน, อาคารสำคัญ จาก shapefile หรือภาพถ่ายดาวเทียม
Boundary Conditions	ระดับน้ำต้นน้ำ (Upstream) และ downstream boundary เช่น normal depth หรือ stage

2.3 เครื่องมือที่ใช้

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพจริง จำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมทั้งในด้านการสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์



การประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่ และการแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เครื่องมือที่ใช้ต้องมีความสามารถในการจำลองการไหลของน้ำทั้งในรูปแบบเชิงเวลาและพื้นที่ (spatiotemporal analysis) รวมถึงสามารถนำข้อมูลจากแบบจำลองมาเชื่อมโยงกับตำแหน่งของโครงสร้างพื้นฐานที่อาจได้รับผลกระทบ เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือทางซอฟต์แวร์ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ได้แก่ โปรแกรม HEC-RAS ซึ่งพัฒนาโดยหน่วยงาน USACE สำหรับการจำลองการไหลของน้ำในลำน้ำและ floodplain โดยเฉพาะในกรณีเขื่อนพังทลาย ประกอบกับโปรแกรมด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อจัดการและแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ ซึ่งช่วยสนับสนุนการวิเคราะห์เชิงลึกได้อย่างครบถ้วนซึ่งมีรายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยดังนี้

2.3.1 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)

โปรแกรมจำลองการไหลของน้ำที่พัฒนาโดยสำนักวิศวกรรมของกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา (USACE) ใช้สำหรับจำลองกระบวนการไหลในแม่น้ำและ floodplain ทั้งแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

- 1) ในงานวิจัยนี้ ใช้ HEC-RAS 2D สำหรับจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลาย (dam break)
- 2) สามารถกำหนดรูปแบบการพังทลาย เช่น overtopping หรือ piping
- 3) ประมวลผลลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นน้ำในเชิงเวลาและพื้นที่ เช่น ความลึก ความเร็ว และเวลาที่น้ำเดินทางถึงจุดต่าง ๆ
- 4) รองรับการเชื่อมโยงกับระบบ GIS ผ่าน HEC-RAS Mapper

2.3.2 RAS Mapper

ส่วนเสริมในตัวของ HEC-RAS ที่ใช้สำหรับการจัดการข้อมูล GIS และการแสดงผลลักษณะของการจำลองในเชิงพื้นที่

- 1) ใช้สร้าง 2D Flow Area จาก DEM
- 2) แสดงผลลัพธ์ เช่น flood depth map, arrival time map, velocity distribution
- 3) สามารถ export ข้อมูลในรูปแบบ raster (GeoTIFF) เพื่อนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมใน QGIS

2.3.3 QGIS (Quantum GIS)

โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบเปิด (Open Source GIS) ที่ใช้ในการจัดการ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่

- 1) ใช้สำหรับวิเคราะห์และจัดเตรียมข้อมูล DEM, shapefile ของโครงสร้างพื้นฐาน (ถนน, สะพาน, อาคาร)
- 2) นำเข้าและวิเคราะห์ผลจาก HEC-RAS ที่ export ออกมา เช่น flood extent และเปรียบเทียบกับตำแหน่งโครงสร้าง
- 3) ใช้ทำ thematic mapping และตารางเปรียบเทียบผลกระทบ

2.3.4 Google Earth Engine หรือ ภาพถ่ายดาวเทียม

ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ศึกษา

- 1) ช่วยยืนยันข้อมูลพิกัดจาก GIS

- 2) ใช้ในการจัดทำแผนที่เบื้องต้นเพื่อสื่อสารผลกระทบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

- 3) เสริมความถูกต้องของตำแหน่งเขื่อน, แนวลำน้ำ, และแนวชุมชน

2.3.5 Microsoft Excel

ใช้จัดการข้อมูลตัวเลข เช่น hydrograph, ตารางพารามิเตอร์การพังทลาย, ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

- 1) จัดเก็บและจัดรูปแบบข้อมูลนำเข้าให้เหมาะสมกับ HEC-RAS
- 2) วิเคราะห์และจัดตารางเปรียบเทียบผลการจำลอง เช่น ความลึก/ความเร็วที่โครงสร้างแต่ละแห่งได้รับ

2.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างเป็นระบบ จำเป็นต้องจัดกระบวนการวิจัยให้อยู่ในลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน โดยเริ่มตั้งแต่การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน การเตรียมข้อมูลเชิงพื้นที่ การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลาย การจำลองการไหลของน้ำ และการวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ศึกษา

กระบวนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้จึงถูกออกแบบให้ครอบคลุมทั้งด้านการเตรียมข้อมูล การประมวลผล และการแปลผลลัพธ์ โดยอาศัยเครื่องมือด้านแบบจำลองทางชลศาสตร์และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ร่วมกัน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากเหตุการณ์เขื่อนพังทลายได้อย่างครอบคลุมทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา

2.4.1 การเก็บและเตรียมข้อมูล

- 1) รวบรวม DEM และข้อมูลลำน้ำจากแหล่งที่เชื่อถือได้
- 2) รวบรวมข้อมูลเขื่อนกั้นจากกรมชลประทานหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
- 3) รวบรวมข้อมูลตำแหน่งโครงสร้างพื้นฐานจาก GIS และตรวจสอบความถูกต้องกับภาพถ่ายดาวเทียม

2.4.2 การเตรียมแบบจำลองใน HEC-RAS

- 1) สร้าง geometry ของลำน้ำและพื้นที่ท่วมในโปรแกรม HEC-RAS
- 2) กำหนด 2D Flow Area ครอบคลุมพื้นที่ downstream จากเขื่อน
- 3) ป้อนพารามิเตอร์ของเขื่อน เช่น crest elevation, breach location, breach width, breach formation time ฯลฯ

2.4.3 การจำลองสถานการณ์ (Simulation)

- 1) สร้างแผนการจำลองน้ำหลังจากการพังทลาย โดยใช้ unsteady flow simulation
- 2) ตั้งเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการจำลอง พร้อมกำหนด timestep ที่เหมาะสม
- 3) ดำเนินการ run แบบจำลองและเก็บผลลัพธ์

2.4.4 การวิเคราะห์ผลกระทบ

- 1) วิเคราะห์ผลลัพธ์ ได้แก่ ระดับความลึกของน้ำ ความเร็ว เวลาเดินทางของคลื่นน้ำ



2) นำผลลัพธ์ overlay กับข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานเพื่อตรวจสอบจุดที่ได้รับผลกระทบ

3) จัดลำดับความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐานตามเกณฑ์ เช่น ความลึก > 1.5 ม., ความเร็ว > 1.0 m/s

2.4.5 การสรุปผลและให้ข้อเสนอแนะ

1) สรุปพื้นที่และโครงสร้างที่มีความเสี่ยงสูง

2) เสนอแนวทางป้องกัน บรรเทาผลกระทบ และใช้ข้อมูลจำลองเพื่อวางแผนเตือนภัย

2.5 เกณฑ์การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อโครงสร้างพื้นฐาน

หลังจากได้ผลการจำลองสถานการณ์การพังทลายของเขื่อนกั้นลุ่มโดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อประเมินระดับความเสี่ยงที่โครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ศึกษาอาจได้รับจากเหตุการณ์น้ำท่วมฉับพลัน การวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุระดับความเปราะบาง (vulnerability) และความรุนแรงของผลกระทบ (impact severity) ที่แต่ละโครงสร้างอาจเผชิญ ซึ่งจะช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ควรได้รับการป้องกันหรือบรรเทาผลกระทบเป็นลำดับต้น ๆ

ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงในครั้งนี้ ได้กำหนดเกณฑ์การประเมินขึ้นจากปัจจัยหลัก 3 ด้าน ได้แก่ ความลึกของน้ำท่วม (Flood Depth), ความเร็วของกระแสน้ำ (Flow Velocity) และ ระยะเวลาที่น้ำเดินทางถึงพื้นที่นั้น (Flood Arrival Time) โดยพิจารณาร่วมกันเป็นเกณฑ์เชิงปริมาณเพื่อตัดสินระดับความเสี่ยง ซึ่งสามารถแสดงผลได้ทั้งในรูปแบบตารางและแผนที่เชิงพื้นที่

ตาราง 2 เกณฑ์การวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อโครงสร้างพื้นฐาน

เกณฑ์	ความเสี่ยงต่ำ	ความเสี่ยงปานกลาง	ความเสี่ยงสูง
ความลึกน้ำ (m)	< 0.5	0.5-1.5	> 1.5
ความเร็วกระแสน้ำ (m/s)	< 0.3	0.3-1.0	> 1.0
เวลาเดินทางของคลื่น (นาที)	> 120	60-120	< 60

3. ผลการวิจัย (Results)

จากการจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายของเขื่อนกั้นลุ่มโดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS 2D พบว่า การเกิดพังทลาย ที่สันเขื่อนกั้นลุ่มทำให้เกิดคลื่นน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้าสู่พื้นที่ท้ายน้ำ โดยผลการจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ใน 3 มิติหลัก ได้แก่ ความลึกของน้ำ (Flood Depth), ความเร็วของกระแสน้ำ (Flow Velocity) และ ระยะเวลาที่น้ำเดินทางถึงพื้นที่เป้าหมาย (Arrival Time) รวมถึงผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยง

3.1 การกระจายของความเสี่ยงของน้ำ (Flood Depth)

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหลังจากเขื่อนพังทลาย น้ำจะไหลเข้าสู่พื้นที่ downstream อย่างรวดเร็ว โดยบริเวณที่อยู่ใกล้กับจุดพังทลาย มีระดับความลึกเฉลี่ยสูงถึง 2 - 15 เมตร และลดลงเหลือ 0.01 - 4 เมตร เมื่อเข้าสู่พื้นที่ลุ่มเมืองลำปางตอนใน

1) พื้นที่ลุ่มริมแม่น้ำวังในเขตตำบลบ้านแลงและตำบลบุญนาคนพัฒนา มีระดับน้ำท่วมเกิน 11.32 เมตร

2) พื้นที่ถนนสายหลัก เช่น ถนนพหลโยธิน หมายเลข 1335 และถนนเลียบแม่น้ำบางช่วงถูกน้ำท่วมลึกกว่า 6 เมตร

3) บริเวณอนามัยชุมชน วัด และ โรงเรียนหลายแห่งตั้งอยู่ในพื้นที่ต่ำและมีความเสี่ยงสูงต่อการท่วมขัง

3.2 ความเร็วของกระแสน้ำ (Flow Velocity)

คลื่นน้ำที่เกิดขึ้นจากพังทลาย มีความเร็วสูงสุดที่บริเวณใกล้จุดพังทลายของเขื่อน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.4 - 2.7 เมตร/วินาที ซึ่งถือว่าเพียงพอที่จะสร้างความเสียหายแก่โครงสร้างอาคารและยานพาหนะ

1) เมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนเข้าสู่พื้นที่ราบ ความเร็วลดลงเหลือ 0.64 - 1 เมตร/วินาที

2) บริเวณคอสะพานหรือทางลอดมีการเร่งความเร็วของกระแสน้ำจากการบีบตัวของช่องทางไหล

3.3 ระยะเวลาที่น้ำเดินทางถึงพื้นที่เป้าหมาย (Flood Arrival Time)

1) น้ำเดินทางถึงพื้นที่ระยะทาง 1.5 กม. จากเขื่อนภายใน 1 ชั่วโมง 20 นาที หลังพังทลาย

2) พื้นที่ตัวเมืองลำปางซึ่งอยู่ห่างประมาณ 38 กม. ใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง 20 นาที ก่อนที่คลื่นน้ำจะเข้าถึง

3) ชุมชนที่อยู่ใกล้ริมตลิ่งมีเวลาในการเตรียมตัวน้อยกว่า 1 ชั่วโมง 10 นาที ระดับมวลน้ำสูงสุดประมาณ 11.36 เมตร ซึ่งนับว่าอยู่ในเกณฑ์น้ำท่วมฉับพลัน

3.4 ผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐาน

จากการ overlay ผลจำลองลงบนข้อมูลโครงสร้างพื้นฐาน พบว่า

1) โครงสร้างพื้นฐานสำคัญจำนวนมากตั้งอยู่ในพื้นที่ระดับความลึกเกิน 6.91 เมตร และได้รับผลกระทบโดยตรงจากคลื่นน้ำ

2) สะพานข้ามแม่น้ำวัง 20 แห่ง และถนนสายหลัก 8 สายมีแนวโน้มที่จะถูกตัดขาดชั่วคราวจากกระแส

3) อาคารสาธารณะ เช่น ศูนย์อนามัย, โรงเรียน, และสถานีไฟฟ้า ย่อย อยู่ในพื้นที่ที่มีความลึกเกิน 3 เมตร และมีความเร็วของน้ำเกิน 0.76 เมตร/วินาที

3.5 การจัดระดับความเสี่ยง

จากการประเมินตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (ความลึก > 1.5 ม., ความเร็ว > 1.0 ม./วินาที, เวลาเดินทาง < 30 นาที) สามารถจัดระดับความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐานได้ดังนี้



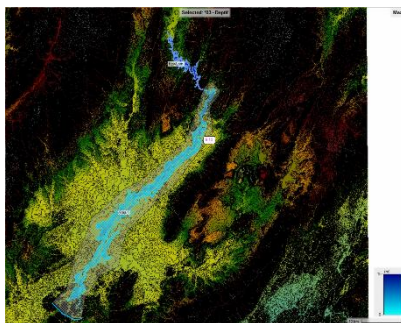
ตาราง 3 การจัดระดับความเสี่ยง

ประเภทโครงสร้าง	จำนวนที่ได้รับผลกระทบ	ระดับความเสี่ยงสูง
ถนนสายหลัก	8 สาย	2 สาย (25%)
สะพานข้ามน้ำ	20 แห่ง	4 แห่ง (20%)
อาคารสาธารณะ	34 แห่ง	17 แห่ง (50%)

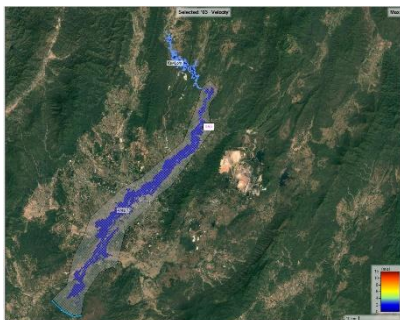
3.6 แผนที่ผลลัพธ์

เพื่อให้การวิเคราะห์ผลกระทบจากเหตุการณ์เขื่อนพังทลายมีความชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำผลลัพธ์จากการจำลองแบบจำลอง HEC-RAS มาประมวลผลและแสดงผลในรูปแบบของแผนที่เชิงพื้นที่ (Spatial Maps) โดยอาศัยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และเครื่องมือ RAS Mapper ซึ่งสามารถแสดงค่าทางชลศาสตร์ในรูปแบบภาพได้อย่างครอบคลุม ทั้งในด้านความลึกของน้ำ ความเร็วของการไหล และระยะเวลาที่คลื่นน้ำเดินทางถึงพื้นที่เป้าหมาย

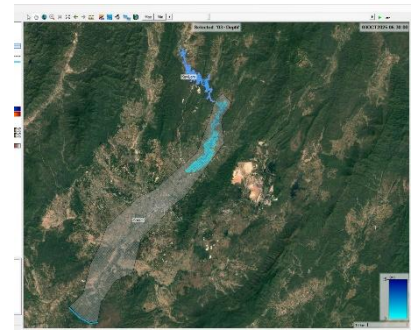
แผนที่ผลลัพธ์เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าใจลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นน้ำจากเขื่อนแตกในเชิงเวลาและพื้นที่ ทำให้สามารถวางแผนการตอบสนอง การอพยพ และการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



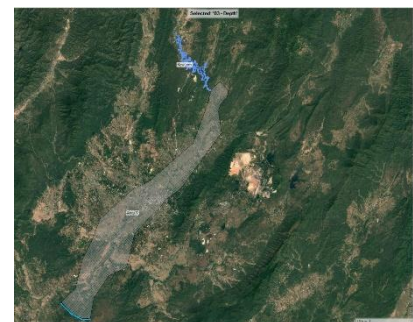
รูป 2 แผนที่การกระจายระดับน้ำท่วม (Flood Depth Map)



รูป 3 แผนที่ความเร็วของน้ำ (Velocity Map)



รูป 4 แผนที่เวลาน้ำเดินทางถึง (Arrival Time Map)



รูป 5 แผนที่แสดงโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยง

4. อภิปรายผล (Discussion)

จากผลการจำลองสถานการณ์การพังทลายของเขื่อนกัวลมโดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS 2D พบว่าคลื่นน้ำที่เกิดขึ้นจากการพังทลาย มีลักษณะของ น้ำท่วมฉับพลัน (flash flood) ที่มีความเร็วและความลึกสูง โดยเฉพาะในพื้นที่ใกล้เขื่อนและพื้นที่ลุ่มริมแม่น้ำวัง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศที่ลาดเอียงและมีความต่อเนื่องของลำน้ำอย่างชัดเจน

4.1 ความรุนแรงของคลื่นน้ำท่วม

ค่าความลึกและความเร็วของน้ำที่ได้จากการจำลองแสดงถึงศักยภาพของความเสียหายอย่างรุนแรงต่อสิ่งปลูกสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่อยู่ในระยะ 1.5 กิโลเมตรจากเขื่อน ซึ่งคลื่นน้ำสามารถเดินทางถึงได้ภายในเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง 10 นาที ส่งผลให้ เวลาในการเตรียมตัวของชุมชนมีน้อยมาก ถือเป็นสถานการณ์วิกฤตที่จำเป็นต้องมีระบบเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ความเร็วของน้ำที่สูงกว่า 3.81 เมตรต่อวินาทีในบางช่วง ถือเป็นระดับที่สามารถพัดพาสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก รถยนต์ หรือแม้แต่คนเดินเท้าได้อย่างง่ายดาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดยแบบจำลอง HEC-RAS 2D ที่ระบุว่าความเร็วเกิน 1 m/s เริ่มก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้าง



4.2 ความเปราะบางของโครงสร้างพื้นฐาน

การวิเคราะห์ตำแหน่งของโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน สะพาน และอาคารราชการ พบว่ามีจำนวนมากตั้งอยู่ในพื้นที่ floodplain ที่มีทั้งระดับความลึกและความเร็วของน้ำอยู่ในระดับ “เสี่ยงสูง” โดยเฉพาะในตัวเมืองลำปางซึ่งเป็นจุดรวมของโครงสร้างพื้นฐานสำคัญหลายแห่ง

การที่สะพานและถนนถูกตัดขาดจากกระแสน้ำย่อมส่งผลกระทบต่อ การอพยพ การลำเลียงสิ่งของช่วยเหลือ และการปฏิบัติงานของหน่วยกู้ภัย ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งในการวางแผนรับมือ

4.3 การประเมินเชิงพื้นที่และการวิเคราะห์ความเสี่ยง

การจำลองด้วย HEC-RAS 2D ร่วมกับการประเมินตามเกณฑ์ความเสี่ยงช่วยให้สามารถ จัดลำดับโครงสร้างพื้นฐานตามระดับความเปราะบางได้อย่างชัดเจน ซึ่งถือเป็นประโยชน์สำคัญของการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ในงานด้านการบริหารความเสี่ยงภัยพิบัติ

ผลที่ได้จากการ overlay กับ GIS ทำให้สามารถสร้างแผนที่เชิงพื้นที่ (risk map) เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจของหน่วยงานรัฐหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นได้อย่างเป็นรูปธรรม

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusion & Recommendations)

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายของเขื่อนกิ่วลม โดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมฉับพลัน downstream ของเขื่อน

จากผลการจำลองพบว่า หากเกิดการพังทลาย ที่เขื่อนกิ่วลม คลื่นน้ำท่วมจะเดินทางด้วยความเร็วสูงเข้าสู่พื้นที่ downstream และสามารถสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญได้อย่างรุนแรง ทั้งนี้สรุปสาระสำคัญของผลการวิจัยได้ดังนี้

- 1) ระดับความลึกของน้ำ ในพื้นที่ใกล้เขื่อนมีค่าสูงถึง 1.7-2.5 เมตร และยังคงมีความลึกมากกว่า 1.98 เมตรในพื้นที่ตัวเมืองลำปาง ส่งผลกระทบต่ออาคาร ถนน และชุมชนริมแม่น้ำ
- 2) ความเร็วของกระแสน้ำ เฉลี่ยในระยะแรกอยู่ที่ 1.59-3.81 เมตร/วินาที ซึ่งมีศักยภาพในการทำลายโครงสร้างและพัดพาสิ่งของได้
- 3) เวลาที่น้ำเดินทางถึง พื้นที่ต่าง ๆ อยู่ในช่วง 10-30 นาที ขึ้นอยู่กับระยะทางและสภาพภูมิประเทศ ซึ่งนับว่าเป็น สถานการณ์น้ำท่วมฉับพลัน (Flash Flood) ที่มีเวลาตอบสนองต่ำ
- 4) โครงสร้างพื้นฐาน ที่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ถนนสายหลัก สะพาน อาคารราชการ และสถานบริการสาธารณสุข โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในแนว floodplain
- 5) การประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ ทำให้สามารถจัดลำดับพื้นที่เปราะบางได้อย่างเป็นระบบ และนำไปใช้วางแผนการป้องกันและอพยพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการปฏิบัติ

จากผลการวิจัยที่ได้จำลองสถานการณ์เขื่อนพังทลายและวิเคราะห์ผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมฉับพลัน พบว่าพื้นที่ท้ายน้ำของเขื่อนกิ่วลมมีระดับความเสี่ยงที่สูงต่อการได้รับผลกระทบในกรณีเกิดเหตุการณ์จริง ทั้งในด้านความลึก ความเร็วของกระแสน้ำ และระยะเวลาที่น้ำเดินทางถึงพื้นที่ชุมชน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการอพยพ การเข้าถึงของเจ้าหน้าที่ และการดำเนินการช่วยเหลือฉุกเฉิน

ดังนั้น เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติได้อย่างแท้จริง งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและแนวทางในการดำเนินงาน ทั้งในเชิงการบริหารจัดการ ความเสี่ยง การเตรียมพร้อมรับมือ และการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

- 1) การจัดทำแผนที่เสี่ยงภัย (Flood Risk Map) ควรใช้ข้อมูลจากการจำลองเป็นเครื่องมือในการระบุตำแหน่งโครงสร้างพื้นฐานที่ควรได้รับการป้องกันหรือเสริมความแข็งแรงเป็นลำดับต้น ๆ
- 2) การวางแผนอพยพฉุกเฉิน (Emergency Evacuation Plan) สำหรับชุมชนที่อยู่ในระยะที่น้ำเดินทางถึงเร็ว ควรจัดให้มีแผนและระบบเตือนภัยที่มีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งฝึกซ้อมอย่างสม่ำเสมอ
- 3) การตรวจสอบความเปราะบางของโครงสร้าง โดยเฉพาะสะพานและถนน ควรดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างอย่างละเอียด และเสริมความมั่นคงในจุดที่อยู่ในแนวกระแสน้ำ
- 4) การบูรณาการข้อมูลระหว่างหน่วยงาน เช่น กรมชลประทาน, อบต., ปก., และเทศบาล ควรแลกเปลี่ยนข้อมูล DEM, โครงสร้างพื้นฐาน และข้อมูลจำลองเพื่อให้แผนการรับมือมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 5) การพัฒนางานวิจัยต่อยอด ควรศึกษาผลกระทบในกรณี worst-case ที่มีฝนตกหนักร่วมกับเขื่อน breach รวมถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (เช่น มูลค่าความเสียหาย) เพื่อประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบาย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมชลประทาน. (n.d.). สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2567, จาก <https://swoc.rid.go.th/index.html>
- [2] U.S. Army Corps of Engineers. (2024, 5 มิถุนายน). HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). ศูนย์วิศวกรรมอุทกวิทยา. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- [3] สำนักงานชลประทานที่ 2. (n.d.). หน้าแรก. กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2567, จาก <http://rio2.rid.go.th/kewlom/index.php/th/>



กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลือจาก อาจารย์อนุจิตร ภูมิพันธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางรวมถึงให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยและนางสาวปาริสาชวดี วังกาวิ ที่ให้คำปรึกษาในการทำเล่มศึกษาวิจัยจนสามารถดำเนินการเสร็จสิ้นได้ด้วยดีสำหรับกรณีการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน: การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Machine Learning และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

Land: use change prediction: analysis using machine learning techniques and satellite imagery data

จิตรกรณ์ จิตติศพร^{1*} และ เทิดภูมิ สุโพธิ¹

¹ นิสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101632@up.ac.th

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Land Use and Land Cover Change: LULC) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของมนุษย์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการวางแผนเชิงพื้นที่และการพัฒนาอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงเวลาที่กำหนดโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผ่านระบบ Google Earth Engine (GEE) (2) สร้างแบบจำลองการคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตด้วยโปรแกรม QGIS และปลั๊กอิน MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) และ (3) ประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat และ Sentinel ในช่วงปี พ.ศ. 2553–2568 โดยใช้เทคนิคการจำแนกประเภทข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เช่น Random Forest ผ่านแพลตฟอร์ม GEE จากนั้นนำผลลัพธ์ไปประมวลผลและจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตด้วย QGIS ร่วมกับตัวแปรขับเคลื่อนเชิงพื้นที่ เช่น ความชัน ระยะทางจากถนน และพื้นที่เมือง ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่การเกษตรมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณใกล้แหล่งคมนาคมและศูนย์กลางเศรษฐกิจ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) มากกว่า 90% และค่า Kappa มากกว่า 0.85 ซึ่งอยู่ในระดับน่าเชื่อถือจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการบูรณาการการใช้ Google Earth Engine และ QGIS เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการติดตามและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ช่วยสนับสนุนการวางแผนพัฒนาเมือง การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน, Google Earth Engine, QGIS, การคาดการณ์, ระบบภูมิสารสนเทศ

Abstract

Land Use and Land Cover Change (LULC) is a process resulting from economic and social development of human societies, which continuously impacts the environment, ecosystems, and natural resource management. Studying such changes is therefore important for spatial planning and sustainable development. This research aims to (1) analyze land use changes over a specified period using satellite imagery data through the Google Earth Engine (GEE) system, (2) develop a predictive model for future land use change trends using QGIS software and the MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) plugin, and (3) assess land use change trends that may impact the environment in the study area. The data used for analysis were obtained from Landsat and Sentinel satellite imagery from 2553 to 2568, using machine learning algorithms such as Random Forest for data classification through the GEE platform. The results were then processed and simulated for future land use changes using QGIS combined with spatial driving variables such as slope, distance from roads, and urban areas. The study found that agricultural areas showed a continuous declining trend, while residential and built-up areas showed an expanding trend, particularly in areas near transportation networks and economic centers. The developed model achieved an Overall Accuracy greater than 90% and a Kappa value greater than 0.85, indicating a reliable level of accuracy. From these

findings, it can be concluded that the integration of Google Earth Engine and QGIS is an effective approach for monitoring and predicting land use changes, supporting future urban development planning, natural resource management, and sustainable land use.

Keywords: land use change, Google Earth Engine, QGIS, prediction, geographic information system

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Land Use and Land Cover Change: LULC) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การขยายตัวของเมือง การทำเกษตรกรรม การตัดไม้ทำลายป่า และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และคุณภาพชีวิตของประชาชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การติดตามและคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการวางแผนการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืน เพื่อให้หน่วยงานภาครัฐและท้องถิ่นสามารถกำหนดนโยบายหรือมาตรการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอดีต การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต้องอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจำนวนมากและเครื่องมือประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อน ส่งผลให้การดำเนินการใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง ปัจจุบัน เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศสมัยใหม่ เช่น Google Earth Engine (GEE) และ QGIS ได้เข้ามาช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศมีประสิทธิภาพมากขึ้น Google Earth Engine (GEE) เป็นแพลตฟอร์มประมวลผลข้อมูลภูมิสารสนเทศบนระบบคลาวด์ที่สามารถเข้าถึงและวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากหลายแหล่งได้โดยตรง เช่น Landsat, Sentinel และ MODIS โดยไม่จำเป็นต้องดาวน์โหลดข้อมูลทั้งหมด ช่วยให้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงเวลายาวนานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ในขณะที่ QGIS เป็นซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบเปิด (Open Source GIS) ที่มีเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และปลั๊กอินเสริม เช่น MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) ซึ่งสามารถใช้จำลองและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตโดยอาศัยข้อมูลจาก GEE ดังนั้น การบูรณาการการทำงานระหว่าง Google Earth Engine และ QGIS จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และการคาดการณ์แนวโน้มในอนาคต เพื่อสนับสนุนการวางแผนเชิงพื้นที่ การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระดับพื้นที่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงเวลาที่กำหนดโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผ่าน Google Earth Engine
2. เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาเชิงพื้นที่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การศึกษาภาพถ่ายดาวเทียมที่มีการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ และพัฒนาระบบการประมวลผลข้อมูลเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์
2. การเลือกและทดสอบเทคนิค Machine Learning ที่เหมาะสม เช่น Random Forest, SVM, หรือ Neural Networks ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของที่ดิน
3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทำนายและการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเพื่อให้แน่ใจว่าโมเดลสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงได้แม่นยำ
4. การวิเคราะห์ข้อมูลจากหลายแหล่งที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เช่น การเติบโตของเมือง, การขยายตัวของพื้นที่เกษตรกรรม, การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ฯลฯ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ฐานข้อมูลการใช้ที่ดินในอดีตและปัจจุบันที่มีความถูกต้องสูงและเป็นระบบ
2. ได้แบบจำลองการคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคต ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนพัฒนาเมืองและการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ
3. เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษา
4. สนับสนุนการใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศสมัยใหม่ เช่น Google Earth Engine และ QGIS ในการวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมและการวางแผนเชิงพื้นที่
5. สามารถนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดนโยบายหรือแนวทางการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืนในอนาคต

2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

การใช้ที่ดิน (Land Use) หมายถึง การใช้พื้นที่เพื่อกิจกรรมทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เช่น พื้นที่เกษตรกรรม ป่าไม้ ชุมชน หรือพื้นที่น้ำ การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Land Use Change) เป็นผลจากปัจจัยด้านเศรษฐกิจ การขยายตัวของเมือง ประชากร และ

นโยบายของรัฐ การติดตามและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงนี้ช่วยให้สามารถวางแผนการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืน

2.2 แนวคิดของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และโปรแกรม QGIS

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) คือระบบที่ใช้เก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยสามารถเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพิกัดกับข้อมูลเชิงคุณลักษณะ ทำให้วิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ QGIS (Quantum GIS) เป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สที่ได้รับความนิยมสูงในงานภูมิสารสนเทศ สามารถประมวลผลข้อมูล Raster และ Vector ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งรองรับปลั๊กอินเสริม เช่น MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) ที่ช่วยในการสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินโดยใช้เทคนิคเชิงพื้นที่ เช่น Cellular Automata (CA) และ Artificial Neural Network (ANN) ซึ่งช่วยให้สามารถจำลองและคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ในอนาคตได้

2.3 แนวคิดของ Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) เป็นแพลตฟอร์มคลาวด์คอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศและภาพถ่ายดาวเทียมขนาดใหญ่ โดยมีฐานข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมต่าง ๆ เช่น Landsat, Sentinel, MODIS ซึ่งมีข้อมูลย้อนหลังหลายสิบปี GEE มีจุดเด่นในการเข้าถึงและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้รวดเร็วและมีเครื่องมือด้าน Machine Learning สำหรับการจำแนกภาพ (Classification) รองรับการสร้างโค้ด (JavaScript / Python) เพื่อวิเคราะห์เชิงลึกและเชื่อมโยงกับ QGIS GEE จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการดึงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและจัดเตรียมข้อมูลต้นทางสำหรับแบบจำลองใน QGIS

2.4 แนวคิดของเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

Machine Learning เป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่มุ่งเน้นให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้จากข้อมูลโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมเฉพาะเจาะจง (Mitchell, 2540) เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในงานด้านภูมิสารสนเทศเพื่อจำแนกประเภทการใช้ที่ดินจากภาพถ่ายดาวเทียม เช่น Supervised Classification เช่น Random Forest, Support Vector Machine (SVM), Decision Tree Unsupervised Classification เช่น K-means Artificial Neural Network (ANN) ซึ่งสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนของข้อมูลเชิงพื้นที่ การผสมผสาน Machine Learning กับ GIS และภาพถ่ายดาวเทียมช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกและคาดการณ์การใช้ที่ดิน

2.5 แบบจำลอง Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA–ANN)

แบบจำลอง CA–ANN เป็นการผสมผสานระหว่างแนวคิด Cellular Automata (CA) ที่ใช้หลัก “เซลล์ข้างเคียงมีผลต่อกัน” กับ Artificial Neural Network (ANN) ที่เรียนรู้จากข้อมูลอดีต เพื่อนำมาคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคต เช่น การขยายตัวของเมืองหรือพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในงาน Land Use Change Prediction เพราะสามารถสะท้อนพลวัตของพื้นที่จริงได้ดี

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. K. D. Bathe และ N. S. Patil (2567). ได้ Kappa ~0.97, ความแม่นยำ ~98.2% ผลทำนายว่าพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
2. Silva and Wu (2555) ได้พัฒนาแบบจำลอง CA–ANN เพื่อคาดการณ์การขยายตัวของเมือง โดยพบว่าแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอดีต

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้แบบจำลองเชิงพื้นที่ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอดีต ปัจจุบัน และคาดการณ์แนวโน้มในอนาคต โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์ออโตมาตา (Cellular Automata - Artificial Neural Network: CA–ANN) ผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรม QGIS และ Google earth engine (GEE)

3.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ [ลำปาง] ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงระยะเวลาที่ศึกษา โดยพิจารณาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลการใช้ที่ดินย้อนหลัง

3.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ขอบเขตด้านพื้นที่: ครอบคลุมพื้นที่ [ระบุขนาดพื้นที่และขอบเขตทางภูมิศาสตร์]
2. ขอบเขตด้านเวลา: ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในช่วงปี 2559, 2561, 2564 และคาดการณ์ถึงปี 2070
3. ขอบเขตด้านเนื้อหา: วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินประเภทหลัก เช่น พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชน และพื้นที่น้ำ

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. โปรแกรม QGIS สำหรับการประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่

2. โปรแกรม MOLUSCE Plugin (Modules for Land Use Change Evaluation) สำหรับการสร้างแบบจำลอง CA-ANN
3. ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เช่น Landsat, Sentinel-2
4. ข้อมูลการใช้ที่ดินจากหน่วยงานราชการ เช่น กรมพัฒนาที่ดิน หรือสำนักงานสถิติแห่งชาติ
5. โปรแกรม Google Earth Engine (GEE) สำหรับการดึงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมย้อนหลัง
6. โปรแกรม Microsoft Excel หรือ SPSS สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

- ดึงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมย้อนหลังจาก GEE ด้วยวิธีการ supervised classification (การแยกข้อมูล)
- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำเข้า QGIS ได้

2. การเตรียมข้อมูล

- ทำการแปลงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมให้อยู่ในรูปแบบ Raster
- ทำการจัดหมวดหมู่การใช้ที่ดิน (Land Use Classification) ด้วยเทคนิคการจำแนกภาพ เช่น Supervised Classification
- ตรวจสอบความถูกต้องของการจำแนกด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy Assessment)

3. การสร้างแบบจำลอง CA-ANN

- ใช้ปลั๊กอิน MOLUSCE ใน QGIS เพื่อสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน
- ป้อนข้อมูลการใช้ที่ดินในอดีตและปัจจุบันเพื่อฝึกแบบจำลอง
- ปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียม เช่น จำนวนรอบการเรียนรู้ (Iterations), Learning Rate, Hidden Layers ฯลฯ
- สร้างแบบจำลองการคาดการณ์การใช้ที่ดินในอนาคต

4. การประเมินผลแบบจำลอง

- เปรียบเทียบผลการคาดการณ์กับข้อมูลจริง (ถ้ามี)
- คำนวณค่าความแม่นยำ เช่น Kappa Coefficient, Overall Accuracy
- วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคต

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

- ใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

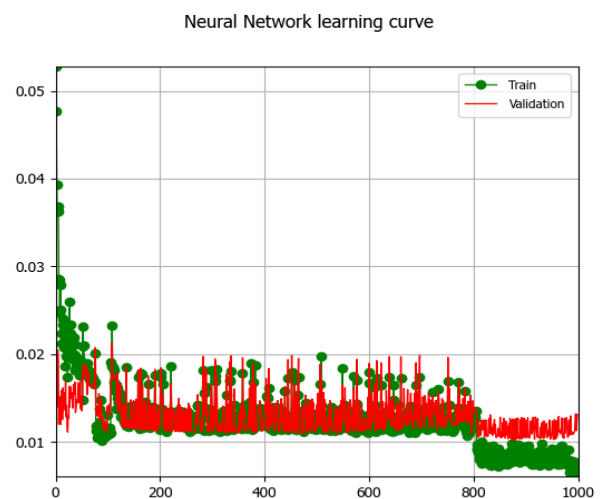
• วิเคราะห์เชิงพื้นที่ด้วย QGIS เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดินในรูปแบบแผนที่

• วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตเพื่อใช้ในการวางแผนการใช้ที่ดินอย่างยั่งยืน

4 ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Machine Learning และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงได้ดังนี้

4.1 Neural Network learning curve



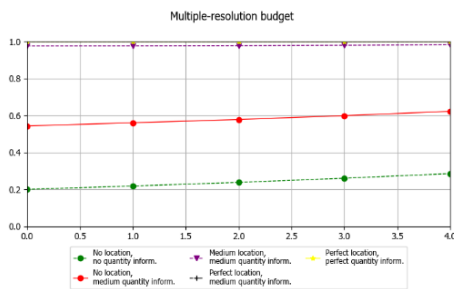
ภาพที่ 1 แสดงกราฟแสดงกระบวนการเรียนรู้ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

โดยแกน X แทนจำนวนรอบการฝึก (Epochs) และแกน Y แทนค่าความผิดพลาด (Loss) ของโมเดล ซึ่งประกอบด้วยเส้นสีเขียวแสดงค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลฝึก (Training Loss) และเส้นสีแดงแสดงค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Loss) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นของการฝึก (0-100 epochs) ค่า Loss ของทั้งชุดข้อมูลฝึกและตรวจสอบลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าโมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้น (ประมาณ 100-800 epochs) ค่า Loss ของทั้งสองชุดมีค่าต่ำและคงที่ในช่วงประมาณ 0.01-0.02 โดยไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลมีการเรียนรู้ที่เสถียรและไม่เกิดการ overfitting ในช่วงปลายของการฝึก (800-1000 epochs) พบว่าค่า Training Loss ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า Validation Loss คงที่และมีความผันผวนเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถรักษาความแม่นยำในการทำนายกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (validation set) ได้ดี อีกทั้งค่าความผิดพลาดของทั้งสองชุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลมีความสามารถในการทั่วไป (Generalization) ที่ดี โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร ไม่มีสัญญาณของการเกิด overfitting หรือ underfitting และ

ช่วงการฝึกที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 700–800 epochs ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความผิดพลาดของทั้งชุดฝึกและชุดตรวจสอบคงที่และต่ำที่สุด

จากตารางจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยและค่าต่ำสุดของ Loss ทั้งในชุด Training และ Validation มีค่าต่ำมาก (น้อยกว่า 0.02) และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า 0.01 ซึ่งหมายความว่าโมเดลมีความเสถียรในการเรียนรู้สูงและมีการปรับพารามิเตอร์ได้เหมาะสม ค่าความผิดพลาดของทั้งสองชุดใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าโมเดลไม่มีการเรียนรู้เกิน (Overfitting) หรือเรียนรู้น้อยเกินไป (Underfitting) และช่วง Epoch ที่เหมาะสมสำหรับการหยุดการฝึกอยู่ที่ประมาณ 700–800 Epochs ซึ่งให้ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด

4.2 Multiple-resolution budget



4.2.1 แนวโน้มค่า Multiple-resolution budget

เงื่อนไขที่ไม่มีข้อมูลตำแหน่งและปริมาณ (No location, no quantity information) ให้ค่าต่ำสุด (~0.2–0.3) เงื่อนไขที่มีข้อมูลปริมาณปานกลางแต่ไม่มีข้อมูลตำแหน่ง (No location, medium quantity information) ให้ค่าเพิ่มขึ้น (~0.55–0.62) การปรับปรุงข้อมูลตำแหน่งระดับปานกลางพร้อมข้อมูลปริมาณปานกลาง (Medium location, medium quantity information) ให้ค่าใกล้ 1 (~0.95–0.98) เงื่อนไขที่ตำแหน่งถูกต้องสมบูรณ์ แม้ปริมาณไม่สมบูรณ์ (Perfect location, medium quantity information) ค่าใกล้ 1 เงื่อนไขที่ตำแหน่งและปริมาณสมบูรณ์ (Perfect location, perfect quantity information) ให้ค่า 1.0

4.2.2 การตีความเชิงวิเคราะห์

โมเดลมีความแม่นยำสูงเมื่อข้อมูลตำแหน่งมีความถูกต้อง ซึ่งมีผลมากกว่าการปรับปรุงเพียงข้อมูลปริมาณการเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลทั้งตำแหน่งและปริมาณช่วยให้โมเดลบรรลุประสิทธิภาพสูงสุด (baseline performance) แนวโน้มของกราฟแสดงว่า ข้อมูลตำแหน่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแม่นยำของการจำลองเชิงพื้นที่

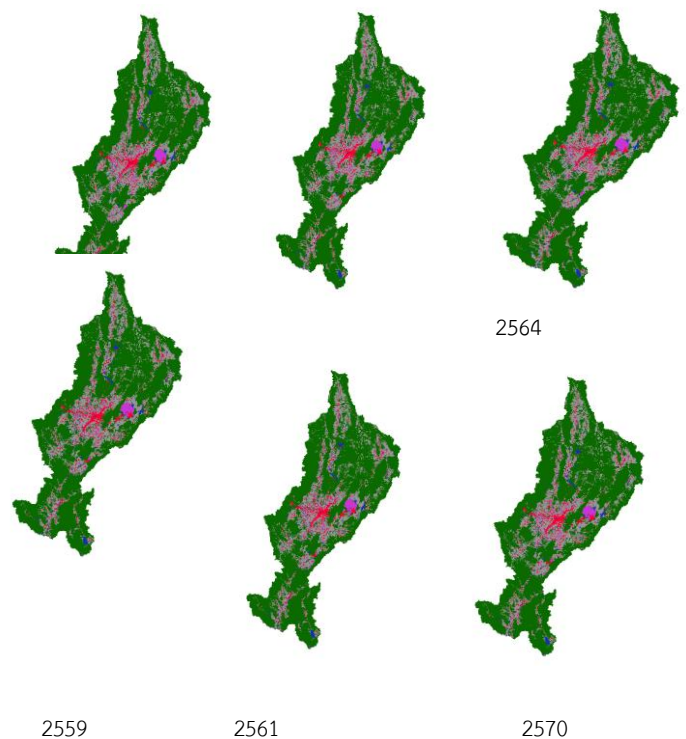
ค่าสถิติ	ค่า	การตีความ
% of Correctness	97.56%	โมเดลมีความถูกต้องสูงมาก สามารถจำลองการกระจายเชิงพื้นที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิง
Kappa (Overall)	0.9466	ความสอดคล้องสูง แสดงว่าโมเดลมีความสามารถในการจำลองที่เหนือความบังเอิญ
Kappa (Histogram)	0.9972	การกระจายของแต่ละประเภทมีความแม่นยำสูงมาก
Kappa (Location)	0.9492	ตำแหน่งที่โมเดลจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลจริง

จากตารางโมเดลที่พัฒนาด้วย MOLUSCE มีประสิทธิภาพสูง สามารถจำลองการกระจายเชิงพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ (%Correctness = 97.56%, Kappa(overall) = 0.9466), Kappa(Histogram) = 0.9972, Kappa(Location) = 0.9492 การปรับปรุงข้อมูลตำแหน่งมีผลต่อความถูกต้องมากที่สุด ขณะที่การปรับปรุงข้อมูลปริมาณช่วยเพิ่มความแม่นยำได้รองลงมา

ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าโมเดลสามารถใช้งานเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่และการจัดการเชิงพื้นที่ได้อย่างเชื่อถือได้

4.3 การคาดการณ์การใช้ที่ดินในปี 2559-2590

4.3.1 รูปแสดงความแตกต่างระหว่างปี 2559-2590



4.3.2 ตารางแสดงตารางข้อมูลที่ดิน (ตารางกิโลเมตร)

ประเภท	ปีปัจจุบัน			ปีคาดการณ์		
	2559	2561	2564	2570	2580	2590
A (พื้นที่การเกษตร)	2778.29	2835.49	2840.09	2862.55	2800.57	2800.59
F (พื้นที่ป่าไม้)	8791.53	8731.98	8723.45	8711.08	8756.22	8756.18
M (พื้นที่การวาง)	254.52	236.06	243.47	231.93	246.544	246.56
U (สิ่งปลูกสร้างและ อาคาร)	487.95	506.15	500.09	509.01	510.03	510.03
W (แหล่งน้ำ)	170.03	172.64	175.22	167.75	168.96	168.96
Sum	12482.32	12482.32	12482.32	12482.32	12482.32	12482.32

จากตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงปีปัจจุบัน (พ.ศ. 2559–2564) และปีคาดการณ์ (พ.ศ. 2570–2590) พบว่า พื้นที่รวมทั้งหมดคงที่อยู่ที่ประมาณ 12,482.32 ตารางกิโลเมตร ตลอดช่วงเวลา โดยมีรายละเอียดดังนี้

พื้นที่เกษตรกรรม (A) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 2,778.29 ตร.กม. ในปี 2559 เป็น 2,840.09 ตร.กม. ในปี 2564 และคาดว่าจะเพิ่มเป็น 2,862.55 ตร.กม. ในปี 2570 ก่อนจะทรงตัวที่ราว 2,800.59 ตร.กม. ในปี 2590

พื้นที่ป่าไม้ (F) มีค่าคงที่และค่อนข้างสูงที่สุดในทุกปี โดยอยู่ราว 8,700–8,750 ตร.กม. แม้มีการลดลงเล็กน้อยในช่วงปีคาดการณ์ (จาก 8,723.45 ตร.กม. ในปี 2564 เหลือ 8,756.18 ตร.กม. ในปี 2590)

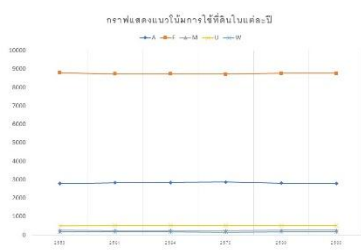
พื้นที่ที่สร้าง (M) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อยู่ระหว่าง 231–254 ตร.กม. โดยแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในระยะยาว

- พื้นที่สิ่งปลูกสร้างและอาคาร (U) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จาก 487.95 ตร.กม. ในปี 2559 เป็น 510.03 ตร.กม. ในปี 2590 แสดงถึงการขยายตัวของเขตเมืองและชุมชน

- พื้นที่แหล่งน้ำ (W) ค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 167–175 ตร.กม. ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา

โดยสรุปแล้ว การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงระยะเวลาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง ขณะที่พื้นที่ป่าไม้ยังคงมีสัดส่วนมากที่สุดและค่อนข้างคงที่

4.4. แนวโน้มการใช้ที่ดินในปี 2559-2570



กราฟแสดงแนวโน้มการใช้ที่ดิน

จากกราฟพบว่า การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษามีแนวโน้ม คงที่ตลอดช่วงปี พ.ศ. 2559–2590 โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในภาพรวม ทั้งนี้สามารถสรุปแนวโน้มของแต่ละประเภทได้ดังนี้

- พื้นที่ป่าไม้ (F) มีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่น และมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงปีการศึกษา แสดงถึงการคงอยู่ของพื้นที่ป่าที่มั่นคง แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในบางปี

- พื้นที่เกษตรกรรม (A) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากปี 2559 ถึงปี 2570 ก่อนจะทรงตัวในช่วงปีคาดการณ์ แสดงให้เห็นถึงการขยายพื้นที่เกษตรบางส่วนในช่วงแรกของการศึกษา

- พื้นที่สิ่งปลูกสร้างและอาคาร (U) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ในอัตราช้า แสดงถึงการขยายตัวของเขตเมืองและชุมชน

- พื้นที่ที่สร้าง (M) และ พื้นที่แหล่งน้ำ (W) มีแนวโน้มคงที่ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของพื้นที่ประเภทนี้

5 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในจังหวัดลำปาง โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม พบว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเชิงเซลล์อัตโนมัติ (Cellular Automata-Artificial Neural Network: CA-ANN) มีประสิทธิภาพสูงในการจำลองและทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดินในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการเรียนรู้ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Learning Curve)

กราฟแสดงค่าความผิดพลาด (Loss Function) ของชุดข้อมูลฝึก (Training Loss) และชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Loss) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการฝึก (ประมาณ 0–100 Epochs) ค่า Loss ของทั้งสองชุดลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าโมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาในช่วง 100–800 Epochs ค่า Loss ของทั้งสองชุดมีค่าต่ำและคงที่ในช่วงประมาณ 0.01–0.02 โดยไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของกระบวนการเรียนรู้และไม่เกิดภาวะการเรียนรู้เกิน (Overfitting) หรือการเรียนรู้ไม่เพียงพอ (Underfitting) ในช่วงปลายของการฝึก (800–1000 Epochs) พบว่าค่า Training Loss ลดลงเล็กน้อย ขณะที่ค่า Validation Loss มีความคงที่และผันผวนเพียงเล็กน้อย แสดงถึงความสามารถของโมเดลในการทั่วไป (Generalization) ได้ดี กล่าวคือสามารถทำนายข้อมูลที่เคยเห็นมาก่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วง Epoch ที่เหมาะสมสำหรับการฝึกคือระหว่าง 700–800 Epochs ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด และมีความแตกต่างระหว่าง Training และ Validation Loss น้อยที่สุด

5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล (Multiple-Resolution Budget)

จากการประเมินผลด้วยตัวชี้วัดหลายมิติ พบว่าโมเดลที่พัฒนาด้วยปลั๊กอิน MOLUSCE บนโปรแกรม QGIS มีความแม่นยำสูง โดยให้ค่าดังนี้

- ความถูกต้องรวม (%Correctness) = 97.56%

- Kappa (Overall) = 0.9466
- Kappa (Histogram) = 0.9972
- Kappa (Location) = 0.9492

ค่าดังกล่าวสะท้อนว่าโมเดลสามารถจำลองการกระจายเชิงพื้นที่ของการใช้ที่ดินได้อย่างถูกต้องและมีความเสถียรสูง ทั้งนี้จากการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบพบว่า

- การปรับปรุง “ข้อมูลตำแหน่งเชิงพื้นที่” ส่งผลต่อความแม่นยำของโมเดลมากกว่าการปรับปรุง “ข้อมูลปริมาณ”
 - เมื่อข้อมูลทั้งตำแหน่งและปริมาณมีความถูกต้องสูง โมเดลสามารถบรรลุประสิทธิภาพสูงสุด (ค่าความถูกต้องใกล้ 1.0)
- ดังนั้น การจัดเตรียมข้อมูลตำแหน่งเชิงพื้นที่ที่ถูกต้องถือเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อคุณภาพของการจำลองเชิงพื้นที่และความถูกต้องของการคาดการณ์

5.3 ผลการคาดการณ์การใช้ที่ดินในปี พ.ศ. 2559–2590

ผลการจำลองการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงปีปัจจุบัน (พ.ศ. 2559–2564) และปีคาดการณ์ (พ.ศ. 2570–2590) พบว่าพื้นที่รวมทั้งหมดคงที่อยู่ประมาณ 12,482.32 ตารางกิโลเมตร ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา โดยมีรายละเอียดของแต่ละประเภทที่ดินดังนี้

- พื้นที่เกษตรกรรม (A)

มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 2,778.29 ตร.กม. (พ.ศ. 2559) เป็น 2,862.55 ตร.กม. (พ.ศ. 2570) และคงที่ที่ราว 2,800.59 ตร.กม. (พ.ศ. 2590) สะท้อนถึงการขยายพื้นที่เกษตรในช่วงต้นของระยะเวลาที่ศึกษา ก่อนจะเข้าสู่ภาวะทรงตัว

- พื้นที่ป่าไม้ (F)

เป็นพื้นที่ที่มีสัดส่วนมากที่สุดตลอดช่วงการศึกษา โดยคงอยู่ระหว่าง 8,700–8,750 ตร.กม. แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในบางปี แสดงถึงความคงทนของพื้นที่ป่าในจังหวัดลำปาง

- พื้นที่ที่ร้าง (M)

มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อยู่ระหว่าง 231–254 ตร.กม. โดยแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในระยะยาว

- พื้นที่สิ่งปลูกสร้างและอาคาร (U)

มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 487.95 ตร.กม. (พ.ศ. 2559) เป็น 510.03 ตร.กม. (พ.ศ. 2590) แสดงถึงการขยายตัวของเขตชุมชนและการพัฒนาเมือง

- พื้นที่แหล่งน้ำ (W)

ค่อนข้างคงที่ในช่วง 167–175 ตร.กม. ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา โดยรวมพบว่าแนวโน้มหลักของการเปลี่ยนแปลงที่ดินคือการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้ยังคงมีสัดส่วนสูงสุดและมีความคงที่ แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเมืองและการเกษตรเกิดขึ้นภายใต้การคงอยู่ของพื้นที่ป่าในระดับที่มั่นคง

5.4 แนวโน้มโดยรวมของการใช้ที่ดิน

จากการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และกราฟแนวโน้ม พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินในจังหวัดลำปางในช่วงปี พ.ศ. 2559–2590 มีความเสถียรโดยรวมสูง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในภาพรวม ทั้งนี้สามารถสรุปแนวโน้มได้ดังนี้

- พื้นที่ป่าไม้ ยังคงมีสัดส่วนมากที่สุดและมีเสถียรภาพสูง
- พื้นที่เกษตรกรรม เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและคงตัวในระยะยาว
- พื้นที่สิ่งปลูกสร้างและอาคาร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ต่อเนื่อง สะท้อนการขยายตัวของเขตเมือง

- พื้นที่ที่ร้างและแหล่งน้ำ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

กล่าวโดยสรุป การใช้ที่ดินในจังหวัดลำปางมีความคงที่ในเชิงโครงสร้าง โดยแนวโน้มหลักคือการเพิ่มขึ้นของพื้นที่พัฒนาเมืองและพื้นที่เกษตรกรรม ขณะที่พื้นที่ป่ายังคงเป็นองค์ประกอบหลักของพื้นที่จังหวัดในระยะยาว

6 อ้างอิง

[1] ชูติพงศ์ ร่มสนธิ . (2551). การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดิน โดยใช้

แบบจำลอง CA-MARKOV บริเวณลุ่มน้ำแม่จ๋ม จังหวัดเชียงใหม่. กรุงเทพมหานคร :

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2564, จาก

<http://dric.nrct.go.th/Search/SearchDetail/219959>

[2] ลักษณ์ พูลภักตร์ (2552). การประยุกต์ใช้โลจิสติกส์เกรสชันในการจำแนกและตรวจสอบการ

เปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเชิงตัวเลข. กรุงเทพมหานคร :

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2564, จาก

http://www.tnrr.in.th/?page=result_search&record_id=10401741

[3] สุธี อนันต์สุขสมศรี, ดิพพงษ์ ภูมิเกียรติศักดิ์, นิจ ตันติศิริินทร์. 2560. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ระบบซับซ้อน (Complex System) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในภาค

ตะวันออกของประเทศไทย. วารสารวิชาการการวางแผนภาคและเมือง

[4] จิตรภณ สุนทร. (2561). การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตอำเภอเมือง



นครปฐมจังหวัดนครปฐม. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University Silpakorn University.สืบค้นเมื่อ วันที่ 19 มีนาคม 2564, จาก

<https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/135014>

[5] แสงชม พจน์สมพงษ์.(2562). เอกสารประกอบการบรรยาย การวิเคราะห์อ่านแปล ตีความภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อพิสูจน์สิทธิครอบครองและการทำประโยชน์ที่ดิน. สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มีนาคม

2564 ,จาก

<https://dmcrth.dmcr.go.th/attachment/dw/download.php?WP=rUqjMT01>

qmMZG22DM7y04TyerPMjA203qmuZZz1CM5O0hJatrTD07o3Q

[6] นิพนธ์ วิเชียรน้อย. (ม.ป.ป.). การผังเมืองและการใช้ประโยชน์ที่ดินในประเทศไทย.วารสารกรมโยธาธิการและผังเมือง . สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2564,จาก

https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/urban_planning_land_use.pdf

[7] ALGhaliya Nasser Mohammed Al-Rubkhi. (n.d.). Land Use Change Analysis and Modeling

Using Open Source (QGIS) Case Study: Boasher Willayat.Retrieved from,<https://www.researchgate.net/profile/AlghaliyaAsia>

[8] Air Survey & Next GIS. (n.d). Quick Help Modules for Land Use Change Evaluation.

Retrieved from, <https://www.coursehero.com/file/43207182/QuickHelppdf/>

[9] Chaipat ncm. (2562). Download Sentinel 2 high-resolution optical images with Python.

Retrieved from, <https://medium.com/geo-datascience/download-sentinel-2-high-resolution-optical-images-with-python-2581c6fec0e>

[10] Ender Buğday & Seda Erkan Buğday. (2562). Modeling and Simulating Land use/cover

Change Using Change Using Artificial Neural Network From Remotely Sensing

Data.Retrieved from,<https://www.scielo.br/j/cerne/a/CrT6xJmC6XqFDbzhJJSHT9q/?lang=en>

[11] Matteo Gismondi et al. (n.d.). MOLUSCE an open source land use change analyst for

QGIS. Retrieved from, https://www.ajiko.co.jp/download/pdf_tf2014/p62-63.pdf

[12] Nur Aisyah Mohd Baharudin & Noradila Rusli. (2017). Forecasting Spatial Pattern of Land

Use and Land Cover Changes Using Cellular Automata. Geomatics Research

Innovationn Competition. Retrieved from, https://www.researchgate.net/publication/327200726_Forecasting_Spatial_Pattern_of_Land_Use_and_Land_Cover_Changes_Using_Cellular_Automata

6_Forecasting_Spatial_Pattern_of_Land_Use_and_Land_Cover_Changes_Using_Cellular_Automata



การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

“Analysis of Flood Risk Areas Using Geographic Information System (GIS)”

นายชยานันท์ ดันแดง^{1*} นายศุภสัณห์ โกวงศ์¹

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding Chayanand Tandang; E-mail address: 65101520@up.ac.th

1. บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมสำหรับอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrological Model) ด้วยโปรแกรม HEC-HMS ร่วมกับเทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ด้วยโปรแกรม QGIS การวิเคราะห์อาศัยข้อมูลหลักได้แก่ ข้อมูลความสูงเชิงเลข (DEM) ความละเอียด 30 เมตร และข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงจากสถานีบ้านโจิตาตา ซึ่งจำลองจากเหตุการณ์ฝนตกหนักระหว่างวันที่ 25 เมษายน 2568 ถึง 2 พฤษภาคม 2568 กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการใช้ QGIS วิเคราะห์ข้อมูล DEM เพื่อกำหนดขอบเขตและลักษณะทางกายภาพของกลุ่มน้ำ จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวร่วมกับข้อมูลฝนไปสร้างแบบจำลองใน HEC-HMS เพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าและอัตราการไหลสูงสุด ผลลัพธ์จากแบบจำลองถูกนำมาวิเคราะห์ต่อใน QGIS เพื่อสร้างแผนที่พื้นที่น้ำท่วม และประเมินระดับความเสี่ยงโดยจำแนกออกเป็น 3 ระดับ คือ เสี่ยงสูง เสี่ยงปานกลาง และเสี่ยงต่ำ ผลการวิเคราะห์คาดว่าพื้นที่เสี่ยงสูงจะกระจุกตัวหนาแน่นในบริเวณที่ราบลุ่มริมแม่น้ำสายและพื้นที่ชุมชนใจกลางอำเภอ แผนที่ความเสี่ยงที่ได้จะเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับหน่วยงานภาครัฐและท้องถิ่นเพื่อใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนป้องกันและบรรเทาผลกระทบจากอุทกภัย การวางผังเมือง และการพัฒนาระบบเตือนภัยล่วงหน้า เพื่อเสริมสร้างความสามารถในการรับมือภัยพิบัติของอำเภอแม่สายอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วม, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, การวิเคราะห์เชิงพื้นที่, แม่สาย, การจัดการภัยพิบัติ, HEC-HMS, QGIS

Abstract

This study aims to develop a flood risk map for Mae Sai District, Chiang Rai Province, by integrating the HEC-HMS hydrological model with Geographic Information System (GIS) technology using QGIS software. The analysis utilizes a 30-meter resolution Digital Elevation Model (DEM) and hourly rainfall data from the Ban Jodata station, simulating a heavy rainfall event from April 25, 2025, to May 2, 2025. The research process involves using QGIS to analyze the DEM for watershed delineation and parameterization. These physical parameters, along with hourly rainfall data, are then input into HEC-HMS to simulate surface runoff and peak discharge. The model's output is subsequently processed in QGIS to generate a flood inundation map and to assess risk levels, which are classified into three categories: high, moderate, and low. The results are expected to indicate that high-risk areas are predominantly located along the Sai River floodplain and within the dense urban core of the district. The resulting flood risk map will serve as a valuable decision-support tool for government agencies and local authorities in planning flood mitigation measures, urban planning, and developing early warning systems to sustainably enhance Mae Sai District's resilience to disasters.

Keywords: Flood Risk Map, Geographic Information System, Spatial Analysis, Mae Sai, Disaster Management, HEC-HMS, QGIS



บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ซึ่งตั้งอยู่เหนือสุดของประเทศไทยและมีพรมแดนติดกับสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา มีลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อน ประกอบด้วยที่ราบลุ่มแม่น้ำสาย ชุมชนหนาแน่น และภูเขา ปัจจุบันเหล่านี้ทำให้พื้นที่อำเภอแม่สายมีความเปราะบางต่อปัญหาน้ำท่วมซ้ำซาก โดยเฉพาะจากน้ำป่าไหลหลากและน้ำล้นตลิ่งในช่วงฤดูฝน เหตุการณ์น้ำท่วมในอดีตได้สร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อเศรษฐกิจและสังคมในพื้นที่

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว และการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ไม่เหมาะสม ยิ่งซ้ำเติมให้ปัญหามีความรุนแรงมากขึ้น เพื่อรับมือกับความท้าทายดังกล่าว การมีเครื่องมือที่สามารถประเมินและคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงได้อย่างแม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ปัจจัยที่ซ้ำเติมปัญหาน้ำท่วม ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ที่ทำให้ปริมาณฝนมีความผันผวนและเกิดฝนตกหนักในระยะเวลาสั้นมากขึ้น
2. การขยายตัวของชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ในพื้นที่ลุ่มน้ำและเขตน้ำท่วมเดิม ซึ่งลดพื้นที่รับน้ำและหน่วงน้ำตามธรรมชาติ
3. การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ไม่เหมาะสม เช่น การถมที่ดินลุ่ม การตัดไม้ทำลายป่าในพื้นที่ต้นน้ำ และการเกษตรเชิงเดี่ยวในพื้นที่ลาดชัน
4. ข้อจำกัดของระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านการระบายน้ำ เช่น ท่อระบายน้ำขนาดเล็ก หรือเขื่อนป้องกันน้ำที่ไม่เพียงพอต่อระดับน้ำท่วมสูงสุด

ในบริบทของการจัดการภัยพิบัติ การป้องกันและบรรเทาผลกระทบจากน้ำท่วมอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ถูกต้อง ครบคลุม และทันสมัย เพื่อให้สามารถระบุพื้นที่เสี่ยงได้อย่างแม่นยำ การจัดทำ “แผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วม” จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้หน่วยงานรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ภาคเอกชน และชุมชนท้องถิ่นสามารถใช้ประกอบการวางแผนเชิงป้องกัน เช่น การกำหนดเขตปลอดภัย การออกแบบโครงสร้างป้องกันน้ำ การกำหนดเส้นทางอพยพ และการติดตั้งระบบเตือนภัย

นอกจากนี้ แผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมยังมีบทบาทเชิงวิชาการในการเป็นฐานข้อมูลเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพภูมิประเทศ การใช้ที่ดิน และความถี่ของเหตุการณ์น้ำท่วม อันจะนำไปสู่การวางแผนการพัฒนาพื้นที่

อย่างยั่งยืน และการเพิ่มความสามารถในการรับมือภัยพิบัติ (Resilience) ของชุมชนแม่สายในระยะยาว

ดังนั้น การวิจัยเพื่อสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมของอำเภอแม่สาย จึงมีความสำคัญทั้งในมิติของการป้องกันภัยพิบัติ การวางแผนพัฒนาเมือง การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชน ซึ่งจะช่วยลดความสูญเสียและเพิ่มความปลอดภัยให้กับชุมชนชายแดนแห่งนี้ อย่างเป็นระบบและยั่งยืน



ภาพที่ 1.1 ต้นตอน้ำท่วมแม่สาย จ.เชียงราย

แหล่งที่มา <https://www.thaipbs.or.th/news/content/344089>

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1. เพื่อรวบรวมและจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเสี่ยงน้ำท่วมในอำเภอแม่สาย ได้แก่ ข้อมูลภูมิประเทศ ความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ปริมาณน้ำฝน
- 1.2.2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางกายภาพและสังคมที่มีผลต่อความเสี่ยงน้ำท่วมในพื้นที่ศึกษา
- 1.2.3. เพื่อวิเคราะห์และจำลองปริมาณน้ำท่าและอัตราการไหลสูงสุด (Peak Flow) ที่เกิดจากเหตุการณ์ฝนตกหนักในพื้นที่ศึกษา
- 1.2.4. เพื่อสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมที่แบ่งระดับความเสี่ยงเป็นชั้นต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการวางแผนเชิงพื้นที่ การป้องกัน และการจัดการภัยพิบัติ
- 1.2.5. เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและมาตรการจัดการความเสี่ยงน้ำท่วมที่เหมาะสมและสอดคล้องกับบริบทพื้นที่ของอำเภอแม่สาย

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1. ขอบเขตพื้นที่ : ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ซึ่งประกอบด้วย 8 ตำบล ได้แก่

1. เวียงพางคำ
2. แม่สาย
3. เกาะช้าง



4. โปงผา
5. บ้านด้าย
6. ศรีเมืองชุม
7. เวียงห้วยลึก
8. แม่สายใต้

พื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะภูมิประเทศหลากหลาย ทั้งพื้นที่ราบลุ่มริมแม่น้ำสาย พื้นที่ชุมชน และพื้นที่ภูเขาสลับซับซ้อน

1.3.2. ขอบเขตของข้อมูล :

ใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยงน้ำท่วม ดังนี้

- ข้อมูลภูมิประเทศ: ข้อมูลความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ความละเอียด 30 เมตร
- ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา: ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง จากสถานีบ้านโจิตตา ตั้งแต่วันที่ 25 เมษายน 2568 เวลา 23:30 น. จนถึงวันที่ 2 พฤษภาคม 2568 เวลา 23:00 น.

1.3.3. ระยะเวลา : หนึ่งภาคเรียนการศึกษา

1.3.4 ขอบเขตด้านวิธีการวิเคราะห์ :

- ใช้โปรแกรม QGIS ในการเตรียมข้อมูลเชิงพื้นที่ (Pre-processing) เช่น การวิเคราะห์ขอบเขตลุ่มน้ำจากข้อมูล DEM และการแสดงผลลัพธ์ (Post-processing) เพื่อจัดทำแผนที่
- ใช้โปรแกรม HEC-HMS ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่า (Runoff) จากเหตุการณ์ฝนที่กำหนด
- แบ่งระดับความเสี่ยงน้ำท่วมออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ เสี่ยงสูง เสี่ยงปานกลาง และเสี่ยงต่ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ประโยชน์เชิงข้อมูลและวิชาการ

- ได้ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่และแบบจำลองอุทกวิทยา (HEC-HMS) ที่ทันสมัยและเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่อำเภอแม่สาย ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำท่าในอนาคตได้
- เป็นองค์ความรู้และกรณีศึกษาสำคัญในการบูรณาการโปรแกรม QGIS และ HEC-HMS สำหรับการประเมินความเสี่ยงอุทกภัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้อง
- เป็นฐานข้อมูลสำคัญที่สนับสนุนงานวิจัยต่อเนื่องในด้านการจัดการภัยพิบัติ, การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ , และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ชายแดน

1.4.2. ประโยชน์เชิงปฏิบัติการและการจัดการ

- แผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมที่ได้จากแบบจำลอง จะเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่มีความแม่นยำสูงสำหรับหน่วยงานภาครัฐและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการวางแผนป้องกันและบรรเทาอุทกภัย
- สนับสนุนการกำหนดนโยบายเชิงรุก เช่น การวางผังเมืองเพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่เสี่ยงสูง, การปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรม (เช่น ระบบระบายน้ำ), และการกำหนดเขตพื้นที่ปลอดภัยหรือพื้นที่อพยพ
- สนับสนุนการพัฒนาาระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning System) โดยสามารถนำแบบจำลอง HEC-HMS ไปใช้คาดการณ์ปริมาณน้ำท่าจากข้อมูลพยากรณ์อากาศล่วงหน้าได้
- ช่วยสร้างความตระหนักรู้และส่งเสริมการเตรียมความพร้อมให้แก่ประชาชนในพื้นที่เสี่ยง เพื่อลดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมจริง

1.4.3. ประโยชน์เชิงพัฒนาท้องถิ่นและความยั่งยืน

- เป็นเครื่องมือสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาเมืองและชุมชนอย่างยั่งยืน โดยคำนึงถึงปัจจัยเสี่ยงด้านอุทกภัยเป็นองค์ประกอบในการวางแผนระยะยาว
- เพิ่มความปลอดภัยและคุณภาพชีวิตของประชาชนในอำเภอแม่สาย ผ่านการบริหารจัดการความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติอย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ
- เสริมสร้างขีดความสามารถของชุมชนและหน่วยงานท้องถิ่นให้พร้อมรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความถี่และความรุนแรงของอุทกภัยเพิ่มขึ้นในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ความเสี่ยงน้ำท่วม (Flood Risk) เป็นแนวคิดที่สะท้อนถึงความน่าจะเป็นที่พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งจะเผชิญกับเหตุการณ์น้ำท่วมร่วมกับระดับความรุนแรงของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น แนวคิดนี้มักถูกอธิบายผ่านองค์ประกอบหลักสามประการ คือ

- **Hazard (ภัยธรรมชาติ)** หมายถึง เหตุการณ์หรือลักษณะทางธรรมชาติที่มีศักยภาพก่อให้เกิดความเสียหาย เช่น ปริมาณฝนตกหนัก น้ำหลาก น้ำล้นตลิ่ง หรือพายุ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของน้ำท่วม
- **Exposure (ความสัมผัส)** หมายถึง สิ่งปลูกสร้าง ประชากร หรือทรัพยากรต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบจากภัยน้ำท่วม



- **บทVulnerability (ความอ่อนแอ)** หมายถึง ความเปราะบางของระบบ สิ่งปลูกสร้าง หรือชุมชนที่ทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นเมื่อประสบภัย โดยความอ่อนแอนี้อาจเกิดจากปัจจัยทางสังคม เศรษฐกิจ หรือโครงสร้างพื้นฐานที่ไม่พร้อมรับมือ

การประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมจึงต้องพิจารณาปัจจัยทั้งสามนี้ร่วมกัน เพื่อให้ได้ภาพรวมที่สมบูรณ์และแม่นยำ โดยแนวทางการจัดการความเสี่ยงน้ำท่วมตามหลักสากลจะเน้นการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่กับข้อมูลสถิติภัยพิบัติ เพื่อออกแบบมาตรการป้องกัน บรรเทาผลกระทบ และเตรียมความพร้อมรับมืออย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ การวางแผนและการจัดการความเสี่ยงยังต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ที่ทำให้รูปแบบและความรุนแรงของน้ำท่วมเปลี่ยนแปลงไป

หลักการและแนวคิดเหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการปฏิบัติงานจริงในระดับท้องถิ่นและระดับภูมิภาค เพื่อช่วยลดความสูญเสียและเพิ่มความยืดหยุ่นของชุมชนและระบบนิเวศ

ปริมาณน้ำฝน (Precipitation) คือปริมาณน้ำที่ตกลงมาจากชั้นบรรยากาศสู่พื้นผิวโลกในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ฝน หิมะ ลูกเห็บ หรือฝนตกปรอย ๆ โดยปริมาณน้ำฝนมักถูกวัดเป็นมิลลิเมตร (มม.) ซึ่งหมายถึงความสูงของน้ำฝนที่ตกลงมาบนพื้นที่หนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนด

ปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ ภูมิอากาศ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเกษตร การจัดการทรัพยากรน้ำ และการวางแผนด้านภัยพิบัติ

1. ลักษณะของปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามพื้นที่และช่วงเวลาต่าง ๆ ทั้งในเชิงพื้นที่ (Spatial Variability) และเชิงเวลา (Temporal Variability)

- **ความแปรปรวนเชิงพื้นที่** หมายถึง ปริมาณน้ำฝนที่ไม่เท่ากันในพื้นที่ต่าง ๆ โดยอาจเกิดจากปัจจัยทางภูมิศาสตร์ เช่น ความสูงของพื้นที่ ทิศทางลม และลักษณะภูมิประเทศ
- **ความแปรปรวนเชิงเวลา** หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาต่าง ๆ เช่น รายวัน รายเดือน หรือรายปี ซึ่งเกี่ยวข้องกับฤดูกาลและสภาพภูมิอากาศ

2. การวัดและการเก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนมักถูกวัดโดยเครื่องมือที่เรียกว่า "เครื่องวัดน้ำฝน" (Rain Gauge) ซึ่งมีหลายประเภท เช่น เครื่องวัดน้ำฝนแบบถังตวง (Standard Rain Gauge) และเครื่องวัดน้ำฝนแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Tipping Bucket Rain Gauge)

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ถูกเก็บรวบรวมในช่วงเวลาต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะและแนวโน้มของน้ำฝนในพื้นที่นั้น ๆ

3. ความสำคัญของปริมาณน้ำฝนต่อการวิเคราะห์ความเสี่ยงน้ำท่วม

ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดน้ำท่วม โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ฝนตกหนักและต่อเนื่อง ปริมาณน้ำฝนที่สูงเกินกว่าความสามารถในการระบายน้ำของพื้นที่จะทำให้เกิดน้ำท่วมขังและน้ำหลาก

การศึกษาปริมาณน้ำฝนในบริเวณที่สนใจช่วยให้นักวิจัยและผู้วางแผนนำข้อมูลมาใช้ในการประเมินความเสี่ยงและวางแผนมาตรการป้องกันน้ำท่วมอย่างเหมาะสม

4. ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนในแต่ละพื้นที่ได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย ได้แก่

- สภาพภูมิอากาศและฤดูกาล
- ความสูงจากระดับน้ำทะเล (Altitude)
- ลักษณะภูมิประเทศ เช่น ภูเขา ทะเลสาบ และป่าไม้
- กระแสลมและทิศทางลมที่นำพาความชื้นเข้าสู่พื้นที่

Station	Station Name	Latitude	Longitude	Measure	DateTime (Myanmar Local time)	Temp Data	Rain Data	Province Name	Data Type Name	Station Type Name
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 00:00:00	00:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 01:00:00	01:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 02:00:00	02:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 03:00:00	03:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 04:00:00	04:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 05:00:00	05:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 06:00:00	06:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 07:00:00	07:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 08:00:00	08:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 09:00:00	09:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 10:00:00	10:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 11:00:00	11:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 12:00:00	12:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 13:00:00	13:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน
THA001	บ้านนาสาร	20.3913	99.6857	2025-04-26 14:00:00	14:00:00	0	0	นครศรีธรรมราช	ฝน 1 ชั่วโมง	วัดน้ำฝน

ภาพที่ 2.1 รูปตารางแสดงปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง ที่สถานีใจดาตา

การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ในการสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วม

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่และการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในหลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการจัดการภัยพิบัติ GIS ช่วยให้สามารถรวบรวม จัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเสี่ยงและองค์ประกอบของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบอย่างมีประสิทธิภาพ

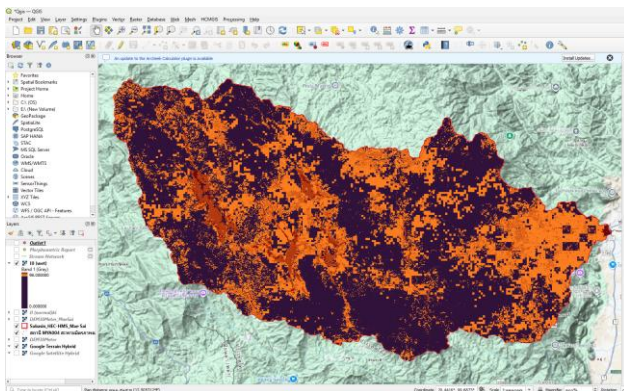
ในกรณีของการสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วม GIS ถูกนำมาใช้ในการรวบรวมข้อมูลหลายชั้น (Layers) เช่น ข้อมูลภูมิประเทศ ความสูงจากระดับน้ำทะเล (DEM), ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน, เครือข่ายลำน้ำ, ข้อมูลประชากร รวมถึงข้อมูลประวัติการเกิดน้ำท่วม เพื่อนำมาซ้อนทับและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่



เทคนิคหลักที่ใช้ใน GIS สำหรับการประเมินความเสี่ยงน้ำท่วม ได้แก่

- **Overlay Analysis** คือ การซ้อนทับชั้นข้อมูลหลายชั้นเข้าด้วยกัน เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเสี่ยงต่าง ๆ
- **Weighted Overlay** คือ การถ่วงน้ำหนักปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงน้ำท่วมแต่ละตัว เช่น ความสูง ความชัน ระยะทางจากแม่น้ำ และลักษณะการใช้ที่ดิน โดยกำหนดค่าน้ำหนักตามความสำคัญของแต่ละปัจจัย เพื่อสร้างแผนที่ความเสี่ยงที่มีความละเอียดและแม่นยำ

การใช้ GIS ทำให้การประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมมีความรวดเร็วและสามารถปรับปรุงข้อมูลได้ตามสถานการณ์จริง นอกจากนี้ GIS ยังช่วยในการสื่อสารข้อมูลระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านการนำเสนอแผนที่และข้อมูลเชิงพื้นที่ที่เข้าใจง่าย



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการทำแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมด้วย ArcGIS

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประสบปัญหาน้ำท่วมบ่อยครั้ง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูงและมีการพัฒนาเมืองอย่างรวดเร็ว งานวิจัยหลายชิ้นจึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือเพื่อการประเมินและจัดการความเสี่ยงน้ำท่วมโดยใช้เทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวิเคราะห์

งานวิจัยของนายสมชาย ใจดี (2563) มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมในจังหวัดเชียงใหม่ โดยนำเทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) มาใช้ในการรวบรวม วิเคราะห์ และสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นการประยุกต์ใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่หลักได้แก่

1.ข้อมูล Digital Elevation Model (DEM)

ซึ่งเป็นข้อมูลความสูงเชิงเลขของพื้นที่ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะภูมิประเทศ เช่น ความชันและทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมและการไหลของน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ

2.ข้อมูลปริมาณน้ำฝนย้อนหลัง

ข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยเฉพาะในฤดูฝน เพื่อระบุช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดน้ำท่วม

3.ข้อมูลการใช้ที่ดิน (Land Use)

ใช้เพื่อจำแนกประเภทพื้นที่ เช่น พื้นที่ชุมชน พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ และพื้นที่ราบลุ่ม ซึ่งแต่ละประเภทพื้นที่มีความไวต่อการเกิดน้ำท่วมแตกต่างกัน

โดยงานวิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์โดยการซ้อนทับข้อมูลชั้นต่าง ๆ ผ่านเทคนิค Weighted Overlay ในระบบ GIS โดยให้ค่าน้ำหนักกับปัจจัยแต่ละตัวตามความสำคัญต่อการเกิดน้ำท่วม เช่น พื้นที่ที่มีความสูงต่ำและใกล้แหล่งน้ำจะได้รับค่าน้ำหนักสูงกว่า

ผลการศึกษาพบว่า การใช้ GIS ในการประเมินความเสี่ยงน้ำท่วมช่วยให้สามารถจำแนกพื้นที่เสี่ยงได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากขึ้น ทั้งในระดับตำบลและชุมชน ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวางแผนการจัดการน้ำท่วม การออกแบบโครงสร้างป้องกันน้ำ การวางผังเมือง และการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ งานวิจัยยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่หลายชั้นและการประยุกต์ใช้เทคนิค GIS เป็นเครื่องมือหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการความเสี่ยงน้ำท่วมในพื้นที่ภูมิศาสตร์ที่ซับซ้อน เช่น จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีทั้งพื้นที่ราบลุ่มและภูเขาสูง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

- รวบรวมข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับอำเภอแม่สาย เช่น แผนที่ภูมิประเทศ ข้อมูลลักษณะภูมิอากาศ
- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมและการประยุกต์ใช้ GIS ในการวิเคราะห์ความเสี่ยง

3.2 การรวบรวมข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data)

- ข้อมูลความสูงเชิงเลข (DEM) ความละเอียด 30 เมตร เพื่อวิเคราะห์ลักษณะภูมิประเทศและความสูงเชิงเลข



- ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมง จากสถานีตรวจวัดบ้านโจดตา ระหว่างวันที่ 25 เมษายน 2568 (23:30 น.) ถึง 2 พฤษภาคม 2568 (23:00 น.)

3.3 การวิเคราะห์ลุ่มน้ำด้วย QGIS

- ใช้ข้อมูล DEM 30 เมตร เป็นข้อมูลหลักในการวิเคราะห์และสกัดลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำแม่สาย
- ดำเนินการกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำหลักและลุ่มน้ำย่อย (Watershed and Sub-basin Delineation)
- สกัดโครงข่ายลำน้ำ (Stream Network) และคำนวณพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับ HEC-HMS เช่น ความลาดชัน และพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย

3.4 การสร้างและจำลองแบบจำลองอุทกวิทยาด้วย HEC-HMS

- สร้าง Basin Model: นำเข้าพารามิเตอร์ทางกายภาพของลุ่มน้ำที่ได้จาก QGIS มาสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำใน HEC-HMS
- สร้าง Meteorologic Model: ป้อนข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงตามช่วงเวลาที่กำหนดเข้าสู่แบบจำลอง
- กำหนด Control Specifications: ตั้งค่าวันและเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของการจำลองให้สอดคล้องกับข้อมูลน้ำฝน
- Run Simulation: สั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณและจำลองสถานการณ์เพื่อสร้างกราฟน้ำท่า (Hydrograph) และหาค่าอัตราการไหลสูงสุด (Peak Flow) ณ จุดต่างๆ ที่สนใจ

3.5 การสร้างแผนที่น้ำท่วมและความเสี่ยงด้วย QGIS

- นำผลลัพธ์อัตราการไหลสูงสุดจาก HEC-HMS มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูล DEM ใน QGIS เพื่อประเมินขอบเขตและระดับความลึกของพื้นที่น้ำท่วม (Inundation Mapping)
- ใช้วิธีการ Weighted Overlay Analysis โดยนำชั้นข้อมูลพื้นที่น้ำท่วม (Hazard) มาซ้อนทับกับชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลประชากร (Exposure/Vulnerability) เพื่อจำแนกระดับความเสี่ยงน้ำท่วมออกเป็น 3 ระดับ: เสี่ยงสูง, เสี่ยงปานกลาง, และเสี่ยงต่ำ
- จัดทำแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมฉบับสมบูรณ์

3.6 การสรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะ

- วิเคราะห์ผลที่ได้จากแผนที่ ความเสี่ยงน้ำท่วมและสรุปข้อเสนอแนะในการบริหารจัดการน้ำท่วม

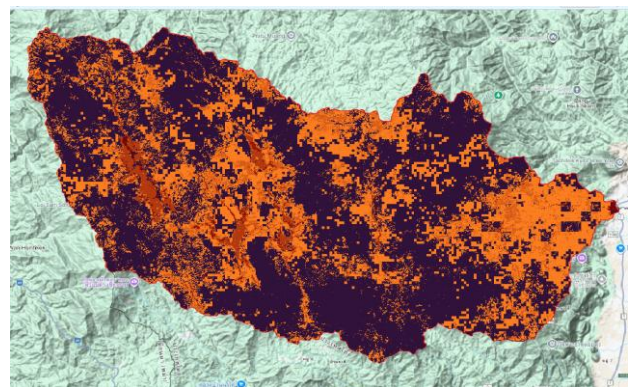
- วิเคราะห์ผลลัพธ์จากแผนที่ความเสี่ยง และเปรียบเทียบกับข้อมูลประวัติการเกิดน้ำท่วมในอดีต (ถ้ามี) เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือ
- สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายเพื่อการบริหารจัดการความเสี่ยงน้ำท่วมสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในอำเภอแม่สาย
- จัดทำรายงานวิจัยที่ประกอบด้วยบทนำ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ลุ่มน้ำด้วยโปรแกรม QGIS

การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ความละเอียด 30 เมตร ด้วยโปรแกรม QGIS สามารถกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำแม่สายได้อย่างชัดเจน ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดประมาณ **960.3 ตารางกิโลเมตร** โดยลุ่มน้ำมีลักษณะเป็นแอ่งรับน้ำที่ถูกล้อมรอบด้วยพื้นที่ภูเขาทางทิศเหนือและทิศตะวันตก และมีแม่น้ำสายเป็นลำน้ำหลักไหลจากทิศเหนือสู่ทิศใต้

การประมวลผล DEM ช่วยให้สามารถสกัดโครงข่ายลำน้ำ (Stream Network) และจำแนกพื้นที่ย่อยภายในลุ่มน้ำ (Sub-basin Delineation) เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง HEC-HMS โดยพื้นที่ราบลุ่มริมแม่น้ำและบริเวณใจกลางอำเภอแม่สายพบว่ามีค่าความสูงต่ำกว่า 400 เมตรจากระดับน้ำทะเล และมีแนวโน้มเกิดการสะสมของน้ำได้สูง



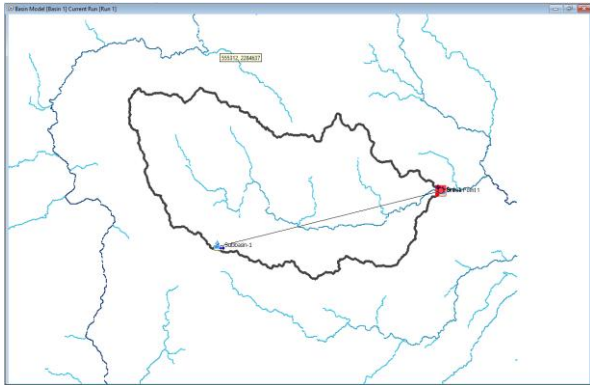
ภาพที่ 4.1 แผนที่จำแนกพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วม (Flood Risk Map)

จากผลการซ้อนทับข้อมูลใน QGIS (ภาพที่ 4.1) พบว่าพื้นที่เสี่ยงสูง (สีส้มเข้ม) กระจายตัวอย่างหนาแน่นในบริเวณที่ราบลุ่มริมแม่น้ำสาย พื้นที่ชุมชน และบริเวณใกล้ทางน้ำหลัก ในขณะที่พื้นที่เสี่ยงต่ำ (สีม่วงเข้ม) พบมากในบริเวณภูเขาและพื้นที่ลาดชัน



4.2 การสร้างแบบจำลองลุ่มน้ำในโปรแกรม HEC-HMS

จากการประมวลผลข้อมูล DEM ด้วยโปรแกรม QGIS ได้ทำการกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำและลำน้ำย่อย (Sub-basin) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวถูกนำเข้าในโปรแกรม HEC-HMS เพื่อสร้างแบบจำลองอุทกวิทยา โดยมีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย Subbasin, Reach, และ Outlet ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยเส้นทางการไหลของน้ำ (Flow Path) ตามแนวลำน้ำหลัก



ภาพที่ 4.2 แบบจำลองลุ่มน้ำแม่สายในโปรแกรม HEC-HMS
(แสดงองค์ประกอบของ Sub-basin, Outlet และเส้นทางการไหลของน้ำ)

จากภาพแสดงโครงสร้างของแบบจำลองลุ่มน้ำแม่สายภายในโปรแกรม HEC-HMS เวอร์ชัน 4.11 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

-เส้นสีน้ำเงิน แสดงถึงโครงข่ายลำน้ำหลักและลำน้ำสาขาภายในลุ่มน้ำแม่สาย ซึ่งได้มาจากข้อมูล DEM และกระบวนการ delineation ใน QGIS ขอบเขตสีดำ คือเส้นแสดงขอบเขตของลุ่มน้ำแม่สาย (Watershed Boundary)

-จุดสีน้ำเงิน (Subbasin-1) หมายถึงพื้นที่ย่อยที่ใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำท่า (Runoff Generation Area) ซึ่งมีพื้นที่รับน้ำรวมประมาณ 960.3 ตารางกิโลเมตร

-จุดสีแดง (Outlet Point-1) คือจุดระบายน้ำออก (Outlet) หรือบริเวณปลายน้ำของลุ่มน้ำ ซึ่งเป็นจุดตรวจวัดอัตราการไหลสูงสุดที่ได้จากผลการจำลอง

การสร้างแบบจำลองในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถจำลองกระบวนการไหลของน้ำฝนที่ตกลงบนพื้นที่รับน้ำ ตั้งแต่การซึมผ่านของน้ำ (Infiltration) การไหลบ่าผิวดิน (Surface Runoff) จนถึงการไหลรวมสู่ทางน้ำหลักที่จุดระบายน้ำออกได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนการนำข้อมูลไปคำนวณปริมาณน้ำท่าและวิเคราะห์ความเสี่ยงน้ำท่วมในขั้นตอนต่อไป

4.3 ผลการจำลองแบบจำลองอุทกวิทยาด้วย HEC-HMS

แบบจำลองอุทกวิทยา HEC-HMS ถูกสร้างขึ้นจากพารามิเตอร์ทางกายภาพของลุ่มน้ำที่ได้จาก QGIS โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายชั่วโมงจาก

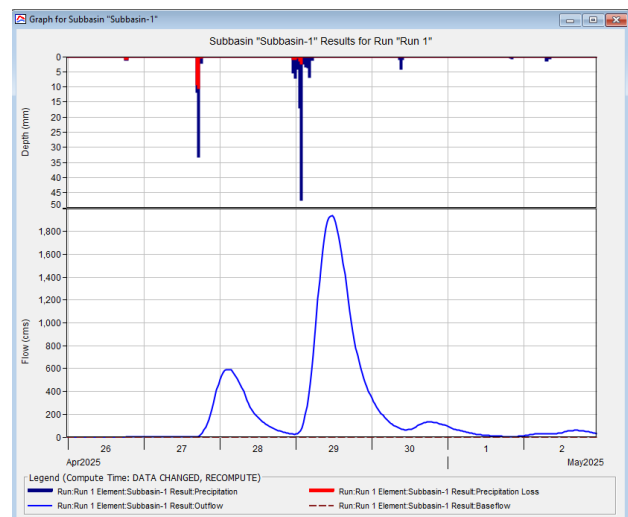
สถานีบ้านโจดตา ระหว่างวันที่ 25 เมษายน 2568 เวลา 23:30 น. ถึงวันที่ 2 พฤษภาคม 2568 เวลา 23:00 น.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Subbasin-1	960.3	1937.0	29 April 2025, 11:30	129294.9
Sink-1	960.3	1937.0	29 April 2025, 11:30	129294.9

ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองจากโปรแกรม HEC-HMS

ผลการจำลองจาก Runoff Simulation (Run 1) พบว่า

- พื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด: 960.3 ตารางกิโลเมตร
- ปริมาณฝนรวม: $185,098.6 \times 10^3 \text{ m}^3$
- ปริมาณน้ำท่า (Direct Runoff Volume): $129,294.9 \times 10^3 \text{ m}^3$
- อัตราการไหลสูงสุด (Peak Discharge): $1,937.0 \text{ m}^3/\text{วินาที}$
- เวลาที่เกิดอัตราการไหลสูงสุด: วันที่ 29 เมษายน 2568 เวลา 11:30 น.
- Loss Volume: $28,144.6 \times 10^3 \text{ m}^3$
- Baseflow Volume: $0.0 \times 10^3 \text{ m}^3$



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการไหลน้ำท่า จากแบบจำลอง HEC-HMS

จากกราฟ Hydrograph (ภาพที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าในช่วงวันที่ 28-29 เมษายน 2568 มีฝนตกหนักต่อเนื่อง ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดค่าสูงสุดในวันที่ 29 เมษายน 2568 ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ



4.4 การวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมและระดับความเสี่ยง

ผลการจำลองจาก HEC-HMS ถูกนำกลับไปวิเคราะห์ใน QGIS เพื่อสร้างแผนที่พื้นที่น้ำท่วม (Flood Inundation Map) และแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วม (Flood Risk Map) โดยจำแนกระดับความเสี่ยงออกเป็น 3 ระดับได้แก่

พื้นที่เสี่ยงสูง (High Risk): ครอบคลุมบริเวณที่ราบลุ่มริมแม่น้ำสาย พื้นที่ชุมชนในเขตเทศบาลแม่สาย และพื้นที่เกษตรกรรมที่อยู่ใกล้ลำน้ำ รวมพื้นที่ประมาณ 30% ของลุ่มน้ำทั้งหมด

พื้นที่เสี่ยงปานกลาง (Moderate Risk): พบบริเวณพื้นที่ชานเมือง และพื้นที่รอยต่อระหว่างภูเขาและพื้นที่ราบ คิดเป็นประมาณ 45%

พื้นที่เสี่ยงต่ำ (Low Risk): พบบริเวณภูเขาและพื้นที่ลาดชัน คิดเป็นประมาณ 25%

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลสภาพภูมิประเทศจริงและแนวการพัฒนาพื้นที่ โดยชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ชุมชนหนาแน่นและพื้นที่ริมแม่น้ำสายมีความเปราะบางต่ออุทกภัยสูงสุด

นอกจากนี้ ผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎีที่ระบุว่า พื้นที่ที่มีค่า DEM ต่ำและอยู่ใกล้ทางน้ำหลักจะมีความเสี่ยงสูงต่ออุทกภัย ซึ่งยืนยันความถูกต้องของกระบวนการจำลองในครั้งนี้

5. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมของอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย โดยใช้แบบจำลองอุทกวิทยา HEC-HMS ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ QGIS สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ลุ่มน้ำแม่สายมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 960.3 ตารางกิโลเมตร
2. เหตุการณ์ฝนตกหนักในช่วงวันที่ 25 เมษายน – 2 พฤษภาคม 2568 ทำให้เกิดอัตราการไหลสูงสุด 1,937.0 $\text{m}^3/\text{วินาที}$ และมีปริมาณน้ำท่ารวมประมาณ $129,294.9 \times 10^3 \text{ m}^3$
3. พื้นที่เสี่ยงสูงต่อการเกิดน้ำท่วมกระจุกตัวในบริเวณราบลุ่มริมแม่น้ำสาย โดยเฉพาะในเขตชุมชนใจกลางอำเภอ
4. พื้นที่เสี่ยงปานกลางและต่ำพบในบริเวณภูเขาและพื้นที่สูงทางตะวันตกและตะวันออกของลุ่มน้ำ
5. แบบจำลอง HEC-HMS และ QGIS สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์และสร้างแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมได้อย่างแม่นยำ

5.2 อภิปรายผล

ผลลัพธ์จากการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลพื้นที่จริงและแนวโน้มทางภูมิศาสตร์ โดยเฉพาะในเขตเทศบาลแม่สายซึ่งเป็นพื้นที่ราบต่ำ มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ทำให้เกิดการสะสมน้ำและระบายน้ำได้ช้า การใช้ QGIS ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ได้อย่างละเอียด และแบบจำลอง HEC-HMS สามารถคำนวณอัตราการไหลและปริมาณน้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของส่วนผสมหินโรยทางรถไฟและเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งาน

โดยเครื่องมือ Los Angeles Abrasion test และภาพถ่ายแบบ 3 มิติ

Waste tire-derived aggregates-ballast mixture degradation analysis by Los Angeles

Abrasion test and 3D image analysis method

เจษฎา สัตติวัน¹ ภาวิณี ธรรมอักษร² จิรภัทร ปัญญาวิชา³ และ สุริยาธู ประอ้าย⁴

^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 64102058@up.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยมีบทบาทสำคัญในการขนส่งผู้โดยสารและสินค้า ส่งผลให้โครงสร้างทางราง โดยเฉพาะชั้นหินโรยทาง (Ballast) ต้องรับน้ำหนักมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของหินโรยทางส่งผลต่อเสถียรภาพของทางรถไฟและเพิ่มต้นทุนการบำรุงรักษา งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการผสมเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานกับหินโรยทาง เพื่อเพิ่มความทนทาน ลดการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างทางราง

การศึกษานี้วิเคราะห์การเสื่อมสภาพของหินโรยทางผสมเศษยางที่มีรูปร่างและขนาดที่ต่างกัน ในสัดส่วน 0%, 5%, 15% และ 25% ผ่านการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) 100, 500 และ 1000 รอบ พร้อมตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาด้วย 3D Scanner และวิเคราะห์มุมการกอง เพื่อประเมินกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ผลการทดสอบพบว่า เศษยางรูปทรงลูกบาศก์ในสัดส่วน 15% เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมกับหินโรยทาง เนื่องจากสามารถลดค่าการสูญเสีย LAA ได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนได้ดีกว่าสามารถรับแรงเฉือนได้ดีกว่าเศษยางรูปทรงแท่งและเศษยางรูปทรงแผ่น การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การผสมเศษยางรถยนต์ในหินโรยทางสามารถเพิ่มความทนทาน ลดการสึกหรอ และมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างทางรางให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: หินโรยทาง, เศษยางรถยนต์, การสึกหรอ, มุมการกอง, Los Angeles Abrasion

Abstract

Currently, the railway transportation system in Thailand plays a crucial role in passenger and freight transport, leading to increased loads on railway structures, particularly ballast layers. However, ballast degradation affects track stability and increases maintenance costs. This study investigates the incorporation of

waste tire rubber into ballast material to enhance durability, reduce abrasion, and extend the service life of railway structures.

This research examines the degradation of ballast mixed with waste tire rubber of different shapes and sizes at proportions of 0%, 5%, 15%, and 25%. The materials were tested using the Los Angeles Abrasion (LAA) test at 100, 500, and 1000 revolutions, analyzed for morphological changes using a 3D scanner, and assessed for their angle of repose to evaluate shear strength characteristics. The results indicate that cube-shaped rubber at a 15% proportion is the most suitable choice for mixing with ballast, as it significantly reduces LAA loss and exhibits better shear strength performance than other rubber shapes. This study demonstrates that incorporating waste tire rubber into ballast can enhance durability, reduce abrasion, and influence the shear strength of the material. These findings may serve as a guideline for improving railway track structures, extending their service life, and mitigating environmental impacts.

Keywords: Ballast, Waste Tire Rubber, Abrasion, Angle of Repose, Los Angeles Abrasion

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยได้รับการออกแบบให้มีอายุการใช้งานยาวนาน ทำให้การก่อสร้างและบำรุงรักษาต้องคำนึงถึงต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (life cycle cost) โดยเฉพาะชั้นหินโรยทาง (ballast) ซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญในการกระจายน้ำหนักจากตัวรถไฟสู่ชั้นดินรองรับ อย่างไรก็ตาม หินโรยทางมีแนวโน้มเสื่อมสภาพจากแรงกระทำซ้ำๆ ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีต้นทุนสูง

ในปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุทางเลือก เช่น แผ่นรองใต้ราง (under sleeper pad, USP) และวัสดุสังเคราะห์ต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุน ขณะเดียวกันเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาจำนวนมาก ในรูปแบบของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tire-derived aggregates, TDA) เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ TDA ได้แก่ ความสามารถในการหน่วงพลังงานสูง (Energy damping) น้ำหนักต่อหน่วยต่ำและต้นทุนต่ำจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้เกิดแนวความคิดในการที่จะนำเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (end-of-life tires) มาเป็นส่วนผสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง นอกจากจะช่วยยืดอายุการใช้งานแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาขยะและเสนอทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม มีบางประเด็นที่ยังคงเป็นข้อถกเถียง เช่น ผลกระทบจากรูปร่างและขนาดของหินโรยทางที่มีต่อการเสื่อมสภาพและการเสีรูป รวมถึงการหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่สุดของเศษยางรถยนต์

ดังนั้นการศึกษานี้จะนำเสนอรูปแบบของศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยการวิเคราะห์ความทนทานต่อการสึกหรอของหินที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่ต่างกัน ภายใต้สภาวะแห้ง โดยใช้เครื่องทดสอบลอสแอนเจลิส (Los Angeles Abrasion, LAA) และการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาจากภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ นอกจากนี้ยังได้พิจารณามุมการกองของหิน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยทั่วไปหินที่มีมุมการกองสูงจะสามารถรับแรงเฉือนได้ดี ผลการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจถึง อิทธิพลของรูปร่าง ขนาด และสัดส่วนของเศษยางรถยนต์ ที่ผสมในหินโรยทางต่อความทนทานต่อการสึกหรอและกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความทนทาน ลดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ส่งผลให้โครงสร้างทางรางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นและมีต้นทุนการดำเนินงานที่คุ้มค่ากว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่ต่างกันต่อความทนทานต่อการสึกหรอของหินโรยทาง
2. เพื่อประเมินอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่ต่างกันต่อกำลังรับแรงเฉือนของหินโรยทางโดยพิจารณาจากมุมการกอง (angle of repose)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบ Los Angeles Abrasion เพื่อศึกษาการสึกหรอของตัวอย่าง และ 3D Scanner เพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยา และการทดสอบมุมการกองของหิน
2. ตัวอย่างของหินโรยทางที่นำมาจากแหล่งผลิต อ.แม่จัน จ.เชียงราย ในสภาพแห้ง
3. เศษยางรถยนต์ที่ไม่ใช่แล้วทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดประมาณ 2-3 cm, ทรงแผ่นที่มีขนาดประมาณ 4-5 cm และทรงแท่งขนาด 4-5 cm

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เกิดความเข้าใจผลกระทบของเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้วต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทางรถไฟ
2. แนวทางในการช่วยลดอายุการใช้งานของหินโรยทางรถไฟจากการใช้เศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสมในชั้นหินโรยทาง
3. แนวทางในการช่วยลดปัญหาขยะจากยางรถยนต์ ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการนำทรัพยากรที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หินโรยทางรถไฟ

หินโรยทาง (Ballast) เป็นโครงสร้างที่สำคัญของทางรถไฟ มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของทางรถไฟ วัสดุที่ใช้เป็นหินแข็ง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินปูน เศษหินและกรวด มีเหลี่ยมมุม มีการกระจายของขนาดสม่ำเสมอ (Uniform grade) มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน และมีความต้านทานต่อการขัดสี คุณสมบัติเฉพาะของหินโรยทางจำเป็นจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ คือ 1) ขนาดการกระจายและปราศจากการปนเปื้อนของเม็ดดินขนาดเล็กเพื่อให้มั่นใจว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีการระบายน้ำที่เหมาะสมของทางรถไฟ 2) เหลี่ยมมุมของหินที่คมจะทำให้เกิดความต้านทานแรงเฉือนที่ดีของชั้นหินโรยทาง 3) มีความต้านทานเชิงกลสูงต่อการสึกหรอเพื่อรักษามุมและลดการเกิดของอนุภาคเม็ดละเอียด 4) ความสม่ำเสมอของรูปร่าง ไม่ยาวหรือแบนเกินไป

สำหรับประเทศไทย ขนาดของหินโรยทางถูกกำหนดด้วยขนาดของตะแกรงร่อนคู่หนึ่งซึ่งมีขนาดช่องเปิดมีหน่วยวัดขนาดเป็นมิลลิเมตร หินโรยทางรถไฟที่นำมาทดสอบต้องสามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดใหญ่ที่สุดและค้างอยู่บนตะแกรงขนาดเล็กที่สุด ให้ขนาดใหญ่สุดของหินโรยทางรถไฟเป็น 63.5 มิลลิเมตร หรือ 50 มิลลิเมตร และขนาดเล็กสุดเป็น 31.5 มิลลิเมตร (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) การทดสอบการกระจายขนาดของหินโรยทางรถไฟให้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 136 หินโรยทางรถไฟสามารถแบ่งออกเป็น 6 ขนาดตามการกระจายขนาดอนุภาคของหิน การทดสอบความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักของหินโรยทางให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 29 หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่นให้พิจารณาเลือกใช้หินโรยทางรถไฟที่บดอัดตามมาตรฐาน ASTM C 29 แล้วได้ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ไม่น้อยกว่า 1200 Kg/m³

2.2 เครื่องทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)

เครื่องทดสอบลอสแอนเจลิส (Los Angeles Abrasion, LAA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษาความต้านทานการสึกหรอของหิน รวมถึงหินย่อย กรวดย่อย กรวดและวัสดุมวลรวมหยาบ (coarse aggregates) จากการกระแทกและเสียดสีกับลูกเหล็ก ในขณะที่ถังหมุนรอบตัวเองจะมีแผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกับผนังของถัง จะพาตัวอย่างทดสอบและลูกเหล็กกลิ้งขึ้นไปพร้อมๆ กัน เมื่อตัวอย่างทดสอบกับลูกเหล็กกลิ้งอยู่สูงขึ้นไปจะตกลงมากระแทกกับผนังด้านตรงข้ามในถังเหล็ก กระบวนการนี้จะทำไปเรื่อย ๆ

จนครบจำนวนรอบที่กำหนด เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของหินในการต้านทานการสึกหรอและการกระแทก แม้ว่าการทดสอบ LAA อาจจะไม่สามารถจำลองผลกระทบของสภาวะการรับแรงในทางสภาพจริงได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามผลของการทดสอบ LAA มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบกระแทกของหินโรยทางที่บรรจุในถังเหล็ก

โดยทั่วไปเครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA) จะใช้สำหรับหาค่าความต้านทาน การย่อยสลายเมื่อถูกขัดถู ขัดสีของ หิน กรวดและวัสดุผสมรวมหยาบ (coarse aggregates) สามารถหาค่าการสึกหรอได้จากสมการที่ 1

$$\text{ค่าการสึกหรอเป็นร้อยละ} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรง เบอร์ 12

โดยเครื่องมือทดสอบจะประกอบไปด้วยถังเหล็กรูปทรงกระบอกวางทางนอนปิดหัวท้ายทั้งสองด้าน ตามมาตรฐาน ASTM C131, C535 ในการทดสอบจะมีลูกเหล็กทรงกลม (abrasive charge) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 mm จำนวน 12 ลูก น้ำหนักรวม 5000 g รวมอยู่ในถังเหล็กพร้อมกับหินโรยทาง

2.3 เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT)

สำหรับการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดโดยการกำหนดลักษณะของวัสดุแต่ละก้อนนั้นไม่ว่าจะเป็นความเป็นทรงกลม การยืดออก และความแบนเรียบ Orosz et al. (2021) ได้อธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดด้วยเทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT) โดยพิจารณาพื้นผิวหน้าเรียบของอนุภาคหลายเหลี่ยมที่มีทั้งความนูน (convex) หรือเว้า (concave) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของที่มีเวกเตอร์พุ่งออกจากพื้นที่ผิวแต่ละด้านและถ่วงด้วยพื้นที่ผิวหน้าที่เวกเตอร์ ดังนั้น SOT จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$f_{ij} = \frac{1}{\sum_{(k)} A^{(k)}} \sum_{(k)} (A^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)}) \quad (1)$$

โดยที่ k คือจำนวนผิวหน้าของอนุภาค ในขณะที่ $A^{(1)}, A^{(2)} \dots A^{(k)}$ คือพื้นที่ของผิวหน้า และ $n^{(1)}, n^{(2)} \dots n^{(k)}$ คือเวกเตอร์ตั้งฉากในแต่ละผิวหน้า และกำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) $f_1 \geq f_2 \geq f_3$ โดยที่ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) ตัวแรก f_1 สะท้อนถึงการวางแนวที่อนุภาคส่วนใหญ่จะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน กรณีอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบน เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะตัวแรก f_1 คือการวางแนวของเวกเตอร์ปกติของผิวด้านใหญ่ทั้งสองด้าน สำหรับรูปหลายเหลี่ยมปกติ (เช่น ลูกบาศก์) ค่าลักษณะเฉพาะทั้งสามค่าจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่อนุภาคที่มี

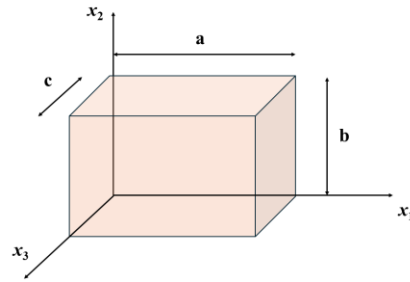
รูปร่างเป็นแท่งยาวและบางมาก ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด f_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ และจากค่าลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการกำหนดลักษณะของรูปแบบอนุภาคแต่ละขนาดได้ดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)} = \frac{f_3}{f_1} \quad (1.1)$$

$$\text{ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)} = \frac{f_1 - f_2}{f_1} \quad (1.2)$$

$$\text{ค่าความยาว (Elongation: E)} = \frac{f_2 - f_3}{f_1} \quad (1.3)$$

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ รูปที่ 1 จะแสดงอนุภาคในรูปของปริซึมลูกบาศก์และมีขนาดของระยะที่แตกต่างกันตามแนวแกน โดยที่ระยะ $a \geq b \geq c$ ลักษณะเฉพาะของพื้นผิวทั้งหกด้านสามารถแสดงได้ดังนี้:



รูปที่ 1 ลูกบาศก์ที่มีขนาดด้านต่างๆแตกต่างกันตามแนวแกน

จากข้อมูลข้างต้น เทนเซอร์ในแนวพื้นผิวจะสามารถแสดงในรูป

$$f = \frac{1}{a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c} \begin{bmatrix} b \cdot c & 0 & 0 \\ 0 & a \cdot c & 0 \\ 0 & 0 & a \cdot b \end{bmatrix} \quad (9)$$

และจากสมการ (6) - (8) ตัวบ่งชี้ลักษณะของรูปแบบอนุภาคจะสามารถเขียนในรูปของ

$$\text{ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)} = \frac{c}{a} \quad (6)$$

$$\text{ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)} = 1 - \frac{c}{b} \quad (7)$$

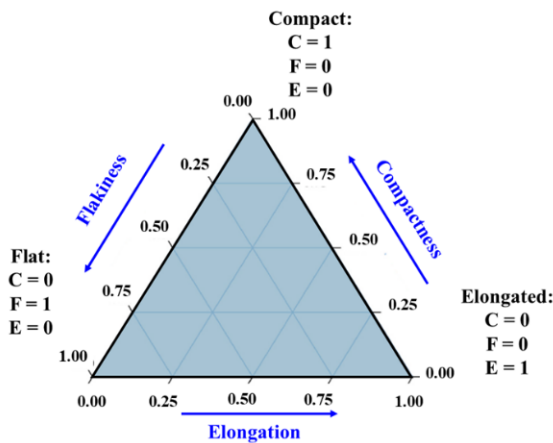
$$\text{ค่าความยาว (Elongation: E)} = \frac{c}{b} - \frac{c}{a} \quad (8)$$

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะตัวอย่างขอบเขตรูปแบบของอนุภาคในแต่ละรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่นกรณีปริซึมมีการยึดตัวในทิศทางของแกน โดยที่ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (C) ส่วนค่าความแบนเรียบ (F) จะมีค่าเท่ากับ และค่าความยาว E มีค่าเท่ากับ ซึ่งลักษณะรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดสามารถแสดงได้จากตำแหน่งบนแผนภาพสามแกน (ternary) โดย

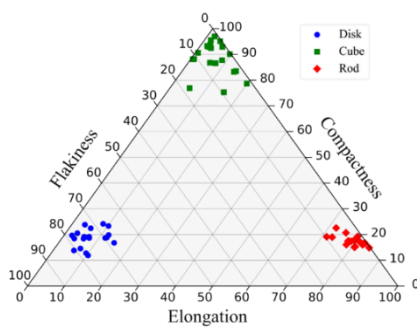
ใช้พิกัดของค่า C, F และ E ที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงถึงลักษณะรูปร่างของยางที่ใช้ในการทดสอบ

Geometry	Dimensions	Compactness (C)	Flakiness (F)	Elongation (E)
	$a \gg b=c$	0	0	1
	$a=b \gg c$	0	1	0
	$a=b=c$	1	0	0

ตารางที่ 1 ขอบเขตรูปแบบอนุภาค (ดัดแปลงจาก Orosz et al., 2021)



รูปที่ 2 แผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด



รูปที่ 3 แผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของเศษยาง

2.4 กล้อง 3D laser scanner

กล้อง 3D laser scanner เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D) ของวัตถุหรือพื้นที่ด้วยความแม่นยำสูง โดยใช้เทคโนโลยีการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งกระบวนการทำงานของกล้องนี้อาศัยหลักการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับเข้าสู่เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนกล้อง การวัดระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางไปกลับ ทำให้กล้องสามารถคำนวณระยะทางได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ในส่วนของการทำงาน กล้องจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปยังวัตถุและรับข้อมูลที่สะท้อนกลับเข้ามา ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นชุดของจุด

ข้อมูลที่เรียกว่า “point cloud” ซึ่งเป็นชุดของจุดจำนวนมากที่แสดงตำแหน่งเชิงพิกัดในระบบสามมิติ ข้อมูลนี้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างภาพโครงสร้างของวัตถุที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติได้ กล้อง 3D Scan Laser ได้รับความนิยมในหลายสาขา เช่น วิศวกรรม, การสำรวจ, สถาปัตยกรรม, และการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ ความแม่นยำในการวัด, ความเร็วในการสแกน, และความสามารถในการประมวลผลข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการการวัดรายละเอียดอย่างละเอียด เช่น การสร้างแผนผังอาคาร, การตรวจสอบโครงสร้างทางวิศวกรรม หรือการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดของวัตถุที่มีความซับซ้อน ในเชิงทฤษฎี กล้อง 3D Scan Laser ทำงานโดยอาศัยหลักการ “Time of Flight” ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางจากกล้องไปยังวัตถุและสะท้อนกลับเข้ามา กล้องจะคำนวณระยะทางของแต่ละจุดจากข้อมูลนี้ และนำมาสร้างภาพสามมิติของวัตถุ ข้อมูลที่ได้จากการสแกนมีความละเอียดสูง ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการประมวลผลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การนำยารถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานมาใช้งานวิศวกรรมโยธาได้เป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัย [3] มุ่งเน้นการศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมด้วยวัสดุใน CR (Concrete Rubber) โดยอ้างอิงจากการทดสอบ LAA และการวิเคราะห์ภาพสามมิติเพื่อประเมินผลกระทบของส่วนผสม CR ต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ซึ่งผลการศึกษพบว่า การเพิ่มปริมาณ CR สามารถช่วยลดการสึกหรอของหินโรยทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วน CR เกิน 10% จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการแตกหักของหินโรยทาง นอกจากนี้ในงานวิจัย [4] และ [9] มีการทดสอบความทนทานและการสึกหรอของหินโรยทางโดยใช้เครื่องทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคหินโรยทางหลังการทดสอบโดยอิงจากภาพสามมิติเพื่อวัดการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของหินโรยทางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปร่างและขนาดของหิน นอกจากนี้ การใช้เทคโนโลยีการสแกนสามมิติ (3D scan) ในงานวิจัยที่ [3], [4] และเอกซ์เรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟีในงานวิจัยที่ [6] ยังช่วยประเมินการเสื่อมสภาพของหินโรยทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การตรวจสอบรอยแตกขนาดเล็กที่อาจมีอยู่ก่อนการทดสอบยังเป็นประเด็นที่ต้องการการวิจัยเพิ่มเติม สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของหินในงานวิจัย [5] แนะนำวิธีการวิเคราะห์มุมที่ช่วยตรวจสอบและจำแนกหินรองรางตามระดับการเสื่อมสภาพได้ดีกว่าเดิม อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มเติมควรพิจารณาการใช้ตัวอย่างที่หลากหลายและจำนวนมากขึ้นเพื่อยืนยันผลลัพธ์

ดัชนีความแบน ยาว กลม และนูนของหินบัสลาสต์ ถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความแข็งแรงและความคงทนของหิน โดยจากงานวิจัย [1] ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ในขณะที่งานวิจัย [2] เสนอแนะดัชนีใหม่ที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วย Zingg Diagram มีความ

สมมาตรตามแนวเส้นแบ่งครึ่งของกราฟ ทำให้การตีความค่าของดัชนีเหล่านี้น่าสนใจขึ้น งานวิจัย [7] และ [8] แสดงให้เห็นว่าหินที่มีรูปร่างแบนและยาวมีแนวโน้มที่จะสึกหรอเร็วกว่าเนื่องจากพื้นที่สัมผัสกับแรงกระแทกมากกว่า ในขณะที่หินที่มีลักษณะกลมมนมีความทนทานต่อแรงเสียดทานได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานและความทนทานของหินบดลาสต์

เทคนิคการวัดมุมการลาดตัวได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดอคติที่เกิดจากการเลือกพื้นที่ลาดตัวโดยอาศัยดุลยพินิจ งานวิจัย [10] นำเสนอเทคโนโลยีสแกนสามมิติเพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการวัดมุมการลาดตัวของโอบอแมส ขณะที่งานวิจัย [11] ได้พัฒนาอัลกอริธึม aMAoR ซึ่งสามารถลดอคติจากความคิดเห็นส่วนตัวและเพิ่มความแม่นยำในการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM)

ในแง่ของผลกระทบของรูปร่างอนุภาค งานวิจัย [12] พบว่า ความเว้าของอนุภาคมีผลต่อมุมการลาดตัวและความพรุนของวัสดุ โดยอนุภาคที่มีความแหลมมุมสูงและเว้าจะให้ผลแตกต่างจากอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมนทั่วไป นอกจากนี้ งานวิจัย [13] ได้พัฒนาเทคนิคโฟโตแกรมเมตรีแบบ 3 ซึ่งให้ผลการวัดที่แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม โดยลดอิทธิพลของความเบี่ยงเบนจากรูปร่างของกองวัสดุ

สำหรับการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่องบนชั้นหินรอยทาง งานวิจัย [14] ใช้การทดสอบมุมการลาดตัวร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบหลายพารามิเตอร์ (Multi-Parameter Response Surface Method) โดยออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken Design เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของสัมประสิทธิ์การคืนตัว (0.72), สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (0.56), และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขณะหมุน (0.27) ผลการศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้วช่วยให้การจำลอง DEM มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้กับงานวิศวกรรมทางรถไฟได้จริง

นอกจากนี้ งานวิจัย [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างอนุภาคต่อมุมการลาดตัวโดยใช้การทดสอบ Hopper Flow Test และ DEM ผลการศึกษาพบว่า มุมการลาดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเสียดทานและความขรุขระของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยอนุภาคทรงลูกบาศก์มีมุมการลาดตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสัดส่วนอยู่ระหว่าง 1.0–1.67 ขณะที่อนุภาคทรงรีมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่ Aspect Ratio ≈ 1.3 ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุเม็ดเล็กในระดับจุลภาคและมหภาคได้ดียิ่งขึ้น

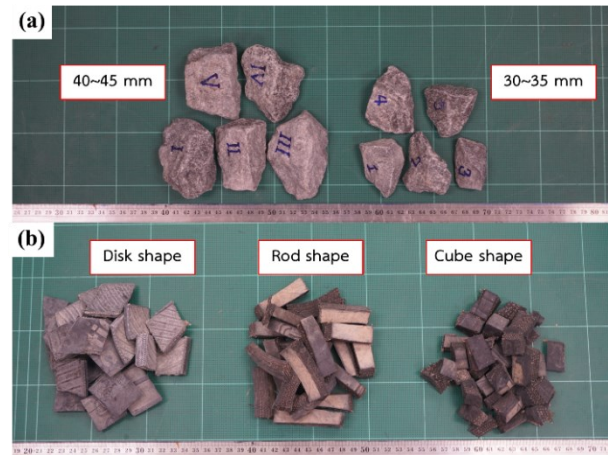
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบการกระจายขนาดผลของหินรอยทาง

ตัวอย่างหินรอยทางขนาดใหญ่สุดที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ในที่นี้จะใช้ 30 กิโลกรัม เพื่อจะใช้ดำเนินการทดสอบหาขนาดมวลผล (Sieve Analysis) ของหินรอยทางจริงในสนามตามมาตรฐาน มทข.(ท) 101.1-2545 วิธีการทดสอบหาส่วนผลของวัสดุมวลรวม (Aggregate)

3.2 วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษารุ่นนี้ได้ทำการทดสอบหินรอยทางขนาด 40-45 มม. และขนาด 30-35 มม. เศษยางรถยนต์ที่มีรูปแบบต่าง ๆ 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น, ยางทรงแท่ง, และยางทรงลูกบาศก์ จากรูปที่ 4 แสดงรูปร่างลักษณะของยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบโดยมีรายละเอียดขนาดและรูปร่างดังนี้ ยางทรงแผ่น ยางทรงแท่ง และ ยางทรงลูกบาศก์จะมีขนาดโดยประมาณ $35 \times 35 \times 8$ มม.³, $60 \times 10 \times 10$ มม.³ และ $15 \times 15 \times 15$ มม.³ ตามลำดับ



รูปที่ 4 รูปร่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ a) ตัวอย่างหินบดลาสต์ b) เศษยางรถยนต์รูปแบบต่างๆ

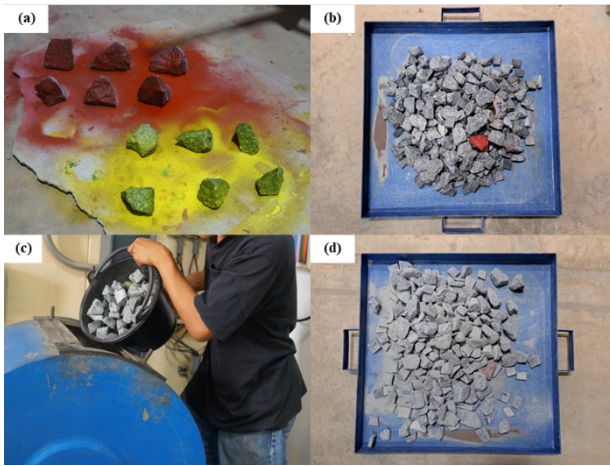
ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่สภาพแห้ง นำหินรอยทางแช่ล้างสิ่งปนเปื้อนด้วยน้ำและทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3 วิธีการทดสอบการเสื่อมสภาพหินรอยทาง

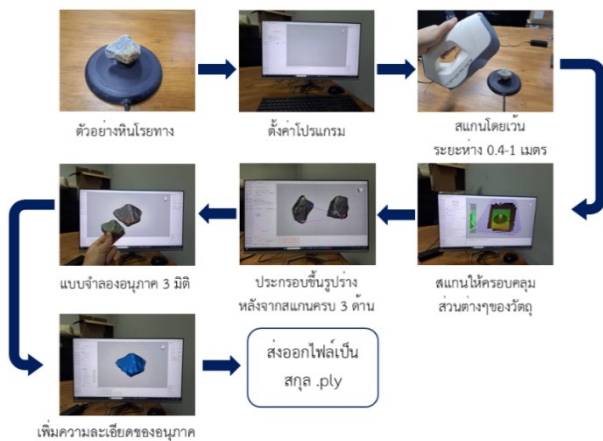
สำหรับการทดสอบหินรอยทางในสภาพแห้ง เริ่มต้นด้วยการนำตัวอย่างหินออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงเป็นระยะเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการจัดเตรียมชุดตัวอย่างวัสดุหินรอยทางชุดละ 10 กิโลกรัม ต่อมาสุ่มเลือกหินรอยทางจากแต่ละชุดจำนวน 6 ก้อน แบ่งเป็นขนาด 40-45 มม. และ 25-30 มม. ขนาดละ 3 ก้อน โดยพ่นสีและทำสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 5 a) หลังจากนั้นทำการสแกนหินก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA)

ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมชุดตัวอย่างโดยผสมเศษยางเข้ากับหินรอยทางในสัดส่วน 0%, 5%, 15%, และ 25% ของปริมาตรวัสดุในแต่ละชุด ดังรูปที่ 5 b) จากนั้นนำชุดตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ LAA โดยตั้งค่าความเร็วรอบที่ 30-33 รอบต่อนาที ใช้ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูกในการทดสอบและทำการหมุนเครื่องที่จำนวนรอบ 100, 500, และ 1000 รอบตามลำดับ ดังรูปที่ 5 c)

เมื่อหมุนครบจำนวนรอบที่กำหนดให้นำชุดตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 5 d) แล้วใช้ผ้าเช็ดทำความสะอาดเศษฝุ่นที่ติดอยู่บนตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าการสึกหรอ โดยวัดน้ำหนักเฉพาะวัสดุที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 12



รูปที่ 5 วิธีการทดสอบการเสื่อมสภาพหินโรยทาง a) การพ่นสีและสัญลักษณ์ตัวอย่าง b) ตัวอย่างหินก่อนทดสอบ c) ตัวอย่างหินในเครื่องทดสอบ d) ตัวอย่างหินหลังทดสอบ



รูปที่ 6 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่องสแกนสามมิติ

3.4 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ

เครื่องมือสแกนสามมิติที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้เป็นรุ่น ArtecEva ซึ่งเป็นเครื่องสแกนที่สามารถจับภาพวัตถุที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก มีความแม่นยำของจุด 3D เท่ากับ 0.1 mm มีระยะการทำงาน 0.4-1 m และระยะการจับปริมาตร 61,000 cm³ โดยภาพที่บันทึกได้จะมีการประมวลผลด้วยโปรแกรม Artec Studio 17 ดังแสดงในรูปที่ 6

การศึกษาค้างนี้จะใช้เครื่องมือสแกนสามมิติในการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของหินโรยทางรถไฟด้วยภาพสามมิติ หลังจากทดสอบ LAA เสร็จสิ้น จะนำตัวอย่างหินที่เป็นตัวแทนของชุดทดสอบมาทำการสแกนอีกครั้ง เพื่อประเมินพัฒนาการของการสึกหรอในแต่ละรอบการหมุน ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลเริ่มต้นด้วยการใช้โปรแกรม Artec Studio 17 สำหรับการสแกนหิน โปรแกรมนี้มีความสามารถในการสร้างโมเดลสามมิติของวัตถุ ช่วยให้สามารถคำนวณทั้งปริมาตรและพื้นที่ผิวของหิน ดังแสดงใน รูปที่ 5 หลังจากการสแกนเสร็จสิ้น ข้อมูลจะถูกส่งออกในรูปแบบไฟล์ .ply ซึ่งเป็น

ไฟล์มาตรฐานสำหรับเก็บข้อมูลโมเดลสามมิติ จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม MeshLab ซึ่งมีความสามารถในการตรวจสอบเชตที่แสดงถึงการสึกหรอของพื้นผิวหิน โปรแกรมนี้จะแสดงผลเป็นภาพที่แสดงการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวหินอย่างชัดเจน ทำให้สามารถเปรียบเทียบและประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างก่อนและหลังการทดสอบได้

3.5 การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างหินบอลลาสต์กับแผ่นพื้นไม้

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมแรงกระแทกที่เกิดจากการไหลของวัสดุ เราใช้ค่าตัวเลขไร้มิติ ได้แก่ Froude Number (Fr) และ Savage Number (Sn) เพื่อศึกษาสถานะการไหลและปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของวัสดุ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การไหลของหินโรยทางเปล่า และหินที่ผ่านการหมุน LAA 500 1000 รอบ โดยหินจะผสมยาง ในอัตราส่วน 0% 5% 15% และ 25% ของปริมาตรหิน

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการไหลของ หิน Ballast คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ระหว่างวัสดุและพื้นผิว เพื่อศึกษาคุณสมบัตินี้ เราได้ทำการทดสอบโดยนำ หินโรยทางมาปล่อยให้ไหลบนพื้นผิวที่ทำจาก แผ่นไม้กระดาน แล้ววัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมการเสียดสีและการชนกันของอนุภาคได้ดีขึ้น

Example	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน									
	0%	Cube_5%	Disk_5%	Rod_5%	Cube_15%	Disk_15%	Rod_15%	Cube_25%	Disk_25%	Rod_25%
Fresh	0.46	0.44	0.44	0.44	0.46	0.47	0.44	0.45	0.43	0.42
LAA_500	0.44	0.44	0.46	0.46	0.44	0.45	0.44	0.44	0.45	0.45
LAA_1000	0.45	0.39	0.44	0.44	0.45	0.46	0.46	0.44	0.45	0.46

ตารางที่ 2 ผลการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างหินบอลลาสต์กับแผ่นพื้นไม้

3.6 การทดสอบมุมการกอง

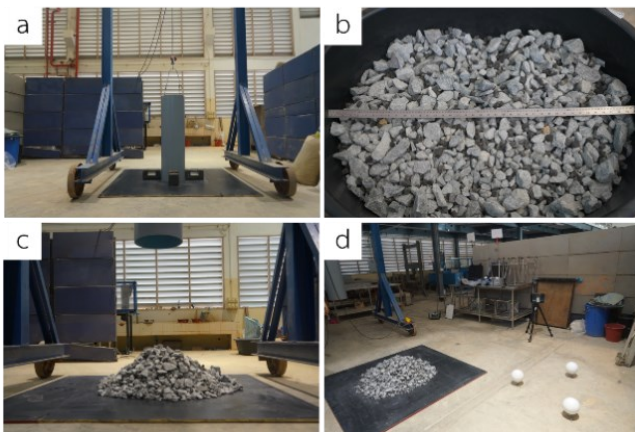
การทดสอบในครั้งนี้ใช้ยางรถยนต์ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น, ยางทรงแท่ง, และยางทรงลูกบาศก์ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) 500 1000 รอบ ซึ่งมีการสึกหรอไปบางส่วน และตัวอย่างหินที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ ซึ่งยังคงสภาพสมบูรณ์ การทดสอบแต่ละตัวอย่างจะถูกดำเนินการ 3 ครั้ง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างหินโรยทาง ซึ่งแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ หินที่ผ่านการทดสอบ LAA 500,1000 รอบ และหินที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ LAA หินทั้งสามกลุ่มจะถูกล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นปล่อยให้แห้งสนิทเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบในขั้นตอนถัดไป หลังจากนั้นจะทำการเตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นรองหิน กระบอกเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และรอกสำหรับยกกระบอกเหล็กขึ้นสูงเพื่อใช้ในการทดสอบ ดังแสดงใน รูปที่ 7 a)

ในขั้นตอนถัดมา หินจะถูกแบ่งเป็น 4 ตัวอย่าง ได้แก่ หินที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์กับหินที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วน 5% 15% 25% ของ

ปริมาตรหิน ดังแสดงใน รูปที่ 7 b) จากนั้น ตัวอย่างจะถูกใส่ลงในกระบอกเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ปริมาณหินมีความสูงเป็น 3 เท่าของความสูงของกระบอกเหล็ก จากนั้นใช้รอกยกกระบอกเหล็กขึ้นสูงแล้วปล่อยให้หินตกลงมากองบนแผ่นรองหินในลักษณะที่เป็นอิสระ ดังแสดงใน รูปที่ 7 c)

ในแต่ละรอบของการทดสอบ จะใช้กล้อง 3D laser scan ที่มีความละเอียดสูงในการบันทึกภาพสามมิติของกองหินที่เกิดขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 7 d) โดยกล้องสามารถจับรายละเอียดของโครงสร้างพื้นผิวและมุมการกองของหินได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลที่ได้รับจากการสแกนจะถูกนำไปประมวลผลในโปรแกรม Autodesk Recap และโปรแกรม Matlab ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณมุมการกองของหินภายใต้สภาวะการทดสอบต่าง ๆ การวิเคราะห์นี้จะช่วยประเมินผลกระทบของเศษยางรถยนต์ต่อพฤติกรรมการกองของหิน และสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างหินได้



รูปที่ 7 การทดสอบมุมการกอง a) ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ
b) ตัวอย่างหินผสมเศษยางรถยนต์ c) กองหินที่ได้จากการทดสอบ
d) การใช้กล้อง 3D laser scan ในการบันทึกภาพสามมิติของกองหิน

4. ผลการศึกษา

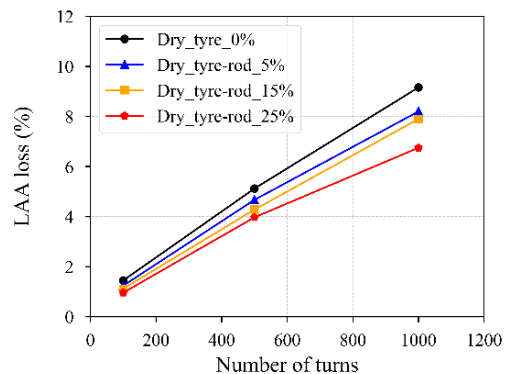
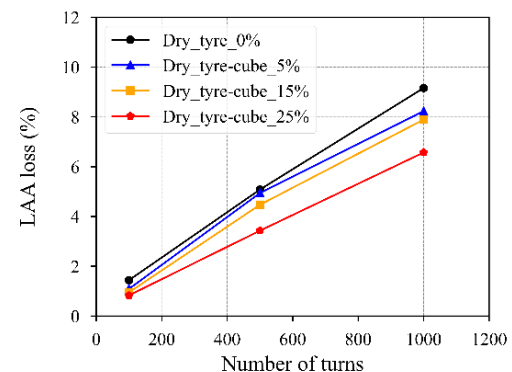
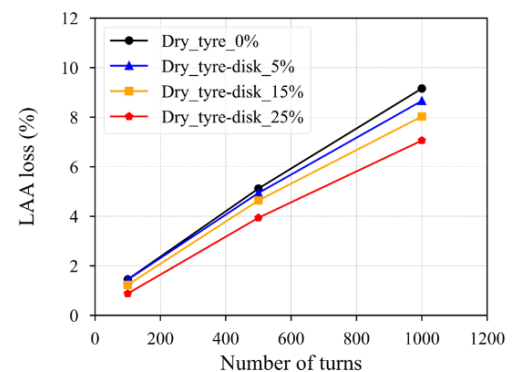
4.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของหินบัสลาสต์

จากผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์ในหินโรยทางช่วยลดค่าการสูญเสีย LAA หรืออัตราการสึกหรอของหินได้อย่างชัดเจน โดยแนวโน้มโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเศษยางเพิ่มขึ้นค่าการสูญเสีย LAA จะลดลง ซึ่งหมายความว่าเศษยางสามารถช่วยลดการแตกหักและเสียดสีของหินได้

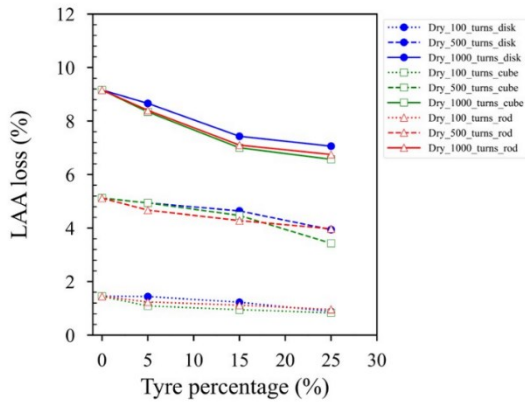
การทดสอบนี้เปรียบเทียบการใช้เศษยาง 3 รูปแบบ ได้แก่ ทรงแผ่น, ทรงลูกบาศก์ และ ทรงแท่ง ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0% , 5%, 15% และ 25% โดยทำการทดสอบภายใต้รอบการหมุนที่แตกต่างกัน 100 500 และ 1000 รอบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหินที่ไม่มีการผสมเศษยางเลย (0%) มีค่าการสูญเสีย LAA สูงที่สุด หมายความว่าหินเกิดการสึกหรอมากที่สุดเมื่อไม่มีเศษยางช่วยลดแรงกระแทก

เมื่อเปรียบเทียบ ชนิดของเศษยาง พบว่า เศษยางแบบแท่ง และลูกบาศก์ ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้งสองชนิดสามารถช่วยลดค่าการสูญเสีย LAA ได้มากกว่าเศษยางแบบแผ่นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษยางรูปแท่งยาว และลูกบาศก์มีประสิทธิภาพในการช่วยลดแรงกระแทกและการสึกหรอของหินได้ดีกว่า ในขณะที่เศษยางแบบแผ่นมีค่าการสูญเสียสูงที่สุดในทุกรอบการหมุน ซึ่งอาจเป็นเพราะรูปทรงของมันไม่สามารถช่วยลดแรงกระแทกได้ดีเท่ากับเศษยางรูปทรงอื่น ๆ

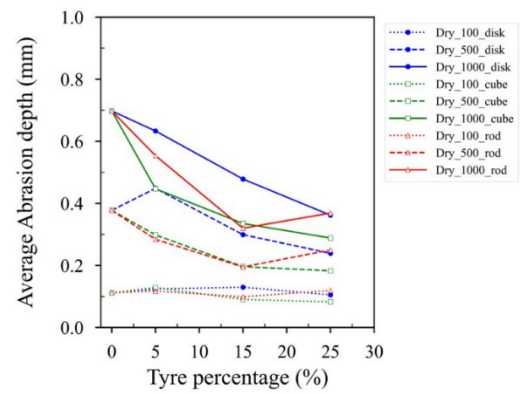
นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น (จาก 100 → 500 → 1000 รอบ) ค่าการสูญเสีย LAA ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากหินได้รับแรงเสียดสีและกระแทกมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางยังคงช่วยลดค่าการสึกหรอได้ในทุกกรณีแม้ในรอบการหมุนที่สูงขึ้น



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การสึกหรอกับจำนวนรอบการทดสอบ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การสึกหรอกับเปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์



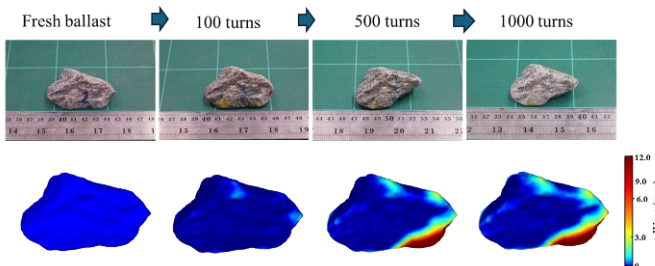
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเฉลี่ยของการสึกหรอน กับ ปริมาณเศษยางรถยนต์

4.2 ผลการประเมินสัมพันธภาพของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพ ที่ได้จากการสแกนสามมิติ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเฉลี่ยของการสึกหรอ (Average Abrasion Depth) กับปริมาณเศษยางรถยนต์ ดังรูปที่ 11 พบว่าในช่วงแรกค่าความลึกของการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง โดยเฉพาะในสัดส่วน 5% และ 15% ซึ่งอาจเป็นผลจากคุณสมบัติของยางที่ช่วยดูดซับแรงกระแทกและลดแรงเสียดทานภายในวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นในสัดส่วน 25% ค่าการสึกหรอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในบางกรณีซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของวัสดุที่เริ่มอ่อนตัวลง หรือความสามารถในการยึดเกาะของอนุภาคลดลงส่งผลให้วัสดุเกิดการสึกหรอได้มากขึ้น

เมื่อตรวจสอบผลกระทบของรอบการหมุนในเครื่อง LAA จากรูปที่ 10 พบว่าค่าการสึกหรอมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่ผ่านการหมุน 1000 รอบมีค่าความลึกของการสึกหรอสูงที่สุด รองลงมาคือ 500 รอบ และต่ำสุดคือ 100 รอบ แสดงให้เห็นว่าการหมุนในรอบที่สูงขึ้นทำให้วัสดุเกิดการแตกหักและสึกหรอมากขึ้น

นอกจากนี้รูปร่างของยางที่ผสมลงไปยังมีอิทธิพลต่อค่าการสึกหรอ โดยพบว่ายางรูปทรงลูกบาศก์ช่วยลดค่าการสึกหรอได้มากที่สุด รองลงมาคือยางรูปทรงแท่ง และสูงสุดคือยางรูปทรงแผ่น อาจเนื่องจากยางรูปทรงลูกบาศก์สามารถเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุได้ดี ในทางตรงกันข้ามเศษยางรูปทรงแผ่นซึ่งมีลักษณะแบนราบ อาจทำให้โครงสร้างวัสดุอ่อนตัวลงและสูญเสียความเสถียร ส่งผลให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น



รูปที่ 10 พัฒนาการการสึกหรอของหินโรยทางจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยภาพสามมิติ

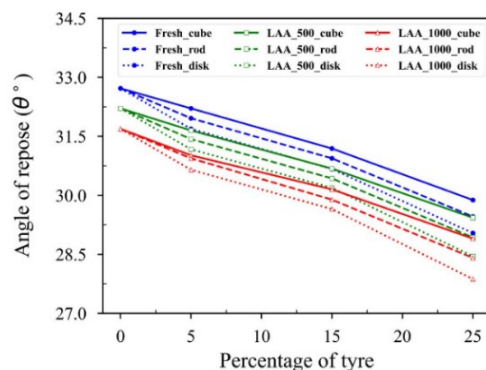
4.3 ผลการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางกับเปอร์เซ็นต์ยางรถยนต์ในสัดส่วนผสมต่างๆ

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่ามุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือวัสดุที่ไม่มีการผสมยางสามารถกองตัวได้ที่มีมุมสูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง มุมของกองวัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้วัสดุไหลตัวได้ดีขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง จะพบว่าสัดส่วนยางที่ 15% ให้ผลที่ดีที่สุด

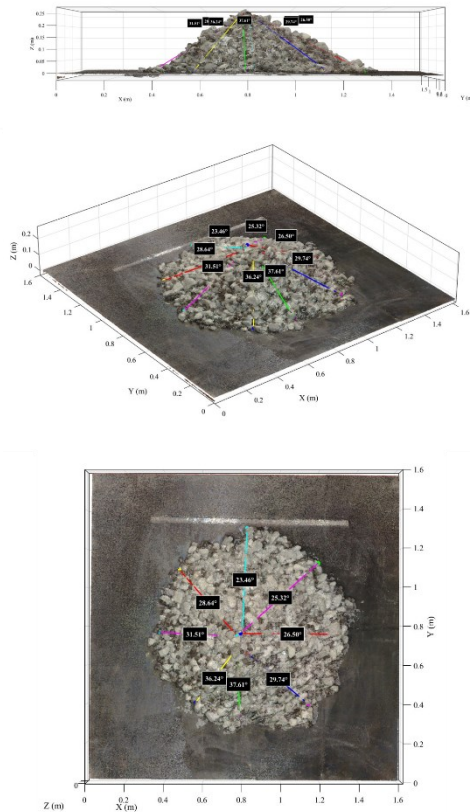
นอกจากนี้วัสดุที่ผ่านการหมุนในเครื่อง LAA มากขึ้นที่ 500 และ 1000 รอบ มีมุมการกองที่ลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ผ่านการหมุน (Fresh) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่พื้นผิวของอนุภาคมีความเรียบขึ้นและขอบคมลดลง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง ส่งผลให้วัสดุสามารถไหลตัวได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างของยาง พบว่ายางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมาคือยางรูปทรงแท่ง และต่ำสุดคือยางรูปทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่ายางที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม ลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุดสามารถสร้างแรงต้านทานการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดี ลดการเลื่อนตัวของอนุภาค ในทางกลับกัน ยางรูปทรงแผ่นมีมุมการกองต่ำที่สุดเนื่องจากมีพื้นผิวแบนราบ ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบซ้อนทับกัน ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น

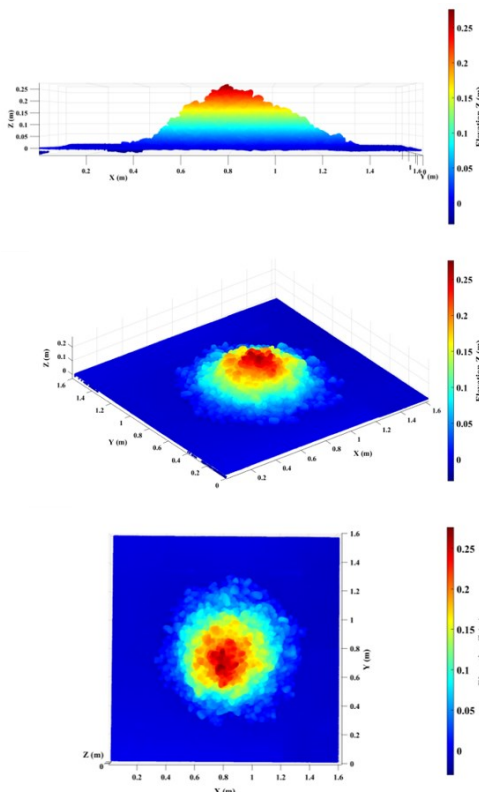
สามารถดูตัวอย่างมุมการกองของหินโรยทางและเฉดสีความสูงของกองหินได้ ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการกองของหินโรยทางกับปริมาณยางรถยนต์ในสัดส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 13 มุมการกองของหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม Matlab



รูปที่ 14 เlevation ความสูงของกองหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม Matlab

5.สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบของการเติมเศษยางรถยนต์ในหินโรยทางต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของวัสดุ โดยพิจารณา ค่าการสูญเสีย LAA (Los Angeles Abrasion Loss) ความลึกของการสึกหรอ และมุมการกองของวัสดุจากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การผสมเศษยางรถยนต์ในปริมาณที่เหมาะสม ในสัดส่วนที่ 15% โดยใช้เศษยางทรงลูกบาศก์ สามารถช่วยลดค่าการสูญเสีย LAA ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของเศษยางในการดูดซับแรงกระแทกและลดแรงเสียดทานภายในวัสดุ ทำให้หินโรยทางมีความทนทานต่อการสึกหรอมากขึ้น

นอกจากนี้ชนิดของเศษยางที่ใช้ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดการสึกหรอของหิน โดยเศษยางรูปทรงลูกบาศก์ และทรงแท่ง ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเศษยางรูปทรงแผ่น เนื่องจากสามารถเสริมโครงสร้างของวัสดุได้ดีและช่วยลดแรงกระแทกได้มีประสิทธิภาพมากกว่า ในขณะที่เศษยางรูปทรงแผ่นมีแนวโน้มทำให้วัสดุอ่อนตัวลง ส่งผลให้ค่าการสึกหรอสูงขึ้น

สำหรับค่าความลึกเฉลี่ยของการสึกหรอ (Average Abrasion Depth) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเศษยางในสัดส่วน 5% และ 15% ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าการสูญเสีย LAA อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษยางในสัดส่วน 25% ค่าการสึกหรอกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในบางกรณี

ในด้านผลกระทบจากการอบการหมุนของเครื่อง LAA พบว่าวัสดุที่ผ่านการหมุนมากขึ้นมีค่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะที่ 1000 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกระแทกและแรงเสียดทานที่มากขึ้นทำให้วัสดุมีโอกาสแตกหักและสึกกร่อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมเศษยางในปริมาณที่เหมาะสมยังสามารถช่วยลดผลกระทบของการสึกหรอได้

จากผลการทดสอบมุมการกองของหินโรยทาง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเศษยางเพิ่มขึ้น มุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้วัสดุสามารถไหลตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางพบว่าสัดส่วนยางที่ 15% ให้ผลที่ดีที่สุด นอกจากนี้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงสุด รองลงมาคือทรงแท่ง และต่ำสุดคือทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่า เศษยางรูปทรงลูกบาศก์สามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่ายางรูปทรงแท่งและเศษยางรูปทรงแผ่น เนื่องจากมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด สามารถล็อกตัวเข้ากับอนุภาคของหินได้ดี ลดการเคลื่อนตัวของวัสดุ และช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างโดยรวม

ดังนั้นการใช้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์ในสัดส่วน 15% จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการผสมกับหินโรยทาง เนื่องจากสามารถลดค่าการสูญเสีย LAA ได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรับแรงเฉือนได้ดีกว่าเศษยางรูปทรงแท่งและเศษยางรูปทรงแผ่น ส่งผลให้หินโรยทางมีเสถียรภาพสูงขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างทางรางให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น พร้อมทั้งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการนำเศษยางมาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุริยาวัธ ประอ้าย ผศ.ดร.ธเนศ ทองเดชศรี ดร.ปาลินี สุมิตสุวรรณค์ และ นายชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์ ที่ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่า ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการดำเนินโครงการวิศวกรรมฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ปัญชาภิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนทุนโรยทางสำหรับการศึกษา รวมถึง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อนร่วมงาน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้าน ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการวิศวกรรมฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kwunjai, S., Somsri, T., Jitsangiam, P., Binaree, T., Qian, Y., & Jing, G. (2023). Characterization of deteriorated railway ballast morphological changes using 3D scanning and supervised machine learning data analytics. *Construction and Building Materials*, 398, 132445. (In case of Journal)
- [2] Angelidakis, V., Nadimi, S., & Utili, S. (2022). Elongation, flatness and compactness indices to characterise particle form. *Powder Technology*, 396(Part B), 689-695. (In case of Journal)
- [3] Guo, Y., Markine, V., Qiang, W., Zhang, H., & Jing, G. (2019). Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast. *Construction and Building Materials*, 212, 210-224. (In case of Journal)
- [4] Hu, Q., Gao, R., Chen, J., & Yuan, Z. (2023). Ballast deterioration inspection and quantification with 3D form method based on particle inscribed ellipsoid. *Granular Matter*, 25(3). (In case of Journal)
- [5] Paz, C., Suárez, E., Vence, J., Paradela-Rodríguez, J., Montero-Cubillo, N., & Estaire, J. (2024). Advanced approach for assessing the degradation of railway ballast particles through detailed 3D scanning. *Construction and Building Materials*, 436, 136947 (In case of Journal)
- [6] Paixão, A., & Fortunato, E. (2021). Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry. *Construction and Building Materials*, 267, 121225. (In case of Journal)
- [7] Ge, H., Sha, A., Han, Z., & Xiong, X. (2018). Three-dimensional characterization of morphology and abrasion decay laws for coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 188, 58-67. (In case of Journal)
- [8] Varuntanya, K., Kwunjai, S., Binaree, T., Jitsangiam, P., Jing, G., & Aela, P. (2023). Laboratory investigation of railway-used ballast morphology using 3D imaging data analyses. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02272. (In case of Journal)
- [9] Guo, Y., Markine, V., Song, J., & Jing, G. (2018). Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis. *Construction and Building Materials*, 169, 414-424. (In case of Journal)
- [10] Tan, Y., Fottner, J., & Kessler, S. (2020). An efficient and reliable method for determining the angle of repose of biomass by using 3D scan. *Biomass and Bioenergy*, 132, 105434. (In case of Journal)
- [11] Tan, Y., Yu, Y., Fottner, J., & Kessler, S. (2021). Automated measurement of the numerical angle of repose (aMAoR) of biomass particles in EDEM with a novel algorithm. *Powder Technology*, 388, 462-473. (In case of Journal)
- [12] van der Haven, D. L. H., Fragkopoulou, I. S., & Elliott, J. A. (2024). Volume-interacting level set discrete element method: The porosity and angle of repose of aspherical, angular, and concave particles. *Powder Technology*, 433, 119295. (In case of Journal)
- [13] Klanfar, M., Korman, T., Domitrović, D., & Herceg, V. (2021). Testing the novel method for angle of repose measurement based on area-weighted average slope of a triangular mesh. *Powder Technology*, 387, 396-405. (In case of Journal)
- [14] Authors' names (2019). Parameters of a discrete element ballasted bed model based on a response surface method. *Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering*, 20(9), 685-700. (In case of Journal)
- [15] Fu, J.-J., Chen, C., Ferrellec, J.-F., & Yang, J. (2020). Effect of particle shape on repose angle based on hopper flow test and discrete element method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 8811063. (In case of Journal)



การปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวมวลเพื่อความยั่งยืน

Sustainable Stabilization of Sediment Soil Using Geopolymer Synthesized from Biomass

Waste Ashes

นางสาวกัญญาณัฐ ไชยศรี^{1*} นางสาวเกวรินทร์ สายฉลาด² นายต้นตระกูล ปัญสุวรรณ³ และนายปฏิพัทธ์ อินกัน⁴^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101395@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนจากกว๊านพะเยา โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าปาล์มและเถ้ายาง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมชีวมวล ผลการทดสอบพบว่า การผสมดินตะกอนกับเถ้าชีวมวลและสารละลายอัลคาไลน์ในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความคงทนของดินได้ตามมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง นอกจากนี้ การใช้จีโอพอลิเมอร์ยังช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดต้นทุนวัสดุก่อสร้าง และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพทั้งด้านวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ดินตะกอนกว๊านพะเยา, จีโอพอลิเมอร์, เถ้าปาล์ม, เถ้ายาง และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

Abstract

This research aims to improve the engineering properties of sediment soil from Kwan Phayao by using geopolymer produced from palm ash and rubber ash, which are biomass waste materials. The results indicate that mixing sediment soil with biomass ash and alkaline solution at appropriate ratios can enhance the soil's compressive strength and durability to meet the highway construction standards of the Department of Highways. Moreover, the use of geopolymer reduces cement consumption, greenhouse gas emissions, and construction material costs while adding value to industrial waste. Therefore, this approach presents significant potential in engineering, environmental, economic, and sustainable resource management aspects.

Keywords: Kwan Phayao sediment soil, Geopolymer, Palm ash, Rubber ash, Unconfined compressive strength (UCS)

1. บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาลึกลับสำคัญที่เกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจก ส่งผลให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น เกิดภัยธรรมชาติรุนแรง และกระทบต่อระบบนิเวศ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เพราะกระบวนการผลิตปล่อย CO₂ เกือบหนึ่งตันต่อปูนหนึ่งตัน ทำให้คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงนอกจากนี้ ต้นทุนการผลิตคอนกรีตก็เพิ่มขึ้นตามราคาวัตถุดิบและพลังงาน จึงมีความพยายามพัฒนาวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหนึ่งในนั้นคือ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) วัสดุก่อสร้างที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้โดยไม่ต้องเผา ช่วยลดพลังงานและการปล่อย CO₂ จีโอพอลิเมอร์ผลิตจากของเสียอุตสาหกรรมที่มีซิลิกาและอะลูมินาสูง เช่น เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย จึงช่วยลดปัญหาขยะ เพิ่มมูลค่าของเสีย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

เถ้าปาล์มและเถ้ายางเป็นวัสดุพลอยได้จากการเผาชีวมวลในโรงไฟฟ้าหรืออุตสาหกรรมพลังงาน ซึ่งในอดีตมักถูกทิ้งเป็นของเสียโดยไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันวัสดุเหล่านี้ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ วัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก การนำเถ้าชีวมวลอย่างเถ้าปาล์มและเถ้ายางมาใช้ จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง ทั้งยังช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด ลดต้นทุนการผลิตวัสดุก่อสร้าง และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า



รูปที่ 1 ขุดตะกอนที่กว๊านพะเยา



รูปที่2 ตัวอย่างดินตะกอน

ดินตะกอนจากแอ่งน้ำหรือพื้นที่น้ำขัง เช่น กว๊านพะเยา เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการขุดลอก(ขยะสิ่งแวดล้อม) แต่มีข้อจำกัด เช่น รับน้ำหนักได้น้อย และไวต่อความชื้น จึงไม่เหมาะกับการใช้งานทางวิศวกรรมโดยตรง หากนำมาผสมกับของเสียอุตสาหกรรมอย่างเถ้าปาล์มและเถ้ายางเพื่อผลิตเป็นซีโอพอลิเมอร์ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดินให้เหมาะกับงานโยธา โดยเฉพาะงานผิวทาง ทั้งยังเป็นการใช้ทรัพยากรเหลือทิ้งอย่างคุ้มค่า ลดต้นทุน และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อนในภาพรวมได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนกว๊านพะเยาโดยใช้ซีโอพอลิเมอร์จากเถ้ายาง และเถ้าปาล์มเพื่อนำมาใช้งานวิศวกรรมผิวทางให้ได้ ตามมาตรฐานกรมทางหลวงดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (ทล.-ม. 204/2556) และ รองพื้นทาง (ทล.-ม. 206/2564) ซึ่งตัวอย่างนี้จะใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้า ไมยางเท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ของน้ำหนักดินแห้ง และใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) เท่ากับ 1.5 ใช้อัตราส่วนสารต่อเถ้า 0.4-0.6

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.การปรับปรุงดินตะกอนกว๊านพะเยา
- 2.การใช้ซีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งชีวมวล
- 3.การผสมสารละลายอัลคาไลน์ในอัตราส่วนต่าง ๆ
- 4.การพัฒนาเพื่อใช้งานทางวิศวกรรมผิวทาง
- 5.ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ

1.2 ขอบเขตการศึกษา

- 1.วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงดินตะกอน
- 2.สัดส่วนการผสมดินตะกอนกับเถ้าลอย
- 3.ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 4.อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 5.อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.ได้แนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนให้มีความแข็งแรงและความคงทนที่เพียงพอสำหรับนำไปใช้งานในงานวิศวกรรมผิวทาง เช่น ชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางถนน ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมทางหลวง

2.ช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก และลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนผ่านการใช้ซีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม

3.สนับสนุนแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน ด้วยการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบวัสดุก่อสร้าง นำไปสู่การลดปริมาณของเสียและส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

4.เป็นฐานข้อมูลสำหรับการศึกษาต่อในด้านการพัฒนาและประยุกต์ใช้ซีโอพอลิเมอร์ในงานด้านวิศวกรรมโยธา และสามารถขยายผลไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์ในอนาคตได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์มีต้นทุนสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีแนวคิดใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นของเหลือจากการผลิตไฟฟ้ามาผลิตซีโอพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงดินตะกอน วิธีนี้ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดต้นทุน พร้อมทั้งทำให้เข้าใจคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงดีขึ้น จึงจำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ดำเนินการตามมาตรฐาน

ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาบน้ำจืดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ และอันดับ 3 ของประเทศ มีพื้นที่กว่า 12,000 ไร่ ความลึกเฉลี่ยลดจาก 2.62 เมตร เหลือ 1.93 เมตร เนื่องจากดินตะกอนจากการชะล้างหน้าดินทับถมมากขึ้น กรมชลประทานจึงขุดลอกดินตะกอนเพื่อลดการตื้นเขินและเพิ่มเก็บกักน้ำ แต่ดินตะกอนที่ขุดออกมากลับถูกกองทิ้งรอบกว๊านจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องหาวิธีนำมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม

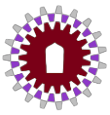
ปัจจุบันหน่วยงานภาครัฐได้ดำเนินนโยบายฟื้นฟูระบบนิเวศรอบกว๊านพะเยา โดยกรมชลประทานจังหวัดพะเยาได้ขุดลอกดินตะกอนและซากพืชสัตว์ที่ทับถมเพื่อลดการตื้นเขิน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำดินตะกอนเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม

การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างพื้นทาง

ดินเป็นฐานสำคัญของถนน แต่คุณสมบัติในแต่ละพื้นที่ต่างกัน หากดินไม่เหมาะสมจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยการบดอัด ระบายน้ำ เสริมวัสดุ หรือเติมสารผสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เสถียรภาพ และความคงทน ให้เหมาะกับงานวิศวกรรมก่อสร้าง

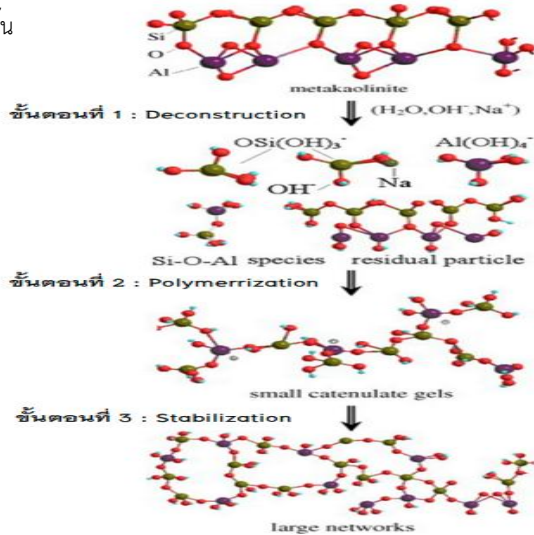
ซีโอพอลิเมอร์

ซีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่คล้ายปูนซีเมนต์แต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า เพราะใช้พลังงานในการผลิตน้อยและไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้ ต่างจากการผลิตปูนซีเมนต์ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากสู่สิ่งแวดล้อม [2]



Davidovits et al.(1991) กล่าวว่า การใช้อิโพลีเมอร์ในการเพิ่มความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อน โดยใช้อิโพลีเมอร์ผลิตจากวัสดุที่มี SiO_2 และ Al_2O_3 กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตกิ่งก้านที่มีความแข็งแรง สามารถรับกำลังได้เทียบเท่าซีเมนต์ [3]

กระบวนการเกิดอิโพลีเมอร์เป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยความร้อนออกมาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ เริ่มจากการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุตั้งต้นให้เป็นเครือข่ายอะลูมิโนซิลิเกต จากนั้นเกิดพอลิเมอร์โซ่สั้นๆที่ทำให้เกิดเจลของอิโพลีเมอร์ และสุดท้ายคือการคงรูปเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ 24 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างขนาดเล็กพัฒนาเป็นโครงสร้างใหญ่ที่มีเสถียรภาพมากขึ้น



ภาพ 3 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization process)

ที่มา : (Yao et al., 2009)

ความแตกต่างระหว่างอิโพลีเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเมื่อผสมน้ำ เกิดจากการเผาหินปูนและดินเหนียวที่อุณหภูมิสูง มีซิลิเกตและอะลูมิเนตเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้ปฏิกิริยากับน้ำสร้างเสริมความแข็งแรง ส่วนอิโพลีเมอร์เกิดจากสารอะลูมิโนซิลิเกตทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ สร้างโครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่โดยไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความแตกต่างสำคัญอยู่ที่กระบวนการแข็งตัวและองค์ประกอบทางเคมี

เถ้าปาล์ม

เถ้าปาล์มเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาเศษกะลาและเส้นใยของผลปาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า โดยเถ้าที่ได้มักถูกทิ้งและก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การฟุ้งกระจายของฝุ่น แม้โดยธรรมชาติจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่หากนำมาบดละเอียดและผสมกับน้ำ จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ และทำให้เกิดสารประกอบที่มีสมบัติในการประสานได้ในอุณหภูมิปกติ

เถ้ายาง

เถ้ายางเกิดจากการเผาไม้เศษจากอุตสาหกรรมแปรรูปยางพารา เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งมีปริมาณมากและสร้างปัญหาการกำจัด เมื่อเผาไม้เหล่านี้ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานและผลิตไฟฟ้า ทำให้เกิดเถ้าจำนวนมาก เถ้านี้มีแคลเซียมออกไซด์สูง จึงสามารถนำมาใช้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุก่อสร้างและลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ ช่วยลดปัญหาการทิ้งและค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะ

ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของอิโพลีเมอร์

1. ความเข้มข้นของ NaOH

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชันโดยช่วยสลายพันธะโมเลกุลของอะลูมิโนซิลิเกตให้แตกเป็นไอออน เมื่อมีความเข้มข้นสูง จะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ทำให้อิโพลีเมอร์ก่อตัวเร็วและมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ NaOH ยังเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะราคาถูก หาง่าย และมีความหนืดต่ำ

2. อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายที่มีซิลิคอนละลายได้และมีโครงสร้างกิ่งก้านในปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชัน โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เชื่อมไอออนซิลิกอนและอะลูมิเนียมให้เกิดเป็นโครงสร้างโพลีไซเคเลตที่มั่นคง โดยโซเดียมไอออนช่วยปรับสมดุลประจุในโครงสร้างนี้ด้วย

ซิลิกาที่ละลายในรูปซิลิเกตช่วยเชื่อมโครงสร้างโดยแบ่งปันออกซิเจนกับอะลูมิเนียมและซิลิเกตใกล้เคียง เกิดเป็นเจลอะลูมิโนซิลิเกตที่ควบแน่นเป็นสายโซ่ หากมีซิลิกามาก เจลจะเกิดเร็วและได้โครงสร้างแบบสัณฐานที่คงทนไม่เปลี่ยนเป็นผลึก แม้เวลาผ่านไป โดยอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจะช่วยเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มความแข็งแรงของอิโพลีเมอร์

3. อัตราส่วนระหว่างสารละลายและผงอิโพลีเมอร์ (L/FA)

การสังเคราะห์อิโพลีเมอร์ต้องมีอัตราส่วนระหว่างสารละลายและผงอิโพลีเมอร์ที่เหมาะสม ถ้าสารละลายมีน้อยเกินไป จะทำให้ปฏิกิริยาไม่ทั่วถึง กำลังรับแรงอัดต่ำ แต่ถ้ามีสารละลายมากเกินไป จะทำให้เวลาก่อตัวนานและลดความแข็งแรง การใช้วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของอิโพลีเมอร์ได้ดี

4. อุณหภูมิในการบ่ม

บทบาทของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการบ่มในปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชันคือเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาอิโพลีเมอร์ไรเซชัน โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะทำให้เวลาในการก่อตัวของอิโพลีเมอร์ก่อตัวได้เร็วขึ้น

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

รวบรวมรายงานวิจัยที่จะกล่าวถึง เกี่ยวกับคุณสมบัติของการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยอิโพลีเมอร์จากเถ้าลอย

Hardjito et al. (2004) พบว่าอิโพลีเมอร์หรืออะลูมิโนซิลิเกตโพลีเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมิเนียมในปริมาณมาก เช่น เถ้าถ่านหิน และมีโครงสร้างเคมีคล้ายกับซีโอไลต์ โดยเชื่อมกันทั้งในรูปแบบ



สั้นและยาวจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอนาคตและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแต่ยังจำเป็นต้องศึกษาความเหมาะสมและมาตรฐานการผลิตเพิ่มเติม [4]

Sukmak et al. (2013) กล่าวว่า ศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ดินเหนียวและเถ้าลอย โดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วันมีลักษณะคล้ายกับปูนซีเมนต์ [5]

Davidovits (1994) พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริyajีโอโพลิเมโรไลเซชัน ซึ่งมีโครงสร้างแบบซิลิเกต และสามารถเติมสารต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติและความแข็งแรงได้ จีโอโพลิเมอร์แข็งตัวได้ที่อุณหภูมิปกติ มีความแข็งแรงทนทานต่อการสึกกร่อน โดยมีกำลังรับแรงอัด 70-100 MPa มีการหดตัวต่ำและทนความเย็น การใช้จีโอโพลิเมอร์ในการก่อสร้างมีข้อดีด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องใช้กระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงและไม่เกิดก๊าซ CO₂ มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [6]

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำดินตะกอนจากกว๊านพะเยามาใช้เป็นตัววัสดุในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับเถ้าปาล์มและเถ้ายางสำหรับใช้งานในวิศวกรรมผิวทาง โดยเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด เช่น อัตราส่วนระหว่าง Na₂SiO₃ : NaOH, อัตราส่วนระหว่างดินและเถ้า, รวมถึงอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปปรับใช้ในงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยดินตะกอนจากกว๊านพะเยา, เถ้าปาล์ม, และเถ้ายาง โดยดินตะกอนที่นำมาทดสอบได้รับการขุดลอกตะกอนในกว๊านพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างจากบริเวณพื้นที่ดังกล่าว ส่วนเถ้าปาล์มและเถ้ายางที่ใช้ได้มาจากกระบวนการเผาปาล์มน้ำมันและไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของบริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติวิศวกรรม

ในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยปาล์มและเถ้าลอยยาง ตามมาตรฐาน โดยในการทดสอบแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

1.การทดสอบหาขีดจำกัดAtterberg (Atterberg test)

1.ขีดจำกัดเหลว (LL) คือ ความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นพลาสติก

2.ขีดจำกัดพลาสติก (PL) คือ ความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง

3.ขีดจำกัดดักตัว (SL) คือ ความชื้นที่ดินเปลี่ยนจากกึ่งของแข็งไปเป็นของแข็ง และไม่หดตัวอีกต่อไป

ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) คือ ผลต่างระหว่างขีดจำกัดเหลว (LL) และขีดจำกัดพลาสติก (PL) ซึ่งใช้บ่งบอกถึงความเหนียวและความไวของดินในการเปลี่ยนแปลงสถานะตามความชื้น ค่านี้เป็นข้อมูลสำคัญในการจำแนกมวลดิน

2.การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test)

ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลดิน คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัตถุในอากาศกับน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน สะท้อนองค์ประกอบธาตุในดิน ดินที่มีเหล็กมากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 ขึ้นไป ส่วนดินที่มีสารอินทรีย์มากจะต่ำราว 2.00 โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 2.60-2.80 ค่านี้ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน เช่น ความพรุน ความอิ่มตัว และปริมาตรช่องว่าง [7]

3.การทดสอบหาขนาดผล (Grain size analysis)

มวลดินประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน ดินที่มีเม็ดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) เรียกว่าดินทราย ไม่มีค่าความเหนียว ส่วนเม็ดที่เล็กกว่าเป็นดินเหนียว ขนาดเม็ดดินมีผลต่อการซึมผ่าน ความแข็งแรง และการทรุดตัว วิเคราะห์ขนาดเม็ดดิน ได้แก่ การร่อนตะแกรงสำหรับเม็ดใหญ่ และการใช้ไฮโดรมิเตอร์สำหรับเม็ดเล็ก ข้อมูลนี้ใช้จำแนกประเภทดินในงานวิศวกรรม

4.การทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้อิเล็กตรอนแทนแสงในการส่องตัวอย่าง จึงสามารถเห็นโครงสร้างระดับจุลภาคที่เล็กกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ซึ่งจำกัดด้วยความยาวคลื่น SEM มีการขยายตั้งแต่ 3,000 ถึง 100,000 เท่า และเห็นรายละเอียดระดับ 3-100 นาโนเมตร นอกจากนี้ SEM ยังสามารถทำงานร่วมกับเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีอย่าง EDS และ WDS เพื่อให้ข้อมูลองค์ประกอบ ทำให้ SEM เป็นเครื่องมือสำคัญในงานวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การแพทย์ และอุตสาหกรรมต่าง ๆ

5.การทดสอบ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีหรือรังสีเอกซ์แบบกระจาย พลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

6.การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน(Modified compaction test)

การบดอัดเป็นกระบวนการที่ใช้แรงหรือการกดเพื่อให้เม็ดดินชิดกันมากขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และลดการซึมผ่านของน้ำในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการบดอัดแบบสูงกว่า



มาตรฐานเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอน เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบต่อไป

ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกัวนพะเยา ตัวอย่างดินจะถูกแยกขนาดโดยเลือกใช้ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และจะนำไปบดเพื่อทำให้ดินปราศจากความชื้นก่อนการทดสอบขั้นต่อไป

ในการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะใช้โมลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 17.5 ± 0.25 cm และความสูง 15.2 ± 0.25 cm ซึ่งมีปริมาตรประมาณ 3175.5 cm^3 ส่วนก้อนที่ใช้มีน้ำหนักรวม 4.39 kg และระยะยก 43 cm เพื่อใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน

ในการทดสอบบดอัดจะเริ่มจากการผสมดินกับน้ำประมาณ 3% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นจะทำการบดอัดดินเป็น 5 ชั้น โดยใช้ค้อนกระแทก 56 ครั้งในแต่ละชั้น หลังจากบดอัดครบแล้วจะตัดแต่งตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับโมลและเก็บข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของดินต่อจากนั้นจะผสมดินใหม่และเพิ่มน้ำเพื่อบดอัดต่อไป จนกว่าน้ำหนักของดินที่บดอัดจะลดลง

ตาราง 7 โปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ปรับปรุงโดยใช้โอโพลิเมอร์ จากเจ้าป่าส้มและเถายาง ใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1.5 ทุกส่วนผสม

ตาราง โปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ปรับปรุงโดยใช้โอโพลิเมอร์ จากเจ้าป่าส้มและเถายาง ใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1.5 ทุกส่วนผสม

ตัวอย่าง	L/FA
P-S90FA10L0.4	0.4
P-S80FA20L0.4	
P-S70FA30L0.4	
P-S90FA10L0.5	0.5
P-S80FA20L0.5	
P-S70FA30L0.5	
P-S90FA10L0.6	0.6
P-S80FA20L0.6	
P-S70FA30L0.6	
R-S90FA10L0.4	0.4
R-S80FA20L0.4	
R-S70FA30L0.4	
R-S90FA10L0.5	0.5
R-S80FA20L0.5	
R-S70FA30L0.5	
R-S90FA10L0.6	0.6
R-S80FA20L0.6	
R-S70FA30L0.6	

****หมายเหตุ**

1. S คือ ดินตะกอนกัวนพะเยา
FA คือ เถ้าลอย (เถ้าลอยป่าส้ม เถ้าลอยยาง)
L คือ สารละลายอัลคาไลน์ (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$)
P คือ เถ้าปาล์ม (Palm oil fuel ash)
R คือ เถ้ายาง (Rubber ash)

2. หน่วยของปริมาณส่วนผสมคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดินแห้ง เช่น P-S90FA10L0.4 คือ สัดส่วนดินตะกอนกัวนพะเยา 90 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าลอย 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง ใช้สารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.4

7.การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างจะถูกเตรียมจากโมล PVC ขนาด 2 นิ้ว โดยทำการผ่าครึ่งทอดตามแนวยาว และกำหนดความสูงของโมลให้มีอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในต่อความสูงเท่ากับ 1 ต่อ 2 ตามการอ้างอิงจากงานวิจัยของธัชชัยและคณะ (2560) เพื่อใช้ในการกระบวนการทดสอบ

เนื่องจากการใช้โมล PVC ใหม่ ทำให้ไม่สามารถใช้ค้อนบดอัดขนาดเดิมได้ จึงต้องประดิษฐ์ค้อนบดอัดขนาดเล็กขึ้นใหม่ โดยค้อนใหม่มีน้ำหนักรวม 1.62 กก. และระยะยก 35.5 ซม. เพื่อให้สามารถใช้กับโมล PVC ได้

8.การออกแบบพลังงานบดอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการทดสอบความคงทนต้องใช้ตัวอย่างดินที่มีขนาดต่างจากตัวอย่างที่ใช้ในทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งทำให้ต้องควบคุมหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างดินให้เท่ากัน วิธีการทำเช่นนี้คือการเทียบพลังงานในการบดอัด โดยการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการบดอัดเพื่อให้หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมีค่าตรงตามที่ต้องการ

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยก)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ 23 ครั้ง

9.การเตรียมตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

9.1 การเตรียมดินตะกอนและเถ้าลอย

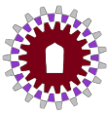
1. ตะกอนกัวนพะเยา จะถูกนำไปบด 24 ชั่วโมงให้แห้งสนิท จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4

2.เถ้าลอยป่าส้มและเถ้าลอยยาง จะถูกนำไปบด 24 ชั่วโมงให้แห้งสนิท จากนั้นนำไปร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 100

9.2 การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์

การผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีขั้นตอน การเตรียมดังนี้

1. นำNaOH ชนิดเม็ดไปกวนผสมกับน้ำ เตรียมให้มีความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทิ้งไว้ 30 นาที
2. นำสารละลาย NaOH ไปกวนผสมกับสารละลาย Na_2SiO_3 นาน 30 นาที ในอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เป็น 1.5 โดยปริมาตร
3. บ่มสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน



10.การทดสอบกำลังรับแรงอัดเดี่ยว (Unconfined compression test)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวใช้ดินตะกอนจากกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีโพลิเมอร์จากถั่วลันเตาและถั่วลันเตา โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมโดยการผสมดินกับถั่วลันเตาในอัตราส่วนต่างๆ (90:10, 80:20, 70:30) และผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ในอัตราส่วนที่กำหนด เช่น โซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 0.67, 1, และ 1.5 โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อถั่วลันเตา 0.4, 0.5, 0.6 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ หลังจากเตรียมผสมแล้ว ตัวอย่างจะถูกบดอัดในแบบหล่อทรงกระบอกขนาด 5.35 เซนติเมตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง) และ 10.7 เซนติเมตร (สูง) และบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน จากนั้นจะนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง

11.การทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนด้วยการสูญเสียของตัวอย่างดินโดยจำลองสภาพเปียก-แห้งตามมาตรฐาน ASTM D559-96 ตัวอย่างผ่านตะแกรง 4.75 มม. ควบคุมความหนาแน่นด้วยพลังงานบดอัดจากการทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว หลังบ่ม 7, 28, 60 วัน แช่น้ำ 5 ชั่วโมงและอบที่ 71°C นาน 42 ชั่วโมง ทำซ้ำ 6 รอบ และทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยวในรอบที่ 1, 3, 6 เพื่อหาค่าการสูญเสียกำลังอัด

12.การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test)

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (MR) ในงานวิจัยนี้ทำตามมาตรฐาน AASHTO T307 โดยการทดสอบจะใช้การกระทำซ้ำ ซึ่ง Resilient Modulus (MR) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ โดยค่า MR จะคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นซ้ำสูงสุดจากสูงสุดสลับในแนวแกนต่อค่าความเค้นคืนตัวในแนวแกน

ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยซีโพลิเมอร์ถูกวางบนแท่นชั่งและห่อด้วยเยื่อหุ้ม พร้อมติดตั้งเครื่องวัดระยะ LVDT 2 ตัว เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากนั้นใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบกระทำซ้ำ โดยเพิ่มแรงตามลำดับ 1 ถึง 15 พร้อมปรับความเค้นโอบรัดและความเค้นเบี่ยงเบน ให้แรงและคอนแรง 100 รอบในแต่ละลำดับ จนตัวอย่างพังทลาย

13.การทดสอบหาความเร็วเฉือนหรือโรโซแนนซ์ (Free-free resonant frequency method)

ตัวอย่างดินที่มีอายุ 7 และ 28 วันจะถูกแขวนกับโครงเหล็กให้ลอยขึ้นจากพื้น จากนั้นจะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วคลื่น (p-wave และ s-wave) ที่ปลายด้านหนึ่งของตัวอย่าง และใช้การเคาะตัวอย่างด้วยนอตตัวเมียที่ปลายอีกด้านเพื่อส่งสัญญาณให้เซ็นเซอร์รับค่าความเร็ว ทำการเคาะ 50 ครั้งในแต่ละการทดสอบ แล้วบันทึกค่าความถี่ของคลื่นทั้งสองประเภท

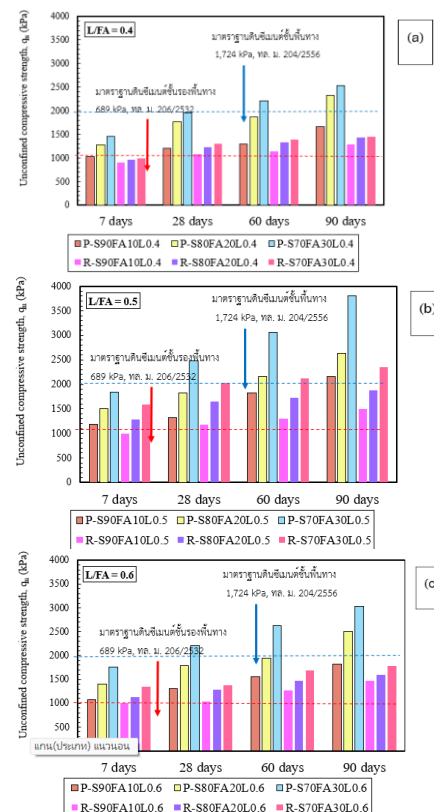
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยาในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยาซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางแบบวิศวกรรม

คุณสมบัติของดิน	ผลการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.71
ขีดจำกัดเหลว (LL)	42.60 %
ขีดจำกัดพลาสติก (PL)	23.46 %
ขีดจำกัดการหดตัว (SL)	19.52 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4	99.93 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100	92.00 %
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	17.03 kN/m ³
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม	14.00 %
การจำแนกตามเกณฑ์ AASHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ USCS	CL

4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, q_u) การทดสอบนี้เพื่อวัดความสามารถของวัสดุในการรับแรงอัดในทิศทางเดียว โดยไม่มีการรองรับด้านข้าง (Unconfined) และช่วยในการประเมินหาค่าความแข็งแรงของดินตะกอนกว๊านที่ปรับปรุงด้วยซีโพลิเมอร์ จากถั่วลันเตาและถั่วลันเตา จะได้ค่าความเค้นสูงสุด (q_u) จากการทดสอบนี้ ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA ดังนี้ 90:10 80:20 และ 70:30 ใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อถั่วลันเตา และถั่วลันเตา เท่ากับ L/FA เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6





รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแทนเดียว(q_u)กับอายุบ่มตัวของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงโดยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (Palm Ash,P)และเถ้ายาง(Rubber Ash)ให้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วนเถ้า

เท่ากับ (a) L/FA = 0.4 , (b) L/FA = 0.5 , (c) L/FA = 0.6

***หมายเหตุ P คือ เถ้าปาล์ม R คือ เถ้ายาง

รูปที่ 5(a) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกัวนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม ที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม L/FA เท่ากับ 0.4 โดยเปรียบเทียบวัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุทุกชนิดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์ม (Palm Ash,P) ในวัสดุจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากปริมาณเถ้าปาล์มที่สูงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ทำให้วัสดุผสมทุกชนิดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) แต่ยังไม่มีความดีที่ผ่านค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทาง (1,724 kPa) ตัวอย่างวัสดุที่ให้ค่าที่ดีที่สุดคือ P-S70FA30L0.4 (0.5) ซึ่งมีส่วนผสมเถ้าปาล์มมากที่สุด 30% โดยตัวอย่างนี้ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่มแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์ม มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของวัสดุ ซึ่งวัสดุดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มทั้งหมดเหมาะสำหรับการใช้งานในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐาน

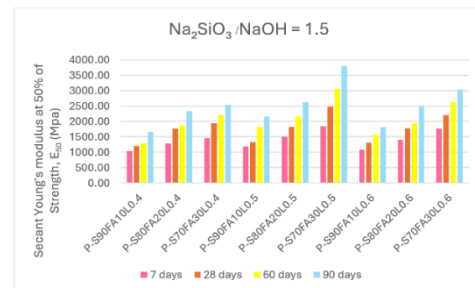
รูปที่ 5(b) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์ม โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มในอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วน S:FA ที่ 90:10 80:20 และ 70:30 ภายในระยะเวลาการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มช่วยเสริมความแข็งแรงดันสูงกว่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) และผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) ในทุกช่วงอายุ ยกเว้นที่ 7 วัน ซึ่งผ่านเพียงค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทางเท่านั้น โดยวัสดุที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 1847.08 (P-S70FA30L0.5) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มี FA 30% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการบ่มและปริมาณเถ้าปาล์มช่วยเสริมกำลังอัดเมื่อเพิ่มสารละลายอัลคาไลน์มากขึ้น ทำให้ NaOH สามารถละลายซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและการควบแน่นแบบลูกโซ่ (condensation-polymerization) นอกจากนี้ Na_2SiO_3 ยังช่วยยึดประสานโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และดินตะกอน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยวัสดุผสมเถ้าปาล์มทั้งหมดเหมาะสำหรับใช้ในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐาน

รูปที่ 5(c) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกัวนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม ที่มีอัตราส่วน

สารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม L/FA เท่ากับ 0.6 โดยเปรียบเทียบวัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุทุกชนิดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์ม (Palm Ash,P) ในวัสดุจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากปริมาณเถ้าปาล์มที่สูงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่าวัสดุผสมทุกชนิดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) แต่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานของชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) แสดงให้เห็นว่าอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม L/FA เท่ากับ 0.6 มีสารละลายมาที่สุด จะเห็นว่าเมื่อมีสารละลายที่มากเกินไปจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อเทียบกับ L/FA เท่ากับ 0.5 ซึ่งวัสดุดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มทั้งหมดเหมาะสำหรับการใช้งานในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของวัสดุผสมทุกชนิด

4.3 ค่าซีแคนยังโมดูลัส 50 เปอร์เซนต์ของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

ค่าซีแคนยังโมดูลัส 50 เปอร์เซนต์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสำหรับส่วนผสมมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$) เท่ากับ 1.5

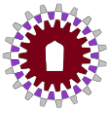


รูปที่ 6 ค่าซีแคนยังโมดูลัส 50 เปอร์เซนต์ ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสำหรับส่วนผสมมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$) เท่ากับ 1.5 เฉพาะเถ้าปาล์ม

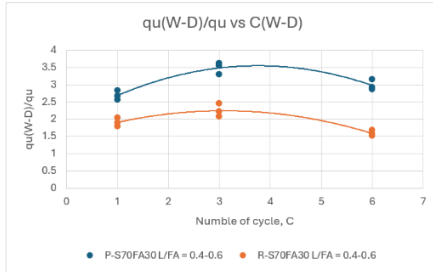
ค่าซีแคนยังโมดูลัส 50 เปอร์เซนต์ (E_{50}) ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าที่ใส่เข้าไปและระยะเวลาในการบ่ม จากเถ้าปาล์มซึ่งอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม L/FA เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วน S:FA เท่ากับ 70:30 ตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 28 60 และ 90 วันพบว่าค่า E_{50} เท่ากับ 1847.08 2475.42 3065.60 และ 3800.48 MPa ตามลำดับ โดยภาพรวมแนวโน้มค่า E_{50} ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

4.4 การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying)

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying) เป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมระหว่างการเปียกน้ำและการแห้งซ้ำๆ ตามมาตรฐาน ASTM D559 ทำโดยนำตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน



แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 5 ชั่วโมง และนำตัวอย่างอบในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงตัวอย่างให้ผิวแห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการออกแบบโครงสร้างและวัสดุที่ต้องรับมือกับสภาพเปียกและแห้งบ่อยๆ อีกทั้งยังสามารถคาดการณ์อายุการใช้งานของวัสดุ ซึ่งจะสามารถป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร



รูปที่ 7 ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียก-แห้ง พบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าปาล์มมีค่ากำลังอัดสูงและคงตัวกว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้ายาง โดยเฉพาะในรอบแรกถึงรอบกลาง แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มช่วยเพิ่มความทนทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดีกว่า

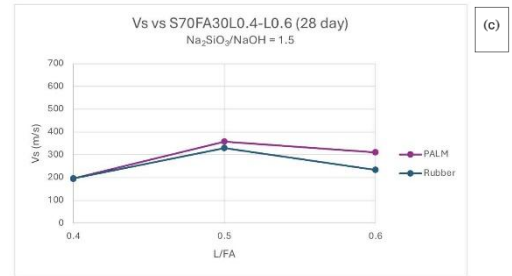
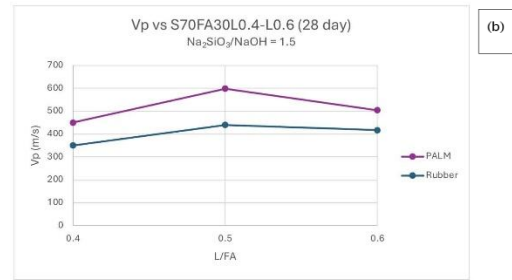
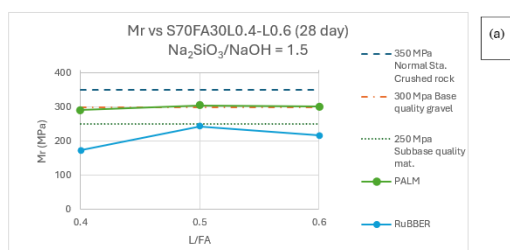
รูปที่ 7 ทดสอบแบบ เปียก-แห้ง (Wet-Dry cycles) พบว่า อัตราส่วน $qu(W-D)/qu$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงรอบการทำซ้ำระยะแรก และลดลงเมื่อจำนวนรอบสูงขึ้น

สำหรับตัวอย่างที่ผสมเถ้าปาล์ม (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่า ค่า $qu(W-D)/qu$ มีค่าประมาณ 2.7 ที่รอบแรก และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่รอบที่ 3 (ประมาณ 3.5) จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อถึงรอบที่ 6 (ประมาณ 3.1) สะท้อนให้เห็นว่าเถ้าปาล์มสามารถเพิ่มความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากการเปียก-แห้งได้ดี โดยเฉพาะในช่วงรอบแรกถึงรอบกลาง

ในขณะที่ตัวอย่างที่ผสมเถ้ายาง (เส้นสีส้ม) ค่า $qu(W-D)/qu$ อยู่ที่ประมาณ 1.9 ในรอบแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในรอบที่ 3 (ประมาณ 2.1-2.2) ก่อนจะลดลงอีกครั้งในรอบที่ 6 (ประมาณ 1.7) แสดงให้เห็นว่าเถ้ายางมีความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดหลังการเปียก-แห้งได้น้อยกว่าเถ้าปาล์ม อีกทั้งเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ค่ากำลังกลับลดลงชัดเจน

เถ้าปาล์มมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนทานของดินต่อการเสื่อมสภาพจากการเปียก-แห้งมากกว่าเถ้ายาง โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าและคงตัวได้ดีกว่าในทุกช่วงรอบการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับสมการการถดถอย (Polynomial regression) ที่ได้ค่าความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.8809 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองในการอธิบายแนวโน้มดังกล่าว

4.5 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น (M_R) และวิธีโซแนนซ์อิสระ (FFR)



รูปที่ 8(a) ค่ากำลังรับแรงอัดจำลอง (M_R) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R กับอัตราส่วน L/FA ของตัวอย่างผสม S70FA30L0.4-L0.6 ที่บ่ม 28 วัน ($Na_2SiO_3/NaOH = 1.5$) พบว่า

ตัวอย่างผสมที่ใช้เถ้าปาล์มให้ค่า M_R ก่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 300–310 MPa ตลอดช่วง L/FA ที่ 0.4–0.6 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานวัสดุชั้นเบส (250 MPa) และใกล้เคียงกับวัสดุเกรด Base quality gravel (300 MPa)

ตัวอย่างผสมที่ใช้เถ้ายาง มีค่า M_R ต่ำกว่าของเถ้าปาล์มอย่างชัดเจน โดยที่ $L/FA = 0.4$ ค่า M_R อยู่ประมาณ 170–180 MPa และเพิ่มขึ้นที่ $L/FA = 0.5$ ประมาณ 240–250 MPa ก่อนจะลดลงเล็กน้อยที่ $L/FA = 0.6$ ลงมาอยู่ประมาณ 210–220 MPa

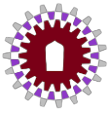
เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน พบว่าเถ้าปาล์มสามารถใช้แทนวัสดุเกรดชั้นรองพื้นทางได้ ในขณะที่เถ้ายางยังไม่ถึงเกณฑ์ที่ต้องการ ยกเว้นที่ $L/FA = 0.5$ ซึ่งมีแนวโน้มดีขึ้นแต่ยังไม่ถึง 300 MPa

ดังนั้น เถ้าปาล์มมีความเหมาะสมมากกว่าในการใช้งานด้านโครงสร้างฐานถนนหรือวัสดุที่ต้องรับแรงซ้ำ ส่วนเถ้ายางยังมีข้อจำกัดเรื่องกำลังรับแรงอัดจำลอง

รูปที่ 8(b) ค่าความเร็วคลื่นตามยาว (V_p) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_p กับ L/FA (%)

ตัวอย่างเถ้าปาล์มมีค่า V_p สูงกว่าตัวอย่างเถ้ายางตลอดทุกช่วง โดยค่า V_p เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ ประมาณ 590–600 m/s จากนั้นลดลงที่ $L/FA = 0.6$ เหลือประมาณ 500 m/s

ตัวอย่างเถ้ายาง มีค่า V_p ต่ำกว่า PALM อยู่ราว 70–150 m/s ทุกช่วง โดยมีค่าเพิ่มสูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ เช่นเดียวกัน อยู่ที่ประมาณ 430–440 m/s ก่อนลดลงเล็กน้อยที่ $L/FA = 0.6$



แนวโน้มโดยรวมชี้ว่า $L/FA = 0.5$ เป็นจุดที่โครงสร้างภายในเนื้อวัสดุมีความหนาแน่นสูงสุด ส่งผลให้คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด

ดังนั้น การใช้เส้นปาล์มทำให้เนื้อวัสดุมีความหนาแน่นและคุณภาพดีกว่าเส้นยางโดยชัดเจน

รูปที่ 8(c) ค่าความเร็วคลื่นตามขวาง (V_s)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_s กับ L/FA (%)

ตัวอย่างเส้นปาล์มและเส้นยาง มีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน คือ ค่า V_s เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ (ประมาณ 300 m/s สำหรับเส้นปาล์มและ 280–290 m/s สำหรับ Rubber) จากนั้นลดลงที่ $L/FA = 0.6$

ค่า V_s ของ เส้นปาล์ม จะสูงกว่า เส้นยาง เล็กน้อยในทุกช่วง L/FA แต่ไม่แตกต่างกันมากเท่ากับค่า V_p

การที่ค่า V_s มีแนวโน้มสูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ สอดคล้องกับผลการทดสอบ V_p แสดงถึงการกระจายตัวและการยึดประสานของเนื้อวัสดุที่ดีที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนนี้

ดังนั้นทั้งเส้นปาล์มและเส้นยางมีพฤติกรรมคล้ายกัน แต่ เส้นปาล์ม ให้ค่าความเร็วคลื่นตามขวางสูงกว่าเล็กน้อย แสดงถึงโครงสร้างภายในที่แข็งแกร่งกว่า

4.6 ผลการทดสอบด้านองค์ประกอบทางเคมี

Mix	UCS (kPa)	Si (%)	Al (%)	Si/Al
S70-P30 L/FA = 0.4	1,951.90	43.25	14.84	2.91
S70-P30 L/FA = 0.5	2,475.42	43.77	14.2	3.08
S70-P30 L/FA = 0.6	2,209.10	55.29	15.19	3.64
S70-R30 L/FA = 0.4	1,300.00	34.98	11.24	3.11
S70-R30 L/FA = 0.5	2,033.00	46.37	14.62	3.17
S70-R30 L/FA = 0.6	1,376.04	49.29	13.7	3.6

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (UCS) ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 พบว่าตัวอย่างที่มีค่า $L/FA = 0.5$ ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดในกลุ่มที่ใช้เส้นปาล์ม (2475.415 kPa) และกลุ่มที่ใช้เส้นยาง (2033 kPa) ขณะที่ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มี L/FA เท่ากับ 0.4 และ 0.6 จะต่ำกว่าค่าในระดับ 0.5 อย่างชัดเจน โดยเฉพาะกลุ่มที่ใช้เส้นยางซึ่งมีค่า UCS ต่ำสุดเพียง 1300 kPa ที่ $L/FA = 0.4$ เท่านั้น [8]

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) จะเห็นได้ว่า ที่ $L/FA = 0.5$ ทั้งสองชนิดของมิกซ์มีค่า Si/Al อยู่ในช่วง 3.08–3.17 ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่เหมาะสมต่อการสร้างโครงสร้างเจลจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer gel) ชนิด N–A–S–H โดยมีการเชื่อมโยงพันธะ Si–O–Al อย่างสมบูรณ์และหนาแน่น ส่งผลให้เนื้อวัสดุมีความแข็งแรงสูงและให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

ในทางตรงกันข้าม เมื่อค่า Si/Al ต่ำเกินไป เช่น ที่ $L/FA = 0.4$ (Si/Al) ประมาณ 2.91 สำหรับเส้นปาล์ม และ 3.11 สำหรับเส้นยาง จะพบว่าการลดลง เนื่องจากในสถานะที่มีอะลูมิเนียมมากเกินไปเมื่อเทียบกับซิลิกาจะทำให้เกิดเฟสที่มีลักษณะ Al-rich การเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์จึงไม่สมบูรณ์

โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการเชื่อมโยงไม่ต่อเนื่องและมีรูพรุนมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำ

ในกรณีที่ค่า Si/Al สูงเกินไป เช่น ที่ $L/FA = 0.6$ (ค่า Si/Al ประมาณ 3.60–3.64) แม้จะให้ค่ากำลังอัดอยู่ในระดับปานกลาง แต่กลับลดลงจากค่าที่ได้ที่ $L/FA = 0.5$ เนื่องจากเมื่อมีซิลิกามากเกินไป อาจเกิดการตกผลึกของซิลิกาบางส่วนซึ่งไม่เข้าร่วมในปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างเต็มที่ ทำให้การเชื่อมโยงของโครงข่ายเจลไม่ต่อเนื่อง และส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นลดลง

จากการวิเคราะห์โดยรวม สามารถสรุปได้ว่า ค่า Si/Al ที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนากำลังของจีโอพอลิเมอร์อยู่ในช่วงประมาณ 3.0–3.2 ซึ่งเป็นสมดุลระหว่างซิลิกาและอะลูมิเนียมที่ช่วยให้เกิดการสร้างเจลจีโอพอลิเมอร์อย่างสมบูรณ์ เนื้อวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีความแข็งแรงมากที่สุด

5. บทสรุป

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวมวลเพื่อความยั่งยืนสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางสรุปผลได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยระยะเวลาการบ่มที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ส่วนผสมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดพบที่อายุการบ่ม 90 วัน โดยใช้สัดส่วนเส้นปาล์มต่อดินตะกอนเท่ากับ 70:30 และสารละลายอัลคาไลน์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1.5 รวมถึงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเส้นปาล์ม (L/FA) 0.5 P-S70FA30L0.5) ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดที่ 3800.48 kPa

2. ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเส้นปาล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นปาล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนเส้นปาล์มที่มากขึ้นส่งเสริมความเป็นต่างของสารละลายอัลคาไลน์ ทำให้ NaOH สามารถชะล้างซิลิกาและอะลูมิเนียมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้รับการกระตุ้น นอกจากนี้ สารละลาย Na_2SiO_3 ยังทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างจีโอพอลิเมอร์และดินตะกอน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน L/FA จนถึงค่าที่เหมาะสม ก่อนที่แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง

3. สารละลายอัลคาไลน์ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการเพิ่ม ปริมาณเส้นปาล์มและสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปอาจส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่มากเกินไปมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเชื่อมประสานของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของโพรงและรอยแตกร้าว ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดในที่สุด



4.การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ที่อายุบ่ม 60 วันที่มีสัดส่วนดินตะกอนกรวดกับโอพอลิเมอร์เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 1.5 โดยทำการทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง(W-D) ทั้งหมด 6 รอบผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง P-S70FA30LO.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่รอบแรกและคงที่ในรอบที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญตามในรอบถัดไปค่ากำลังรับแรงอัดลดลงซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการแช่น้ำและอบแห้งซ้ำๆทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างของตัวอย่างส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงในที่สุด

5.ผลการทดสอบพบว่า MR คงที่ราว 300–310 MPa ที่อัตราส่วน $L/FA = 0.4-0.6$ สูงกว่าเกณฑ์วัสดุชั้นเบส (250 MPa) และใกล้เคียงเกรด Base gravel (300 MPa) จึงเหมาะสำหรับงานฐานถนน ส่วนถ้าให้ค่า MR ต่ำกว่า แม้จะเพิ่มขึ้นที่ $L/FA = 0.5$ แต่ยังไม่ถึงมาตรฐาน ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานโครงสร้างถนน.

6.ผลการทดสอบ FFR พบว่า ถ้าปาล์มให้ค่า V_p สูงกว่าถ้าอย่างทุกช่วงโดยสูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ ($\approx 590-600$ m/s) ขณะที่ถ้าอย่างได้เพียง 430–440 m/s สะท้อนว่าโครงสร้างถ้าปาล์มหนาแน่นกว่า ส่วนค่า V_s ทั้งสองใกล้เคียงกันแต่ถ้าปาล์มยังสูงกว่าเล็กน้อย แสดงถึงความแข็งแรงภายในที่ดีกว่า.

7.ผลการทดสอบพบว่า ค่า UCS สูงสุดที่ $L/FA = 0.5$ โดยถ้าปาล์มได้ 2475 kPa และถ้าอย่าง 2033 kPa สอดคล้องกับค่า Si/Al 3.08–3.17 ซึ่งเหมาะสมต่อการก่อตัวเจล N–A–S–H ทำให้เนื้อวัสดุหนาแน่นและแข็งแรงที่สุด ขณะที่ L/FA ต่ำเกินไป (0.4) หรือสูงเกินไป (0.6) ทำให้การก่อตัวเจลไม่สมบูรณ์และกำลังอัดลดลง.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนตลอดการวิจัย รวมถึงคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ทรัพยากรที่จำเป็น ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและครอบครัวที่เป็นแรงผลักดันสำคัญในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gartner E (2004) Cem Conc Res 34:1489
- [2] Xu, H., & van Deventer, J. S. J. (2000). *The geopolymerization of alumino-silicate minerals*. International Journal of Mineral Processing, 59(3), 247–266.
- [3] Davidovits, J. (1991). *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633–1656.
- [4] Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). *Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete*. Civil Engineering Dimension, 6(2), 88–93.
- [5] Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.-L., Chindaprasit, P., & Suksiripattanapong, C. (2013). *Strength development in clay-fly ash geopolymer*. Construction and Building Materials, 40, 566–574
- [6] published in Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994, pp. 131-149.
- [7] An indirect determination of the specific gravity of soil solids
- [8] Xiao, S., Cai, Y., Guo, Y., Lin, J., Liu, G., Lan, X., & Song, Y. (2022). Experimental study on axial compressive performance of polyvinyl alcohol fibers reinforced fly ash-slag geopolymer composites. Polymers, 14(1), 142.



การพัฒนากำลังอัดและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วย เกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย

Improvement of compressive strength and durability of soft Bangkok clay stabilized with cement incorporating graphene nanosheets and fly ash

ประธัญญา กันทะวงศ์^{1*} ปริญญญา บัวเฟื่อน² วริษฐ์ กล้ากลิการ³ และ พชรดนัย หล้าวงศ์สาย⁴

^{1,2,3,4} นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁵รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 64102047@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยการผสมปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย โดยศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ดัชนีความเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/w) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีน (GO) 0.025% ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ 5 10 15 และ 20% โดยทำการหล่อตัวอย่างรูปร่าง ทรงกระบอก และบ่มที่อุณหภูมิห้อง ปฏิบัติการ เป็นระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน หลังจากครบระยะเวลาการบ่ม นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับ แรงอัดแกนเดียว ผลการทดสอบ ส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.4 ปริมาณเถ้าลอย(FA) 10% จะมีค่ากำลังแรงอัดมากที่สุด เนื่องจาก (B/w_c) เท่ากับ 0.4 จะมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่า (B/w_c) เท่ากับ 0.3 หากเราเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม จะทำให้มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ซึ่งเป็นผลจากการแข็งตัวของซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น กลับกันผลการทดสอบส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.3 ปริมาณเถ้าลอย(FA) 20% ให้กำลังอัดต่ำสุดนั้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ปริมาณซิลิกา (S) และอะลูมินา (A) ที่ต้องใช้ทำปฏิกิริยาก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์กลับไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าลอยทั้งหมด ทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และเกิดโครงสร้าง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่น้อยลง ส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุลดลง ส่วนการทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่า รอบการเปียกและแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเทียบกับสภาพปกติ เนื่องจากการบวมตัว และการหดตัวของดินทำให้เกิดรอยร้าว และลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ LI 1.3 B/w_c0.4GO0.025FA10 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด สุดท้ายนี้การศึกษาพบว่า การผสมเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอยในดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, ปูนซีเมนต์, เกล็ดนาโนกราฟีน, เถ้าลอย, กำลังรับ แรงอัดแกนเดียว, ความคงทนสภาวะเปียกสลับแห้ง

Abstract

This study aims to enhance the engineering properties of Bangkok soft clay through stabilization with cement, graphene nanoplatelets (GNP), and fly ash (FA). The investigation focuses on unconfined compressive strength (UCS) and durability under wet-dry cycles. Experimental variables include a liquidity index (LI) of 1.3, binder-to-water ratio (B/w_c) of 0.3 and 0.4, graphene nanoplatelet (GO) content of 0.025, and fly ash replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% by weight of cement. Cylindrical specimens were prepared and cured at room temperature for 7, 14, 28, and 60 days. After curing, UCS tests were conducted. The results indicate that the mixture with B/w_c = 0.4 and 10% fly ash achieved the highest UCS. This is attributed to the higher cement content in the B/w_c = 0.4 mix, which increases the amount of calcium hydroxide (Ca(OH)₂) generated from cement hydration, thereby enhancing pozzolanic reactions. In contrast, the mixture with B/w_c = 0.3 and 20% fly ash exhibited the lowest UCS due to insufficient calcium hydroxide to react with the increased silica and alumina in fly ash, leading to incomplete pozzolanic reactions and reduced formation of calcium silicate hydrate (C-S-H). Durability tests under wet-dry cycles revealed a progressive reduction in UCS with increasing cycles, mainly due to soil swelling and shrinkage, which induced microcracking and weakened particle bonding. The optimal mix design was found to be LI 1.3–B/w 0.4–GO 0.025–FA 10, which delivered the highest UCS. In conclusion, incorporating graphene nanoplatelets and fly ash into cement-stabilized Bangkok soft clay significantly improves both



compressive strength and durability, highlighting its potential application in geotechnical engineering.

Keywords: Bangkok soft clay, cement stabilization, graphene nanoplatelets, fly ash, unconfined compressive strength, wet-dry durability

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดินเหนียวอ่อนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล เป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำ เช่น มีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงเฉือนต่ำ ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ และมีอัตราการทรุดตัวในระยะยาวสูง [5] ซึ่งลักษณะเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและเสถียรภาพของโครงสร้างพื้นฐานที่ก่อสร้างในพื้นที่ดังกล่าว ดังนั้น การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนจึงมีความจำเป็น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับน้ำหนัก และลดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างการปรับปรุงดินด้วยวัสดุประสานประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเพิ่มกำลังอัดของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากอาจนำไปสู่ต้นทุนที่สูงและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต ส่งผลให้มีความพยายามในการแสวงหาวัสดุเสริมที่สามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ และปรับปรุงสมรรถนะของดินได้อย่างยั่งยืน

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคระดับนาโน จากงานวิจัยของ Lee et al. (2020) [9] กล่าวถึงความเป็นไปได้ของการใช้กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO) เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกำลังอัดของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ และสารเติมแต่งอื่นประกอบไปด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) ซิลิกาฟุ้ง (silica fume, SF) นาโนซิลิกา (nano silica, NS) และตะกั่วหินเหล็ก (ground granulated blast furnace slag, GGBS) พบว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าสารเติมแต่งอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นประมาณ 10.6 ถึง 41.5% และจากการวิเคราะห์ปริมาตรช่องว่าง (Pore volume) ในมวลดินพบว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์นี้มีปริมาตรช่องว่างน้อยกว่าสารเติมแต่งอื่น ดังนั้นคณะผู้วิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปในการใช้กราฟีนออกไซด์มาผสมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

ในงานวิจัยของ Chompoorat et al. (2022) [1] ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (OPC) และเถ้าลอย (fly ash, FA) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test, UC) รวมไปถึงการศึกษาลักษณะของรอบเปียกสลับแห้ง (wetting - drying cycle) Civil Engineering Project 2024 Bachelor of Engineering Program in Civil Engineering ที่มีผลต่อความทนทาน (durability) ของตัวอย่างคือ

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test, W-D) โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบ UC มาทดสอบ W-D รอบที่ 1 3 และ 6 ซึ่งได้ทดสอบตัวอย่างรอบ W-D ไม่เกิน 6 รอบ ชี้ให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยยังคงรักษาความแข็งแรงที่เพียงพอต่อการใช้งาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมด้านกำลัง และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย โดยการทดสอบหา ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) และการทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) โดยการนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงอัดในรอบที่ 1 3 และ 6

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

การพัฒนา กำลังอัด และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ส่งเสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เสริมเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฐานราก

1.2.2 เพื่อศึกษาความคงทนภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ใน โครงสร้างฐานราก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การพัฒนา กำลังอัด และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ส่งเสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยขอบเขตงานดังต่อไปนี้

1.3.1 ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ คือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ จังหวัดสมุทรปราการ และพื้นที่ใกล้เคียง ความลึกประมาณ 8 ถึง 18 เมตร

1.3.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement cement)

1.3.3 กราฟีนออกไซด์ที่ใช้คือ เกล็ดนาโนกราฟีน (graphene nanoplatelet, GNP)

1.3.4 เถ้าลอยที่ใช้คือ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

1.3.5 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1.3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ และเกล็ดนาโนกราฟีนออกไซด์ ประกอบด้วย

- อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/W_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) กราฟีนออกไซด์ (GO)

- ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3

- อัตราส่วนปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 0.025% และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 5 10 15 และ 20%

1.3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ และเกล็ดนาโนกราฟีนออกไซด์ ในสภาวะเปียก



สลับแห้ง ประกอบด้วย อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/Wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็น ผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) เกล็ดนาโนกราไฟท์ (GO) ดัชนีความเหลว (liquidity index, Li) เท่ากับ 1.3 อัตราส่วนปริมาณกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 0.025 %

1.3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราไฟท์ และเถ้าลอย มีดังนี้

1.3.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ตามอัตราส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน

1.3.6.2 การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability) ตามมาตรฐาน ASTM D559 ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน เงื่อนไขรอบวงจรเปียกสลับแห้ง ทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำไปทดสอบแรงกดแกนเดียว เฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การพัฒนากำลังอัด และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้วยเกล็ดนาโนกราไฟท์ และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการมีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังต่อไปนี้

1.4.1 ได้ทราบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

1.4.2 ได้ทราบการสูญเสียด้านกำลังรับแรงอัด โดยทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์และแทนที่ด้วยเถ้าลอย

1.4.3 ส่งเสริมให้มีการนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างในอนาคตได้

1.5 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานของงานวิจัยเรื่อง การพัฒนากำลังอัดและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้วยเกล็ดนาโนกราไฟท์ และเถ้าลอย ดังแสดงในตารางที่ 1

ออกแบบให้เหมาะสมได้ ชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดที่ราบลุ่มของประเทศไทย ดังรูป 1 [4]

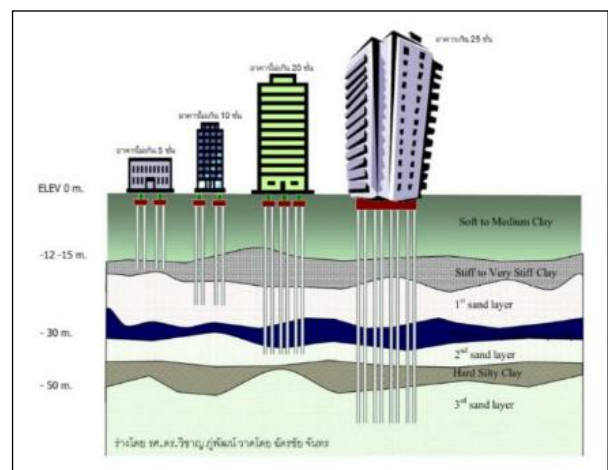
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	พ.ศ.2567		พ.ศ.2568		
		ต.ค-พ.ย	ธ.ค	ม.ค-เม.ย	พ.ค-ก.ค	ส.ค-ต.ค
1	ค้นคว้าศึกษางานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง					
2	ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราไฟท์ออกไซด์และเถ้าลอย					
3	ออกแบบอัตราส่วนผสมสำหรับการทดสอบ จากนั้น เตรียมตัวอย่างดินเหนียว อ่อนกรุงเทพผสม ปูนซีเมนต์ เกล็ดกราฟีนออกไซด์และเถ้าลอย แล้วขึ้น รูปตัวอย่าง					
4	ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกน เดียวของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดกราฟีนออกไซด์ตามสัดส่วนผสม					
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ					
6	สรุปผลการทดสอบ และบทความฉบับสมบูรณ์					

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) เป็นตะกอนชั้นบนที่พบในบริเวณ ที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง รวมถึงกรุงเทพและเขตปริมณฑล มีความหนาประมาณ 15-25 เมตร เนื่องจากเป็นดินชั้นบนสุดจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของคนในพื้นที่ราบภาคกลางตอนล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรุงเทพและเขตปริมณฑล ซึ่งมีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่มากมาย แต่ดินเหนียวกรุงเทพกลับมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่อฐานรากเพราะมีความ ยืดหยุ่นสูง เมื่อน้ำหนักกดทับมาก จะบีบน้ำออกไปจากเนื้อดิน ทำให้เกิดการหดตัวลงมากจนทำให้ฐานรากแตกร้าวเสียหาย ดังนั้น การออกแบบของวิศวกรจึงต้องระมัดระวังต่อเรื่องนี้เป็นอย่างยิ่ง ต้องศึกษาให้เข้าใจจึงสามารถ

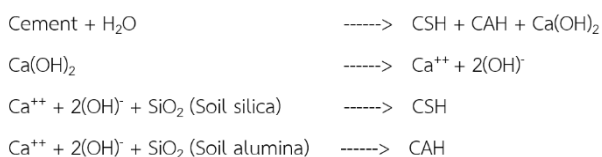


รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินและความยาวเสาเข็มของอาคารขนาดต่างๆ (สุทธิศักดิ์, 2556) [4]



2.1.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

Lambe et al. (1959) [10] และ Moh (1962) [11] ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ CSH, CSCA และ CAF ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH, CAH และการแพร่กระจายปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (released hydrate lime) กระบวนการ ดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH โดยสารทั้งสองจะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ ซึ่งสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง สำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (hydrated lime) ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (reaction product) จะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพสต์ (cement paste) และจะแข็งตัวตามเวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งแรงด้วย โดย Moh (1965) [12] ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้



ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะเปลี่ยนจากวัสดุประเภทที่มีความเป็นพลาสติก กลายเป็นวัสดุที่เปราะมากขึ้น ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะเกิดขึ้นที่ความเครียดต่ำ ความชื้นของดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลง ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของดินจะสูงขึ้น คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่างดิน น้ำ และซีเมนต์ที่ผสมเข้าไป [26]

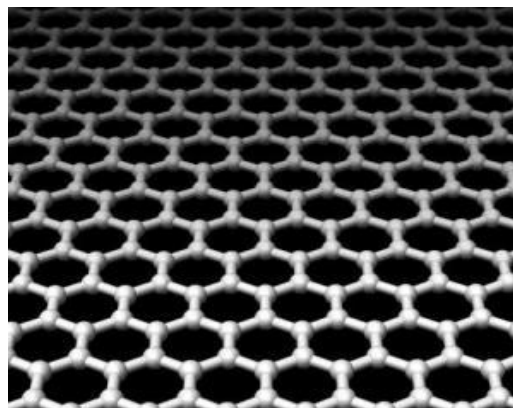
2.1.3 กราฟีนออกไซด์ (GO)

กราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งเดิมเรียกว่าออกไซด์ของกราฟไฟต์ หรือ กรดกราฟไฟต์ เป็นสารประกอบของคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่แปรผัน ซึ่งได้จากการบำบัดกราฟไฟต์ด้วยสารออกซิไดเซอร์ที่แรง และกรดเพื่อแยกโลหะส่วนเกิน กราฟีน (Graphene) เป็น รูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน เคียงข้างกับ เพชร กราไฟท์ ท่อนาโนคาร์บอน และฟูลเลอรีน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรังผึ้งทั่วไป ดังรูปที่ 2 กราฟีนสามารถอธิบายได้ว่าเป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแกรไฟต์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (แกรฟีน ขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) เกือบโปร่งใส เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี มีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับวัสดุอื่นๆ และกับแสง กราฟีนอยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อนำไปใช้หลายอย่าง รวมถึง หน้าจอแสดงผล วงจรไฟฟ้า และเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นแต่ยังคงทน เช่นเดียวกับการแพทย์ กระบวนการทางสารเคมี และอุตสาหกรรมต่างๆ [7]

2.1.4 เกล็ดนาโนกราฟีน (GNPs)

เกล็ดนาโนกราฟีน (Graphene Nanoplatelets หรือ GNPs) เป็นวัสดุนาโนที่ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากมี

โครงสร้างทางกายภาพและคุณสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นเกินวัสดุทั่วไป GNPs ประกอบด้วยชั้นบางของกราฟีนจำนวนไม่กี่ชั้น ซึ่งมีโครงสร้างผลึกของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงในลักษณะตาข่ายหกเหลี่ยม โดยลักษณะทั่วไปของ GNPs คือมีรูปร่างแบนราบคล้ายแผ่นหรือเกล็ด มีความหนาในระดับนาโนเมตร (โดยทั่วไปประมาณ 1–10 นาโนเมตร) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมโครเมตร พื้นผิวของเกล็ดมีลักษณะเรียบแต่สามารถมีความหยาบหรือหมู่ฟังก์ชันทางเคมีเพิ่มเติมขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต



รูปที่ 2 กราฟีนเป็นโครงสร้างตารางแบบรังผึ้งหนาเพียงหนึ่งอะตอมที่ประกอบขึ้นโดยการวางตัวของอะตอมคาร์บอนหลายอะตอม (Wikipedia, n.d.) [8]

เกล็ดนาโนกราฟีนยังมีพื้นที่ผิวสูง สามารถช่วยลดช่องว่างและรูพรุนในเนื้อคอนกรีตได้ ทำให้เกิดโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น ส่งผลให้ลดการซึมผ่านของน้ำและสารเคมี ซึ่งช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้าง และลดความจำเป็นในการใช้คอนกรีตส่วนเกินเพื่อชดเชยการเสื่อมสภาพในอนาคต (ในงานวิจัยนี้จึงใช้เกล็ดนาโนกราฟีน เพราะมีต้นทุนต่ำกว่ากราฟีนออกไซด์ แต่ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน) เกล็ดนาโนกราฟีนมีพื้นที่ผิวสูง สามารถช่วยลดช่องว่างและรูพรุนในเนื้อคอนกรีตได้ ทำให้เกิดโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น ส่งผลให้ลดการซึมผ่านของน้ำและสารเคมี ซึ่งช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้าง และลดความจำเป็นในการใช้คอนกรีตส่วนเกินเพื่อชดเชยการเสื่อมสภาพในอนาคต [16]

2.1.5 แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Fly Ash)

แก้วลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาและอลูมินาสูง ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ โดยเกิด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) และ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Alumino-Silicate Hydrate, C-A-S-H) ที่ช่วยยึดอนุภาคดินให้แน่นขึ้น ลดการทรุดตัวและเพิ่มความเสถียรของดินเหนียวอ่อน นอกจากนี้ยังลดค่าดัชนีพลาสติกและการหดตัวของดินเมื่อลดความชื้น อนุภาคแก้วลอยมีรูปร่างกลม ช่วยให้ส่วนผสมทำงานง่ายขึ้นและลดความต้องการน้ำ ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาแข็งตัวเร็ว เพิ่มความทนทานของชั้นดินต่อแรงเฉือนและการพังทลาย แก้วลอยแม่เมาะยังเหมาะกับการผลิตซีเมนต์โพล์เมอร์ ลดการปล่อยคาร์บอน และใช้ได้ดีในงานปรับปรุงฐานรากหรือถนนบนดินอ่อนของไทยอย่างยั่งยืน[9]



2.1.6 การทดสอบความคงทนของดินที่ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

จากการศึกษาของสัญธิติ เจริญศิลป์ และคณะในปีพ.ศ. 2561 [11] ทำการศึกษาการรับแรงอัดแกนเดียวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (wetting and drying) ด้วยการนำดินตะกอนขุดและเกล็ดลอยมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM D559 ซึ่งจำลองสภาวะเปียกด้วยการแช่น้ำ 5 ชั่วโมงและสภาวะแห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 42 ชั่วโมง ทั้งหมด 6 รอบ จากนั้นนำรอบที่ 1 3 และ 6 มาทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และพบว่า ดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเกล็ดลอยมีความคงทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุง สรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์และเกล็ดลอยช่วยเพิ่มความคงทนของดินตะกอนขุดและสามารถช่วยให้ดินมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้นในการเผชิญกับสภาวะที่เปียกสลับแห้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ผลของแผ่นกราฟีนออกไซด์ของโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์

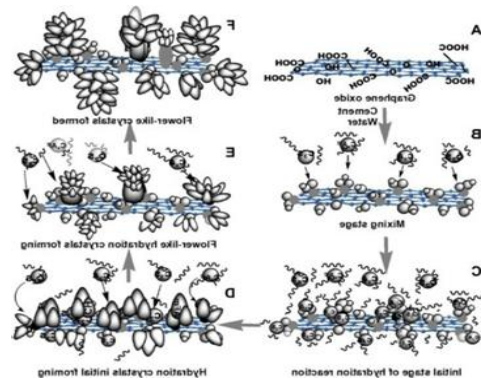
Lv et al. (2013) [11] ศึกษาผลกระทบของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ (GO) ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อเติม GO 0.03% ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 78.6% ความต้านทานการร่อนเพิ่มขึ้น 60.7% และกำลังอัดเพิ่มขึ้น 38.9% เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ทั่วไป และมีกลไกการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการใช้กราฟีนออกไซด์ (GO) ในผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนของซีเมนต์ โดยกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนจำนวนมากบนพื้นผิวของ GO เช่น กลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ทำปฏิกิริยากับ CS, CS และ C3A ในปูนซีเมนต์ควบคุมการก่อตัวของผลึกไฮดรเจนผ่านเอฟเฟกต์เทมเพลต (Template Effect) โดยมี PC (Plasticizer) ช่วยชะลอปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ GO และช่วยให้ GO มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงผลึกไฮดรเจนให้เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 3 ส่งผลให้วัสดุแข็งแรงขึ้น และอาจมีการนำไปใช้ปรับปรุงความเหนียวของปูนซีเมนต์ในอนาคต

2.2.2 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุผสมซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

จากงานวิจัยเรื่องความแข็งแรงของวัสดุผสมซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ Chintalapud et al. ในปี ค.ศ. 2020 [2] ได้ทำการศึกษาคูสมบัติคอนกรีตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในอัตราต่างๆ (0.01% - 0.05% ของน้ำหนัก ซีเมนต์) พบว่าการเพิ่มกราฟีนออกไซด์ (GO) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยการใช้ GO ในปริมาณ 0.02% และ 0.03% ทำให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 28.5% และ 46.4% ตามลำดับ ภายใน 28 วันของการบ่ม ซึ่งเกิดจากการเพิ่มความชื้นที่สูงขึ้นและการมีอยู่ของแคลเซียมเมตาซิลิเกต (Metasilicate, CaSiO_3) ที่มีลักษณะเป็นผลึกและเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการไฮดรเจนของปูนซีเมนต์ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของส่วนผสมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกราฟีนออกไซด์ในปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.3 ผลของกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติการไหลของปูนซีเมนต์

Yu et al. (2015) [20] ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการวิจัยนี้ ซิลิกาฟุ่ม (SF) ถูกใช้เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่ม (SF) และกราฟีนออกไซด์ที่ห่อหุ้มซิลิกาฟุ่ม (GOSF) ต่อความสามารถในการไหลของปูนซีเมนต์ พบว่าการเติม GO ช่วยลดการไหลของปูนซีเมนต์ และ SF หรือ GOSF ก็ลดความสามารถในการไหลของปูนซีเมนต์ได้เช่นกัน แต่ GOSF มีความสามารถในการไหลสูงกว่า SF ที่ปริมาณเท่ากัน โดยปูนซีเมนต์ที่มี GOSF มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและความหนืดพลาสติกต่ำกว่า SF ส่งผลให้วัสดุทำงานง่ายขึ้น ในขณะที่ยังรักษาความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ได้ดี แสดงให้เห็นว่า GO มีบทบาทสำคัญในการช่วยให้การทำงานของวัสดุเป็นไปได้ง่ายขึ้น และยังสามารถรักษาความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ไว้ได้ในระดับที่สูงขึ้น



รูปที่ 3 แนวคิดกลไกการเจริญเติบโตของผลึกไฮดรเจนผ่านการควบคุมของ GO ของผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนของซีเมนต์ Lv et al (2013) [10]

2.2.4 การใช้เกล็ดลอยแทนปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงดิน

Dias Dwi Hatmoko et al. (2024) [3] งานวิจัยนี้ศึกษาการโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของดินฐานที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงต่ำ การทดลองใช้ดินจากโครงการทางด่วน Sentul – Karawang ประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งนำมาผสมกับปูนขาวในสัดส่วน 4.2% โดยน้ำหนักของดินแห้ง และผสมกับเกล็ดลอยในอัตราส่วน 1.4%, 2.1%, 2.8%, 3.5% และ 4.2% เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และกลศาสตร์ของดิน เช่น ความหนาแน่นสูงสุด (MDD), ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC), และการกระจายขนาดอนุภาคของดิน แสดงให้เห็นว่าดินที่ปรับปรุงแล้วมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลดลง ซึ่งแสดงถึงความแน่นและประสิทธิภาพในการบดอัดที่ดีขึ้น ดินยังมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

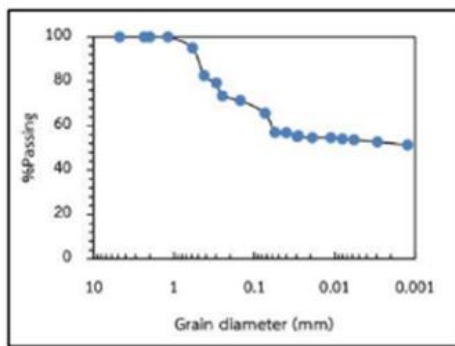
ในงานวิจัยนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน เกล็ดลอย และสารลดน้ำพิเศษ (Plasticizer, PS) โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



จากพื้นที่อำเภอบาง ป่อ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งมีความลึกประมาณ 8 ถึง 18 เมตร และพื้นที่ใกล้เคียง ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และเกล็ดนาโนกราฟีนที่ใช้เป็นชื่อว่า Graphene Nanoplatelets (GNP) และขนาดผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในรูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 5

3.2 การสังเคราะห์เกล็ดนาโนกราฟีน

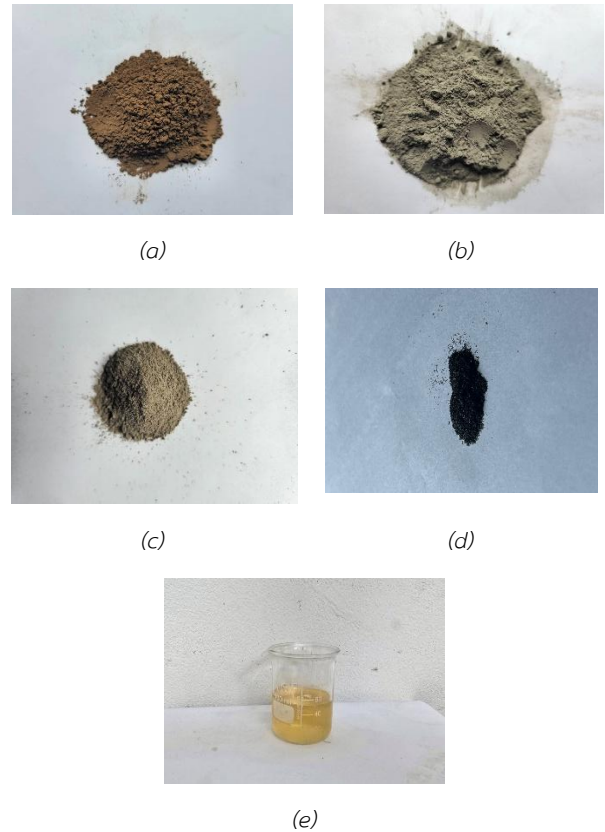
เริ่มต้นจากการชั่งน้ำ 500 กรัม น้ำส่วนหนึ่งจากอัตราส่วนผสม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (รูปที่ 6a) ต่อมาชั่งกราฟีนและสารลดน้ำพิเศษ (PS) ปริมาณ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ แล้วผสม PS กับน้ำและคนให้เข้ากัน (รูปที่ 6b) ตามด้วยเติมเกล็ดนาโนกราฟีนและคนด้วยมือ (รูปที่ 6c) หลังจากนั้นนำสารผสมใส่เครื่องคนสารแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) โดยนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลง ไป แล้วทำการปิดผนึกด้วยแผ่นพลาสติก จากนั้นทำการคนสารที่ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 6d) ขั้นตอนสุดท้ายนำไปผ่านเครื่องสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) กำลังไฟ 220 วัตต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (รูปที่ 6e) จึงจะสามารถนำเกล็ดนาโนกราฟีนในรูปของเหลวนำไปใช้สำหรับผสมตัวอย่างได้



รูปที่ 4 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ก้องภพ คำน้อย และคณะ) (ปี 2567)

คุณสมบัติของดิน	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	2.64
ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)	77.80 %
ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)	35.78 %
ขีดจำกัดแห้ง (shrinkage limit)	16%
ดัชนีพลาสติก (plastic index)	42.02 %
ดัชนีเหลว (liquid limit)	0.63
ปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content)	62.24 %
หน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight)	10.36 kN/m ³
เปอร์เซ็นต์การร่อนตะแกรงผ่านเบอร์ 200	56.98 %
การจำแนกประเภทดิน (soil classification, USCS)	CH



รูปที่ 5 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (a) แก้วลอย (b) ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (c) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (d) ผงกราฟีนออกไซด์ และ (e) PC (Plasticizer)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อหาค่ากำลังแรงอัดของวัสดุผสม จากดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน และแก้วลอย โดยการเตรียมตัวอย่างและนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งและนำมาบดเป็นผง แล้วจึงนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ และแก้วลอย จากนั้นเติมเกล็ดนาโนกราฟีนในรูปแบบของเหลวและนำน้ำผสมให้เข้ากัน จากนั้นหล่อในท่อ PVC เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 3.7 x 7.6 ซม. ต่อมาห่อด้วยพลาสติกและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน หลังจากบ่มครบกำหนด วัดขนาดตัวอย่างแล้วทดสอบในเครื่องกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลลัพธ์ที่ได้ค่า q_u คำนวณจากแรงอัด สูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งช่วยทำให้ประเมินความสามารถในการรับแรงอัดของ วัสดุผสม และยืนยันคุณภาพของดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุง คุณภาพแล้ว



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 6 การสังเคราะห์กราฟีน (a) เตรียมส่วนผสม (b) ผสมน้ำกับ Plasticizer คนด้วยมือให้เข้ากัน (c) เทผงเกล็ดคาร์บอนกราฟีนลงไปในน้ำให้เข้ากัน (d) นำส่วนผสมไปใส่เครื่องคนสารแม่เหล็ก (e) หลังครบ 24 ชั่วโมง นำส่วนผสมมาใส่ในเครื่องสั่นสะเทือนด้วยอัตราโซนิก และ (f) เกล็ดคาร์บอนกราฟีนในรูปแบบของเหลวที่พร้อมใช้สำหรับการนำไปผสมตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 ตารางทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ กราฟีนและเถ้าลอย

ลำดับ	ดัชนีเหลว (LI)	B/W _c	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์กราฟีนต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (GO)	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (FA)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว			
					บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
1	1.3	0.3	0.025	5	✓	✓	✓	✓
2				10	✓	✓	✓	✓
3				15	✓	✓	✓	✓
4				20	✓	✓	✓	✓
5	1.3	0.4	0.025	5	✓	✓	✓	✓
6				10	✓	✓	✓	✓
7				15	✓	✓	✓	✓
8				20	✓	✓	✓	✓

ดัชนีเหลว (LI) , อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (GO) , อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์(FA)

3.3.2 การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability) ตามมาตรฐาน ASTM D559 มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการสูญเสียค่ากำลังของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย

ปูนซีเมนต์ เกล็ดคาร์บอนกราฟีนและเถ้าลอย โดยนำดินเหนียวอบแห้งแล้วบดเป็นผง ผสมเกล็ดคาร์บอนกราฟีน และเถ้าลอย ในรูปแบบเหลวและน้ำผสมให้เข้ากัน จากนั้นหล่อในท่อ PVC เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 3.7 x 7.6 ซม. บ่มในอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 7 28 และ 60 วัน หลังจากบ่มครบระยะเวลา จึงนำมาทดสอบความคงทนโดยการแช่ตัวอย่างในน้ำ 5 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส 42 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการทำ 1 รอบเปียกสลับแห้ง ทำซ้ำ 6 รอบ โดยเลือกรอบที่ 1, 3 และ 6 มาทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลลัพธ์ช่วยประเมินความคงทนและความสามารถในการรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

ตารางที่ 3.3 ตารางทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ เกล็ดคาร์บอนกราฟีนและเถ้าลอย

ลำดับ	(LI)	B / W _c	GO (FA)	ทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง								
				บ่ม 7 วัน			บ่ม 28 วัน			บ่ม 60 วัน		
				รอบที่			รอบที่			รอบที่		
				1	3	6	1	3	6	1	3	6
1	1.3	0.3	0.02	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2				10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3				15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4				20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	1.3	0.4	0.02	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6				10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7				15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8				20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ดัชนีเหลว (LI) , อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (GO) , อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์(FA)

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test, UC) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (C) เกล็ดคาร์บอนกราฟีน (GO) และเถ้าลอย (FA) โดยใช้อัตราส่วนผสมปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณในมวลดิน (B/W_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ใช้ดัชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) เท่ากับ 1.3 ปริมาณเกล็ดคาร์บอนกราฟีน 0.025% และปริมาณเถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์ เท่ากับ 5 10 15 และ 20% โดยบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน จากการทดสอบพบว่า ส่วนผสม (B/W_c) เท่ากับ 0.3 แบบไม่ใส่เถ้าลอย (FA=0%) จะได้ค่ากำลังรับแรงอัด (q_u) ที่อายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน มีค่า q_u เท่ากับ 1694.19 2201.81 2469.35 และ 2713.19 kPa จะตามลำดับ เพราะดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า q_u เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ FA ไป 5% มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย (FA=0%) ซึ่งอายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน มีค่า q_u เท่ากับ 1561.54 1661.53 2364.16 และ 2624.34 kPa ตามลำดับ เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงไป 5% เนื่องจากเถ้าลอย



เป็นสารปอซโซลานิก (Pozzolan) ที่ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าตาม [18] ซึ่งทำให้ค่า q_u ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 7a

ในส่วนผสม (B/W_c) เท่ากับ 0.4 แบบไม่ใส่เถ้าลอย (FA=0%) จะได้ค่ากำลังรับแรงอัด (q_u) สูงสุด แสดงดังรูป 7b ที่อายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน มีค่า q_u เท่ากับ 2658.31 3085.01 3784.19 และ 4659.85 kPa ตามลำดับ ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับส่วนผสม (B/W_c) เท่ากับ 0.3 และเถ้าลอย เท่ากับ 0% ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า q_u เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้น

แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ FA เท่ากับ 5% มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมเถ้าลอยอื่น ซึ่งอายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน มีค่า q_u เท่ากับ 1747.08 1828.72 2505.93 2896.5 และ 2896.58 kPa ตามลำดับ อาจเป็นเพราะ เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงไป 5% ซึ่งเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานิก ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าตาม [18] และสาเหตุที่อัตราส่วนเถ้าลอย (FA) 5% มีค่า q_u ที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. D. Rao, S. Dey, and B. P. Rao et al. (2023) [14]

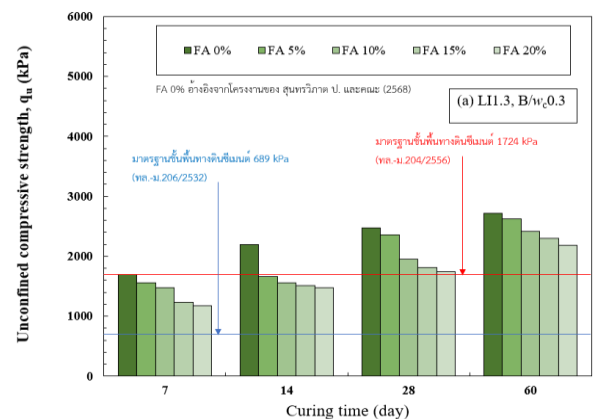
เถ้าลอยถือว่าเป็น วัสดุปอซโซลา ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับ CH และน้ำ จะเกิดเป็น CSH เพิ่มเติม ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 10% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยและการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ร่วมกัน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อระยะเวลาผ่านไป ในส่วนผสม (B/W_c) เท่ากับ 0.4 และเถ้าลอย เท่ากับ 10% แสดงดังรูป 7b ซึ่งที่อายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2682.72 2744.48 3075.08 และ 4180.60 kPa ตามลำดับ

โดยภาพรวมส่วนผสมที่มี (B/W_c) เท่ากับ 0.4 จะมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่า (B/W_c) เท่ากับ 0.3 หากเราเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมจะทำให้มี CH ซึ่งเป็นผลจากการแข็งตัวของซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่ง CH นี้เป็นสารตั้งต้นหลักในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกา (S) ในเถ้าลอยเพื่อสร้างสารที่ให้ความแข็งแรงคือ CSH เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะมี CH ส่วนเกินมากขึ้นทำให้สามารถรองรับปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นจุดที่เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ที่สุดจึงยับยั้งจาก 5% ไปเป็น 10% ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนเถ้าลอยที่สูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. E. C. P. C. A. C. T. et al. (1959) [15]

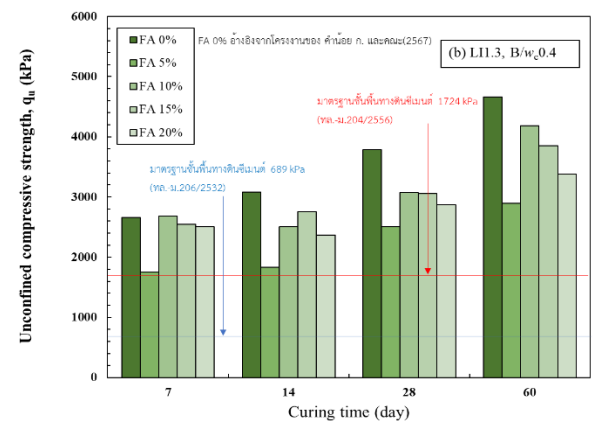
ตามมาตรฐานกำหนดของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ชั้น Base ตามข้อกำหนด ทล.-ม.206/2532 และชั้น Subbase ตามข้อกำหนด ทล.-ม.204/2556 ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 1,724 และ 689 kPa ตามลำดับ [22] ในการทดสอบ ใช้อัตราส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าค่า q_u มีค่าเท่ากับ 1,694.19 1,561.54 1,478.10 1,236.49 และ 1,178.16 ksc เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0 5 10 15 และ 20% ตามลำดับ จากผลการทดสอบ

พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของทุกสัดส่วนที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานและใช้งานได้สำหรับชั้น Subbase แต่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับชั้น Base ในทุกสัดส่วนการแทนที่ แสดงดังรูปที่ 7a

ในส่วนของอัตราส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าค่า q_u มีค่าเท่ากับ 2,658.31 1,747.08 2,682.72 2,541.92 และ 2,508.53 ksc เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0 5 10 15 และ 20% ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของทุกสัดส่วนที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานและใช้งานได้สำหรับชั้น Base และ Subbase แสดงดังรูปที่ 7b



รูปที่ 7a ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.3



รูปที่ 7b ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.4

4.2. ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test)

ในการทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง จะใช้อัตราส่วนผสมปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ใช้ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 อัตราส่วนปริมาณ



เกล็ดนาโนกราฟีน เท่ากับ 0.025% กับเกล็ดลอยที่อัตราส่วน 5 10 15 และ 20% ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน โดยใช้ตัวอย่างขนาดเดียวกับการทดสอบ UC ซึ่งเริ่มจากการนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแห้ง นับเป็น 1 รอบของการจำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง ทำทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6 จากการทดสอบพบว่า ยิ่งระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.3 โดยในการทดสอบรอบที่ 1 ค่า q_u จะลดลงที่ 15.9 และ 8% เมื่อเทียบกับค่า q_u ในสภาวะปกติ ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 10 ในการทดสอบรอบที่ 3 ค่า q_u จะลดลงที่ 34.22 และ 13% ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ในการทดสอบรอบที่ 6 ค่า q_u จะลดลงที่ 37.35 และ 29% ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ต่อมาในอัตราส่วนผสม (B/w_c) เท่ากับ 0.4 โดยในการทดสอบรอบที่ 1 ค่า q_u จะลดลงที่ 5.2 และ 9% เมื่อเทียบกับค่า q_u ในสภาวะปกติ ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 11 ในการทดสอบรอบที่ 3 ค่า q_u จะลดลงที่ 7.8 และ 13% ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ในการทดสอบรอบที่ 6 ค่า q_u จะลดลงที่ 55.15 และ 27% ตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน

ในการทดสอบ (B/w_c) เท่ากับ 0.3 ในทุกอายุการบ่มตัวพบว่า การเพิ่มเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้ค่า q_u ลดลงเล็กน้อย เมื่อจำนวนรอบ W-D เพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 6 จะได้ค่า q_u เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่เกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ($FA=0\%$) โดยอายุการบ่มตัว 7 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 11.49% และเพิ่มขึ้น 4.60 กับ 36.00% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มตัว 28 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 2.44% และเพิ่มขึ้น 3.17 กับ 1.51% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ จนกระทั่งอายุการบ่มตัว 60 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 0.13% 7.82 และ 1.30% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่เกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ($FA=0\%$) แสดงดังรูปที่ 8 เพราะการนำตัวอย่างไปแช่น้ำจะเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาปอกโซลานซึ่งทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นส่งผลให้ลดปริมาณช่องว่าง และเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินกับปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saha A. K. and Sarker P. K. (2017) [17] แต่เมื่อเราเพิ่มปริมาณเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ทำให้ค่า q_u ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเกล็ดลอย เพราะเมื่อปริมาณเกล็ดลอยเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงไป ตามอัตราส่วนผสม นอกจากนี้เกล็ดลอยเป็นสารปอกโซลานิกที่ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าตาม [18] แต่สำหรับอายุการบ่มตัว 60 วัน รอบที่ 1 ได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากตัวอย่างที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน เพราะปฏิกิริยาปอกโซลานิกในเกล็ดลอยจะเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์หลังจากการบ่มตัวที่ 60 วัน ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในรอบที่ 1 ต่อมาในกรณีที่เราเพิ่มเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ เป็น 10 15 และ 20% จะพบว่าค่า q_u จะลดลงตามจำนวนเกล็ดลอยที่เพิ่มขึ้นในทุกจำนวนรอบในการทดสอบ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงไป ซึ่งเกล็ดลอย เป็น

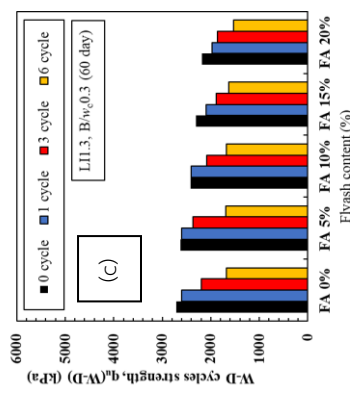
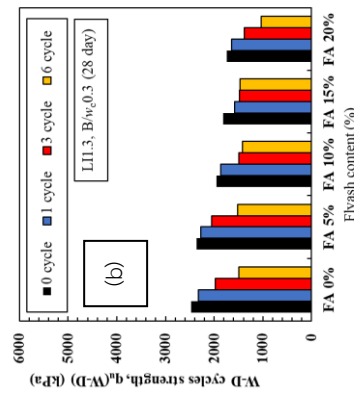
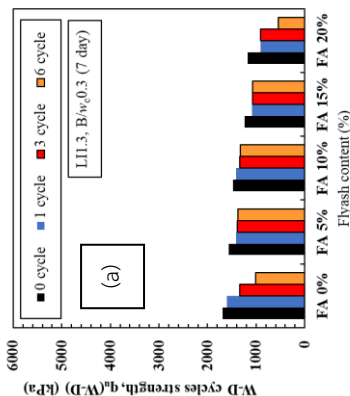
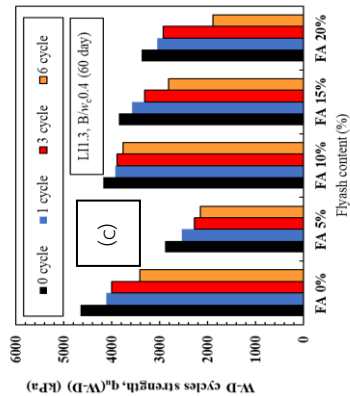
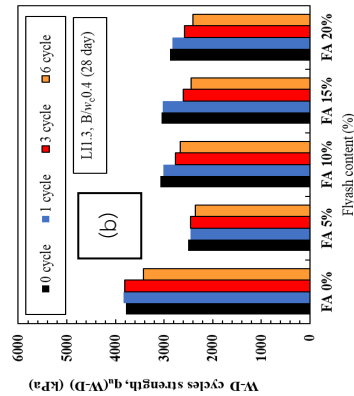
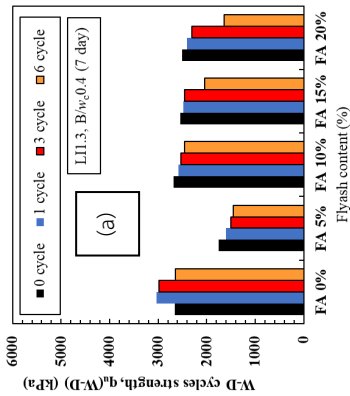
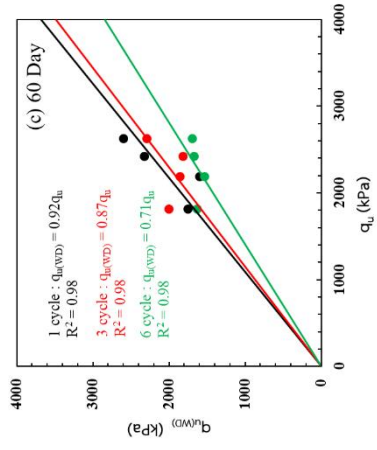
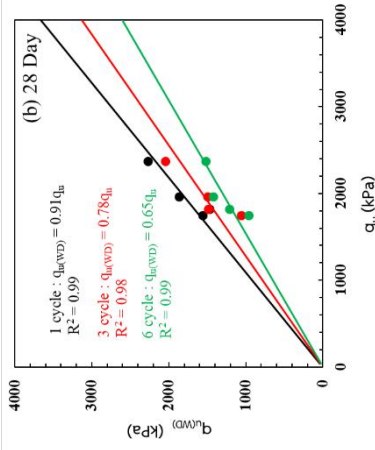
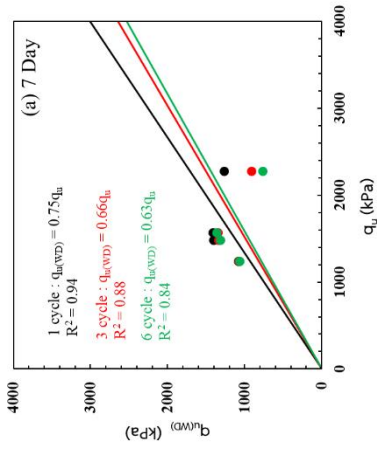
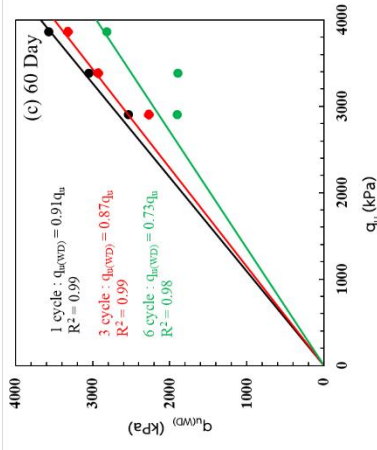
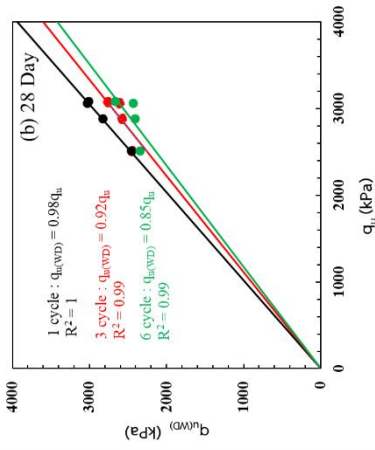
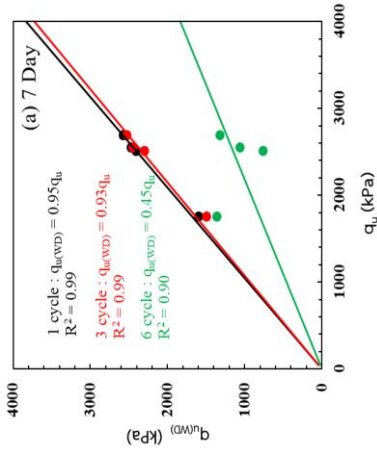
สารปอกโซลานิก ที่ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าตาม [18] ทำให้ค่า q_u ลดลง

ส่วนในการทดสอบ (B/w_c) เท่ากับ 0.4 ในทุกอายุการบ่มตัวพบว่า การเพิ่มเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% จะได้ค่า q_u ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่เกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยอายุการบ่มตัว 7 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 47.19 49.67 และ 45.29% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ ในอายุการบ่มตัว 28 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 35.92 35.76 และ 31.47% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ ในอายุการบ่มตัว 60 วัน จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง 38.35 43.16 และ 44.25% ที่จำนวนรอบ 1 3 และ 6 ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 อาจเป็นเพราะ ปริมาณเกล็ดลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงไป ซึ่งเกล็ดลอยเป็นวัสดุปอกโซลานิกที่ทำให้ปฏิกิริยาปอกโซลานิกเกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าตาม [18] นอกจากนี้แนวโน้มของผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. D. Rao, S. Dey, and B. P. Rao et al. (2023) [14]

จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ดังรูปที่ 8-9 เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวจะเกิดการบวมตัวเมื่อสัมผัส กับน้ำในสภาวะเปียก ซึ่งน้ำจะซึมเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในดิน เมื่อน้ำในดินระเหยออกในช่วงสภาวะแห้ง อนุภาคดินเหนียวจะหดตัวจากการ สูญเสียน้ำ กระบวนการนี้ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ขยายตัวขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินลดลง และความแข็งแรงของดินก็ลดลงตามไปด้วย ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของพิรพงษ์และคณะ (2561) [19] ในงานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ และเกล็ดลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง และงานวิจัยของ สัณฐิติ และคณะ(2561) [28] ในงานวิจัยนี้ศึกษาของดินตะกอนปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ และเกล็ดลอยเป็นวัสดุทาง

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงอัด

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Elasticity) เป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถของดินในการตอบสนองต่อการยืดหรือหดตัวภายใต้แรงภายนอก ซึ่งเป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดิน และสามารถคำนวณการทดสอบทางวิศวกรรม เช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ดังแสดงในรูปที่ 7 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า E^{50} และ q_u พบว่า เมื่อค่า E^{50} มีค่าที่สูงจะทำให้ค่า q_u สูงตามด้วย โดยได้นำงานวิจัย Jamsawang et al. (2017) [7] ที่มีอัตราส่วนผสมของดินเหนียวกับซีเมนต์ เพื่อเติมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ค่าที่คำนวณได้คือ $E^{50} = 60.00q_u(\text{MPa})$ และ $R^2 = 0.97$ และ Jongpradit et al. (2018) [8] โดยอัตราส่วนผสมของงานวิจัยจะมีเถ้าขานอ้อยเป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงในองค์ประกอบทางเคมีโดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยบางส่วน และผสมกับดินเหนียวอ่อนเพื่อสร้างดินเหนียวอ่อนที่ผสมปูนซีเมนต์มาแสดงในกราฟ ซึ่งค่าคำนวณที่ได้คือ $E^{50} = 73.00q_u(\text{MPa})$ และ $R^2 = 0.82$ เมื่อนำมาใส่ในกราฟเพื่อเทียบค่าพบว่าค่าคำนวณที่ได้ในกราฟดังสมการที่ (1) ของงานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jamsawang et al. (2017) [7] ที่นำมาเทียบ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด
ในสถานะเปียกสลับแห้ง เมื่อเทียบกับ
กำลังอัดในสภาพปกติของส่วนผสม
L11.3B/wc0.4

รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด
ในสถานะเปียกสลับแห้ง เมื่อเทียบกับ
กำลังอัดในสภาพปกติของส่วนผสม
L11.3B/wc0.3

รูปที่ 9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดใน
สถานะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณเกล็ด
นาโนกราฟีนของส่วนผสม L11.3B/wc0.4
(a) = 7day (b) = 28 วัน (c) = 60 วัน

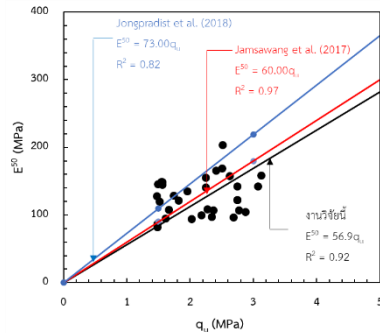
รูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดใน
สถานะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณเกล็ด
นาโนกราฟีนของส่วนผสม L11.3B/wc0.3
(a) = 7day (b) = 28 วัน (c) = 60 วัน



$$E^{50} = 56.90q_u \text{ (MPa) และ ค่า } R^2 = 0.92 \quad (1)$$

โดยที่ E^{50} = โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)

q_u = ค่ารับกำลังรับแรงอัด (MPa)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E^{50} และ q_u ของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีน

4.4 การพัฒนากำลังและระยะเวลาการบ่มตัว เมื่อเทียบกับกำลังที่ 28 วัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาบ่มตัวและระยะเวลาการบ่มตัวเมื่อเทียบกับกำลังที่ 28 วัน (q_{u0}/q_{u28D}) และระยะเวลาการบ่มตัว (day) ได้เป็นสมการฟังก์ชันของ ln ดังสมการที่ (2) และ $R^2 = 0.89$ ซึ่งได้มาจากการคำนวณและเลือกค่าออกมา เมื่อนำค่าสมการที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้ มาเทียบกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) [21] โดยมีอัตราส่วนผสมของตะกอนที่ขุดลอกออกมาซึ่งปรับเสถียรด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เมื่อคำนวณค่าสมการออกมาจะอยู่ที่ $0.313\ln(D) + 0.076$ และค่า $R^2 = 0.88$ และ Horpibulsuk et al. (2011) [6] ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของดินเหนียว-น้ำ/ปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ เมื่อคำนวณออกมาค่าสมการอยู่ที่ $q_{u0}/q_{u28D} = 0.293\ln(D) + 0.026$ และ $R^2 = 0.91$ เมื่อนำมาใส่ในกราฟเพื่อเทียบค่าพบว่าค่าคำนวณที่ได้ในกราฟดังสมการที่ (2) และ (3) ของงานวิจัยนี้มีค่าแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) [24] ที่นำมาเทียบ แสดงดังรูปที่ 13

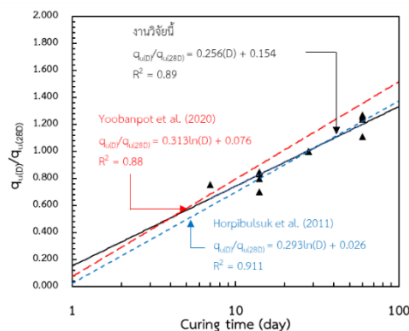
$$q_{u0}/q_{u28D} = 0.256\ln(D) + 0.154 \text{ และ } R^2 = 0.89 \quad (2)$$

$$q_{u0}/q_{u28D} = 0.201\ln(D) + 0.364 \text{ และ } R^2 = 0.78 \quad (3)$$

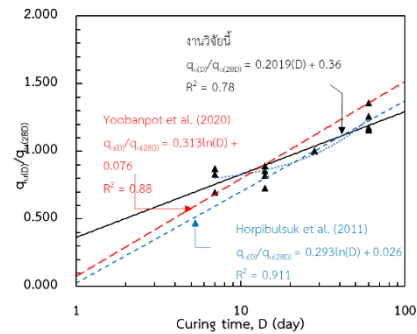
โดยที่

q_{u0} = ค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียวหลังจาก D วันของการบ่ม

q_{u28D} = ค่ากำลัง 28 วัน และ D คือระยะเวลาในการบ่มตัวเป็นวัน



รูปที่ 13a ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_{u0}/q_{u28D} และ Curing tome (day) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีน สำหรับ (B/w_c) เท่ากับ 0.3



รูปที่ 13b ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_{u0}/q_{u28D} และ Curing tome (day) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีน สำหรับ (B/w_c) เท่ากับ 0.4

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากำลังอัดและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน และถ่ลยการศึกษาพบว่า

1. การเติมถ่ลยในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้เพิ่มค่ากำลังอัดของดินผสมปูนซีเมนต์ เนื่องจากถ่ลยมีส่วนช่วยในการเสริมโครงสร้างภายในของวัสดุ ทำให้เนื้อวัสดุมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น
2. เมื่อนำวัสดุไปทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในที่เกิดจากการบวมตัวและหดตัวของดิน ทำให้เกิดรูพรุนและรอย แตกร้าวทำให้โครงสร้างของวัสดุอ่อนแอลง
3. ปริมาณถ่ลยที่เหมาะสมที่สุดในดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ คือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่ลย 10%
4. ถ่ลยสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และการใช้ถ่ลยยังสามารถช่วยลดต้นทุน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต แต่วัสดุนี้มีปัญหาเรื่องความทนทานต่อสภาพเปียกสลับแห้งที่ต้องแก้ไข เพื่อให้ใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6. อ้างอิง

- [1] Chompoorat T, Thepumong T, Khamplo A and Likitlersuang S. (2022). Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing. Construction and Building Materials, 316, 125858,
- [2] Chintalapudua K and Pannem R. (2020). Strength properties of graphene oxide cement composites. Materials Today: Proceedings, 45(4), pp.3971-3975.
- [3] Dwi Hatmoko et al (2024) , EFFECT OF USING LIME AND FLY ASH AS A CEMENT SUBSTITUTE FOR SOIL STABILITY Dias



- [4] Hoque, N. M. R., Islam, S., Ray, S., & Sarker, S. (2024). *Optimization of fly ash and cement for stabilizing clay soil* [Preprint]. Shahjalal University of Science and Technology.
- [5] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A. (2010). Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 1521-1531
- [6] Horpibulsuk S, Yangsukkaseam N, Chinkulkijniwat A and Jun Du Y. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science*, 52, pp.150-159.
- [7] Jamsawang P, Poorahong H, Yoobanpot H, Songpiriyakij S and Jongpradist P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. *Construction and Building Materials*, 154, pp.61-71.
- [8] Jongpradist, P., Homtragoon, W., Sukkarak, R., Kongkitkul, W., & Jamsawang, P. (2018). Efficiency of rice husk ash as cementitious material in high-strength cement-admixed clay. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 8346319.
- [9] Lee S, Jeongb S, Kim D and Won J. (2020). Graphene oxide as an additive to enhance the strength of cementitious composites. *Composite Structures*, 242, 112154.
- [10] Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959) Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compound Highway Research Board. Bulletin 241, pp.67-103
- [11] Lv S. Ma Y, Qiu C, Sun T, Liu J and Zhou Q. (2013) Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*, 49, pp.121-127.
- [12] Moh, Z. C. (1962). Soil stabilization with cement and sodium additives. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(6), pp.81-105.
Retrieved from <https://www.thitinan.co.th/bangkok-clay>
- [13] Moh, Z. C. (1965). Reactions of soil minerals with cement and chemicals. *Highway Research Record*, (86).
- [14] M. D. Rao, S. Dey, and B. P. Rao, *Characterization of fiber reinforced self-compacting concrete by fly ash and cement, Chemistry of Inorganic Materials*, vol. 1, 2023, Art. no. 100010.
- [15] R. E. C. P. C. A. C. T. (1959). Use of flyash with Portland cement for stabilization of soils. *Transportation Research Board Bulletin*, 198.
- [16] ScienceDirect Topics. Graphene Nanoplatelets – an overview. Retrieved August 12, 2025
- [17] Saha A. K. and Sarker P. K. (2017) Durability of Mortar Incorporating Ferronickel Slag Aggregate and Supplementary Cementitious Materials Subjected to Wet–Dry Cycles. *Journal of Concrete Structures and Materials*, pp. 12-14.
- [18] Sofia A. D. and Kamal N. (2023) The Effect of Fly Ash Mixture on Concrete Compressive Strength. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, Vol. 8, No. 1. pp. 19-24.
- [19] Thitinan Micropile. (2020). สู่ที่ดี, ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Bangkok clay), (2556).
Retrieved from <https://www.thitinan.co.th/bangkok-clay>
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า 120-125.
- [20] Yu , Dong Z, Chao Y, Yanyun L and Yong L. (2015). Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes, *Construction and Building Materials*, 96, pp.20-28.
- [21] Yoobanpota N, Jamsawanga P, Poorahong H, Jongpradist P and Likitlersuang S. (2020). Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash. *Engineering Geology*, 267, 105491.
- [22] Yoobanpot N., Jamsawang P., Simarat P., Jongpradist P., Likitlersuang S. (2020) Sustainable reuse of dredged sediments as pavement materials by cement and fly ash stabilization. *Journal of Soils and Sediments*, pp. 12.
- [23] กฟผ. Unseen EGAT by ENGY ตอน จากของที่ต้องทิ้ง สู่คอนกรีตจากเถ้าลอย ช่วยลดรายจ่าย แถมเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (2021)
- [24] พรพงษ์ สมารตัน, พิทยา แจ่มสว่าง, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต และ กมลวัลย์ ลือประเสริฐ (2561). การปรับปรุงคุณภาพตะกอนดินชุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง : กรณีศึกษาเขื่อนแม่สาบ.
- [25] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี (2568), แกรฟีน (Graphene).
Retrieved from <https://th.wikipedia.org/wiki/แกรฟีน>
- [26] ศุภกิจ นนทานันท์ และกมล อมรฟ้า (2545), การปรับปรุงคุณภาพ ดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว, การประชุมวิชาการ
- [27] สัณฐิติ เจริญศิลป์, พิทยา แจ่มสว่าง, เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต. (2561), การปรับปรุงคุณภาพตะกอนดินชุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
- [28] สัณฐิติ เจริญศิลป์, พิทยา แจ่มสว่าง, เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต. (2561). การปรับปรุงคุณภาพตะกอนดินชุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23, นครนายก, 18-20 กรกฎาคม 2561, หน้า 1-3.



การศึกษาสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลเพื่อความยั่งยืน

Engineering Properties of Sediment Soil Stabilized with Cement Blended with Biomass Waste Ashes for Sustainable Ground Improvement

นายชยพัทธ์ สว่างกุล^{1*} นางสาวณมล สารคาม² นางสาวปฐมาวดี แสงฤทธิ์³ และนายอำพล วันดี⁴

^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101980@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวล มีเป้าหมายเพื่อใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งมาทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยการหาวัสดุที่เหลือใช้ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาหนึ่งในปูนซีเมนต์ได้ บทความวิจัยนี้ต้องการหาปริมาณและอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอน, ระยะเวลาการบ่ม, คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนหลังการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบและใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสามารถนำไปใช้ในการทำงานก่อสร้างถนนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด คุ่มค่าที่สูงสุด และช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มสามารถนำมาใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนที่กว้านพะเยาให้สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนในชั้นรองพื้นทางได้

คำสำคัญ: ดินตะกอนกว้านพะเยา, เถ้าไม้ยางพารา, เถ้าปาล์ม, ปูนซีเมนต์, ปฏิกิริยาปอซโซลาน

Abstract

This research aims to explore the utilization of biomass waste materials as partial replacements for cement to reduce cement consumption. The focus is on identifying waste materials capable of undergoing pozzolanic reactions, which are essential in cementitious systems. The study investigates the optimal mix ratios between cement and two types of biomass ashes—rubber wood ash and palm ash—for improving the engineering properties of sediment soil. Key parameters include curing duration, strength development, and engineering behavior of the treated soil. The results are intended to support the design and application of soil stabilization in road construction, promoting efficiency, cost-effectiveness, and

environmental sustainability. The findings indicate that both rubber wood ash and palm ash can be effectively blended with cement to enhance the quality of sediment soil, rendering it suitable for use as subgrade material in pavement structures.

Keywords: Sediment soil, Rubber wood ash, Palm ash, Cement, Soil stabilization

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กว้านพะเยาเป็นทะเลสาบภาคเหนือถูกล้อมรอบไปด้วยภูเขาเมื่อเกิดฝนตกจะเกิดการพังทลายชะล้างหน้าดิน ทำให้ตะกอนถูกพัดพาไปสู่กว้านพะเยา ส่งผลให้กว้านพะเยาตื้นเขินจากการทับถมของดินตะกอน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กว้านพะเยากักเก็บน้ำได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานกรมชลประทานจังหวัดพะเยาได้ดำเนินการขุดลอกตะกอนภายใต้ท้องกว้านเพื่อเพิ่มปริมาณกักเก็บน้ำ ซึ่งตะกอนที่ถูกขุดลอกกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งอยู่รอบๆ บริเวณกว้านพะเยาเป็นจำนวนมาก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นว่า ดินตะกอนที่ถูกกองทิ้งไว้มาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมการทาง อย่างไรก็ตามถ้าจะนำดินตะกอนกว้านพะเยามาใช้ในงานวิศวกรรมการทาง จำเป็นจะต้องปรับปรุงคุณภาพดินก่อน เพราะว่าดินตะกอนกว้านพะเยาประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ และมีความชื้นตามธรรมชาติสูงทำให้ดินมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคนิคปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติในทางวิศวกรรม โดยการปรับปรุงดินตะกอนด้วยการผสมปูนซีเมนต์ แต่ในการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน มีการปล่อยก๊าซ CO₂ สูงขึ้นบรรยากาศผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะหาวัสดุเพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าปาล์มและเถ้าไม้ยางพาราที่ได้มาจากการเผาของผลปาล์ม ในภาคใต้ ปาล์มและยางพาราก็เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญเป็นอย่างมาก หลังจากผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้น จะเหลือกากผลปาล์ม เช่น



กากใย กะลา และทะเลสาบปาล์ม และไม้ยางพารา มีอายุยาวสามารถรีดน้ำ ยางได้นานถึง 30-40 ปีหลังจากหมดอายุจึงนิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีว มวล ให้กับโรงงานอุตสาหกรรม และหม้อกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้าชีวมวลใน อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียสแทนที่เชื้อเพลิงถ่านหินที่ส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และการกำจัดเชื้อชีวมวลที่เกิดจากการเผาไหม้ นั้นจะต้องนำไปฝังกลบ เนื่องจากเชื้อชีวมวลมีขนาดเล็ก และฟุ้งกระจาย ได้ง่าย อาจจะทำให้เกิดปัญหาต่อทางเดินหายใจได้ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ เพื่อเป็นส่วนประกอบในการพัฒนาคุณสมบัติวิศวกรรมการทาง และเพื่อใช้ ประโยชน์จากเปลือกปาล์มและเถาวัลให้คุ้มค่าที่สุด

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถาวัล และเถาวัล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนกัวน พะเยาร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อนำมาใช้ในการทางวิศวกรรมผิวทางให้ได้ตาม มาตรฐานกรมทางหลวงดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (ทล-ม. 204/2556) และรอง พื้นทาง (ทล-ม. 206/2564)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนกัวนพะเยา มาใช้ให้เกิด ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมผิวทาง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของดินตะกอนกัวนที่ถูก ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถาวัลและเถาวัลไม้พารา
3. เพื่อสนับสนุนให้เกิดการนำวัสดุภายในประเทศมาใช้ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้ง ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาคูสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกัวน พะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถาวัลและเถาวัลไม้พารา มีขอบเขตการวิจัยของ โครงการ ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมงานวิจัยและศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุง คุณภาพดินด้วย ปูนซีเมนต์ผสมเถาวัล,เถาวัลไม้พารา

2. ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกัวนพะเยาผสม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ผสมเถาวัลและเถาวัลไม้พาราที่ได้ จากโรงไฟฟ้าชีวมวล

3. ศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมทางเคมีของดินผสมปูนซีเมนต์,เถา วัลและเถาวัลไม้พารา

4. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่ระยะเวลาใน การบ่ม 7, 28, 60, และ 90 วัน และการทดสอบ ความคงทน ด้วยวิธีเปียก สลับแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. การใช้ดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถาวัลสามารถลด ต้นทุนในการจัดหาระบบก่อสร้าง
2. นำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

3. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบทางวิศวกรรมผิวทาง หรือ งานวิจัยอื่นๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกัวนพะเยา

กรมชลประทานจังหวัดพะเยา (2563) กล่าวว่าดินตะกอนที่พบในพื้นที่ซึ่ง มีความสำคัญต่อระบบนิเวศและการจัดการทรัพยากรในทะเลสาบ

- ลักษณะทั่วไปของดินตะกอนในกัวนพะเยา

ดินตะกอนในกัวนพะเยาซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของดินทราย อินทรีย์วัตถุ และแร่ธาตุที่ถูกพัดพาจากกลุ่มน้ำและพื้นที่รอบกัวนผ่าน กระแสน้ำตามฤดูกาล ดินตะกอนชนิดนี้มักมีเนื้อละเอียด สีออกเทาหรือดำ เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง ที่มาจากพืชและสัตว์ในทะเลสาบและมี ปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นต่อพืช ซึ่งสามารถสนับสนุนการเจริญเติบโตของพืช น้ำและพืชบก การสะสมของดินตะกอนอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของ ทะเลสาบ เช่น การลดความลึกของน้ำ, การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ ทางเคมีและชีวภาพในน้ำ, และการเปลี่ยนแปลงของแหล่งที่อยู่อาศัยของ สัตว์น้ำ

ดินตะกอนกัวนพะเยามีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแร่อินทรีย์ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปูนซีเมนต์เพื่อสร้างสาร C-S-H ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต การใช้ดินตะกอนนี้เป็นวัสดุผสมจึงช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ใช้ประโยชน์ จากวัสดุท้องถิ่น ลดปัญหาตะกอนสะสมในกัวนพะเยา และสนับสนุนการ พัฒนาอย่างยั่งยืนในพื้นที่

2.2 เถาวัลน้ำมัน

เถาวัลน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการเผาเถาวัล เช่น เส้นใย กะลา และทะเลสาบปาล์ม มีลักษณะเป็นผงละเอียด อุดมด้วยแร่ธาตุอย่าง แคลเซียม โพแทสเซียม และฟอสฟอรัส สามารถใช้ปรับปรุงดิน ผสมใน คอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และใช้กรองน้ำได้ แต่หากจัดการไม่ถูกวิธี อาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม.

Hussin et al. (1996) ได้ศึกษาถ้าทำการบดเถาวัลน้ำมันให้ละเอียด มากกว่าปูนซีเมนต์ เพื่อทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ใน คอนกรีต นอกจากนี้ ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาวัลในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถา วัลสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตได้ นอกจากนี้ เถาวัลยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายกรด ซึ่งเป็น ประโยชน์ต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

2.3 เถาวัลพารา

เถาวัลพารา คือวัสดุพืชไร่ที่ได้จากการเผาเศษวัสดุจากต้น ยางพารา เช่น กิ่งไม้ เปลือก และเศษราก โดยผ่านกระบวนการเผาที่ ควบคุมอุณหภูมิและสภาพการเผาให้เหมาะสม เพื่อให้ได้เถาวัลที่มีปริมาณซิลิกา (SiO_2) สูง ลักษณะของเถาวัลพาราจะเป็นผงละเอียดสีเทาอ่อนถึงเทา เข้ม ขึ้นอยู่กับสภาพการเผา



ถ้าไม่ย่างพารามีซิลิกาและอะลูมินาที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดสาร C-S-H ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง ลดช่องว่าง และเพิ่มความหนาแน่นของคอนกรีต โดยมักใช้แทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ราว 10–30% ทำให้คอนกรีตต้านทานซัลเฟต ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ ควบคุมความร้อนขณะก่อตัว และช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ จึงเป็นวัสดุที่คุ้มค่า เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะกับงานก่อสร้างที่เน้นความยั่งยืน ดนุพลและจริชาติ (2543) ได้ศึกษามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าย่างพาราพบว่าเถ้าไม่ย่างพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปริมาณมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้องผสมปูนขาว

2.4 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

Highway Research Board (1959) ให้คำจำกัดความของดินผสมปูนซีเมนต์ว่าเป็นการนำดินและปูนซีเมนต์มาผสม บดอัดจนได้ความหนาแน่นสูงสุด และบ่มเพื่อรักษาความชื้น ส่วน Lambe, Mitcheals และ Moh (1959); Moh (1962) อธิบายว่าปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดสาร ไตรแคลเซียมซิลิเกต(C₃S), ไดแคลเซียมซิลิเกต(C₂S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต(C₃A) และ แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์(C₄AF) ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยา C-S-H และ C-A-H ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้ดินแข็งแรงขึ้น ขณะเดียวกัน Hydrated lime ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในดิน ก่อให้เกิด C-S-H และ C-A-H เพิ่มเติม ส่งผลให้โครงสร้างดินถูกยึดประสานแน่นขึ้น

2.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรง แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความหนาแน่นของคอนกรีต แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ ดินขาวเผา และดินตื้อะโทไมต์ และ วัสดุจากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟุ้ง

การใช้วัสดุปอซโซลานช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพิ่มความหนาแน่นต่อสารเคมีและซัลเฟต ลดการซึมผ่านของน้ำและสารกัดกร่อน ลดความร้อนระหว่างการแข็งตัว และยืดอายุการใช้งานโครงสร้าง จึงเป็นทางเลือกสำคัญในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน

ทงศักดิ์ โนโซยา (2557) ศึกษาการใช้วัสดุปอซโซลานแทนปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ โดยวัสดุที่ใช้ต้องผ่านการเผาและบดเพื่อปรับคุณภาพ ผลการทดลองพบว่ามีการลดอุณหภูมิและความหนาแน่นใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานในงานวิศวกรรมก่อสร้าง

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ดินตะกอนกว้างพะเยาที่เก็บได้จากการขุดทะเลสาบบริเวณรอบกว้างพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าย่างพาราที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 โดยมีโปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม่ย่างพารา



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) เถ้าปาล์มน้ำมัน (b) เถ้าไม่ย่างพาราที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (c) ดินตะกอนกว้างพะเยา (d) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว้างพะเยา

คุณสมบัติของดิน	ผลการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.71
ขีดจำกัดเหลว (LL)	42.60 %
ขีดจำกัดพลาสติก (PL)	23.46 %
ขีดจำกัดการหดตัว (SL)	19.52 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4	99.93 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200	92.00 %
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	17.03 kN/m ³
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม	14.50 %
การจำแนกตามเกณฑ์ ASSHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ USCS	CL



3.2 การทดสอบกำลังอัดรับแรงแกนเดียว

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) ดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เถ้าปาล์ม น้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา จากตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.35 ลูกบาศก์เซนติเมตรและความสูงเท่ากับ 10.71 ลูกบาศก์เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างโดยนำดินตะกอน มาบดให้แห้งแล้วหุบเป็นผงนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามด้วยเถ้าผสมให้เข้ากันและเติมน้ำแล้วทำการนำตัวอย่างใส่ในตัวอย่างทรงกระบอกในท่อ PVC และดัดทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติก แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในกล่องพลาสติกเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเมื่อครบอายุการบ่มนำไปตรวจขนาดของตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบในเครื่องกดสำหรับอัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกัวนพะเยาผสมปูนซีเมนต์เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 3 ตารางออกแบบส่วนผสมในงานวิจัย

ส่วนผสม	ดินตะกอน (%)โดยน้ำหนัก ดิน	ซีเมนต์ (%) โดยน้ำหนักดิน	เถ้าชีวมวล(P,R) %
C0F0	100	0	0
C0F5	95	0	5
C0F10	90	0	10
C0F15	85	0	15
C0F20	80	0	20
C3F0	97	3	0
C3F5	92	3	5

C3F10	87	3	10
C3F15	82	3	15
C3F20	77	3	20
C5F0	95	5	0
C5F5	90	5	5
C5F10	85	5	10
C5F15	80	5	15
C5F20	75	5	20
C7F0	93	7	0
C7F5	88	7	5
C7F10	83	7	10
C7F15	78	7	15
C7F20	73	7	20
C10F0	90	10	0
C10F5	85	10	5
C10F10	80	10	10
C10F15	75	10	15
C10F20	70	10	20

3.3 การประดิษฐ์โมเดล PVC เป็นการปรับปรุงวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การพัฒนาโมเดลทดสอบจากท่อ PVC เป็นการปรับปรุงวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ช่วยลดข้อจำกัดด้านทรัพยากรและความซับซ้อนของการทดสอบการใช้โมเดลทดสอบนี้ยังช่วยให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องและสม่าเสมอมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยและการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โมเดลทดสอบจากท่อ PVC กำหนดความสูงให้มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเทียบกับความสูงเป็น 1 ต่อ 2 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของรัชชัย ใหม่พันธ์ (2560)



(a)



(b)

รูปที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) โมเดล PVC (b) ค้อนบดอัดที่ประดิษฐ์

การคำนวณเปรียบเทียบพลังงานบดอัดด้วยสมการ 3.1 เพื่อให้ตัวอย่างดินมีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกับการบดอัดแบบมาตรฐานสูงกว่า วิธีนี้ทำให้ได้ดินที่



มีคุณสมบัติทางกายภาพสม่ำเสมอ เหมาะสมต่อการทดสอบความแข็งแรงและความคงทนของดิน

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยก)

H คือ คีอความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ 23 ครั้ง

3.4 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

- 1.คำนวณอัตราส่วนของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์เถ้าปาล์มและเถ้ายางตามสัดส่วน
- 2.การผสมวัสดุแห้ง: ผสมดิน ปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มและเถ้ายางในสภาพแห้งให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสมหรือมือ
- 3.การปรับความชื้นเติมน้ำลงในส่วนผสมที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เติมและคลุกเคล้าจนได้ความชื้นที่เหมาะสมกับการทำงาน
- 4.นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ในแม่พิมพ์และทำการบดอัด โดยใช้เครื่องมือบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นและ แข็งแรง
- 5.นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วไปบ่มในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเต็มที่โดยปกติจะบ่มเป็นเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน

4. ผลการศึกษา

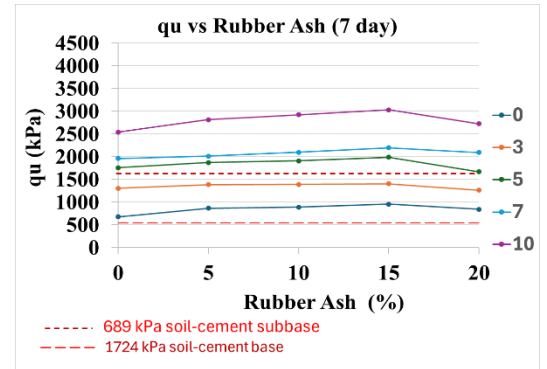
4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดรับแกนเดียวของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว(Unconfined compressive strength, USC) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป แต่การใส่เถ้าลอยผสมเข้าไปพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณเถ้าลอยเข้าไปก็จะส่งผลให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับปูนซีเมนต์ แต่ว่าการใส่เถ้าลอยเข้าไปผสมในปริมาณที่มากเกินไปก็จะส่งผลเชิงลบทำให้ค่า UCS มีค่าลดลงได้เช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมนั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง

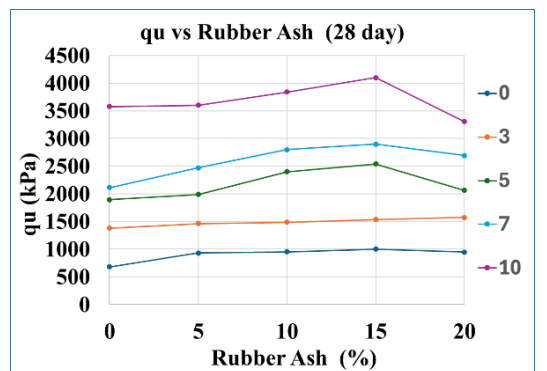
10-15% เนื่องจากในปริมาณของเถ้าลอยที่ 10% จะให้ค่า UCS ที่อายุก่อน 28 วัน จะมีค่าที่สูงที่สุด และปริมาณเถ้าลอยที่ 15% ก็จะให้ค่า UCS ที่สูงที่สุดหลังจากอายุการบ่ม 28 วันขึ้นไป

การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ช่วยให้เกิดการพัฒนากำลังในระยะยาวอย่างต่อเนื่องภายหลัง 28 วันผ่านกลไกของปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นในระยะยาวเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

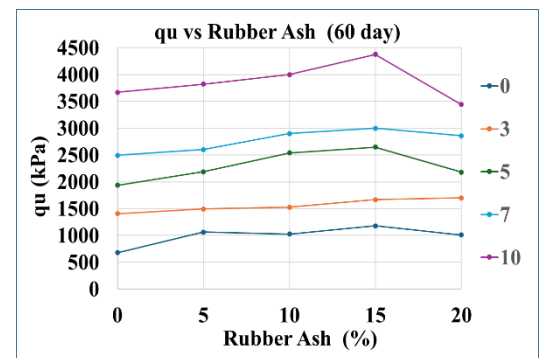
(a)



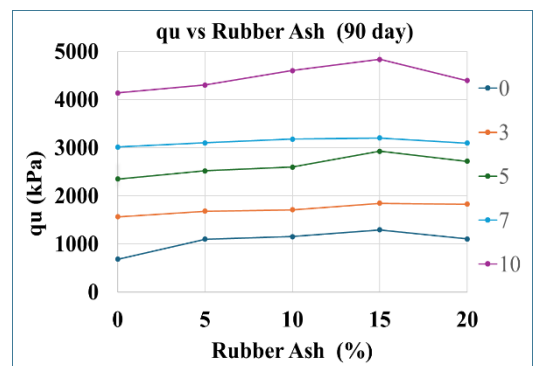
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 4 กราฟ UCS ดินตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางพารา (a) ระยะเวลาในการบ่มเวลา 7 วัน (b) ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน (c) ระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน (d) ระยะเวลาในการบ่ม 90 วัน

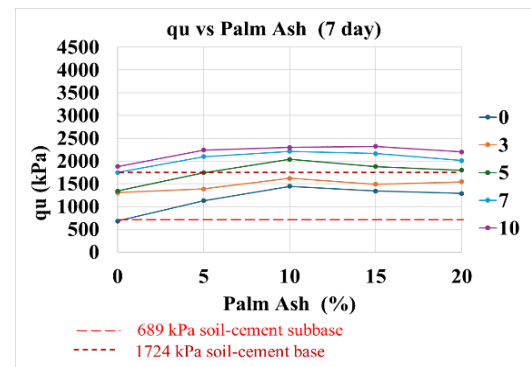


จากภาพ 4(a) ผลการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าไม้ยางพาราทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0%, 3%, 5%, 7% และ 10% ร่วมกับการแทนที่ดินด้วยวัสดุเถ้าไม้ยางพารา (rubber ash) ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่า ค่ากำลังอัด UCS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางพาราเมื่อมีการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 10% และเถ้าไม้ยางพารา 15% จะให้ค่า UCS สูงสุดที่ 3034 KPa สำหรับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0%, 3%, 5%, 7% พบว่าการเติมเถ้าไม้ยางพาราจะช่วยเพิ่มค่า UCS ให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงการแทนที่ปริมาณเถ้าไม้ยางพารา 15% ก่อนจะเริ่มลดลงเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าไม้ยางพาราในตัวอย่างมากเกินไป ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินลดลง และทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย [9]

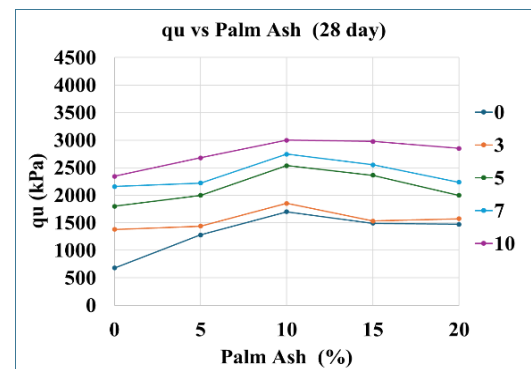
จากภาพ 4(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้าไม้ยางพารา กับ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างดินตะกอนกว้างพะเยาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่างกัน (0, 3, 5, 7, 10%) หลังบ่ม 28 วัน ตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 10% และเถ้าไม้ยางพารา 15% จะมีค่า UCS สูงสุดที่ 4100 KPa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณอื่นๆเช่นกัน สาเหตุของการเพิ่มของค่า UCS เนื่องจากการผสมปูนซีเมนต์เข้าไปนั้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เป็นตัวทำให้ดินตะกอนกว้างพะเยามีค่า UCS ที่สูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นได้ผลทำให้ได้สารประกอบตัวใหม่เกิดขึ้นมาเช่น CSH และ CAH ซึ่งจะอยู่ในรูปของผลึกและคุณสมบัติหลักคือให้ความแข็งแรง จึงทำให้ตัวอย่างดินตะกอนกว้างพะเยามีค่า UCS สูงขึ้นตามไปด้วยและแนวโน้มของกำลังจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม [9],[10]

จากภาพ 4(c-d) ผลการทดสอบที่อายุการบ่ม 60 กับ 90 วัน พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 10% ร่วมกับเถ้าไม้ยางพารา 15% จะมีค่า UCS สูงสุดที่ 4380, 4835 KPa ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม เนื่องจาก ปฏิกิริยาปอซโซลานมีบทบาทสำคัญมากขึ้น เนื่องจากการไฮเดรชันยังคงมีอยู่และถูกใช้อย่างต่อเนื่องเถ้าไม้ยางพาราจึงสร้างสาร CSH และ CAH เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อดินและสร้างโครงสร้างที่แน่นหนามากขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและสังเกตได้ว่าในตัวอย่างที่ใช้เถ้าไม้ยางพารา 20% และปูนซีเมนต์ 10% ค่า UCS มีแนวโน้มลดลง เกิดจากการเพิ่มเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเถ้าไม้ยางพาราที่มากเกินไปจะไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำส่งผลให้เกิดการสร้างสาร CSH น้อยลงซึ่งเป็นสารที่เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต [11]

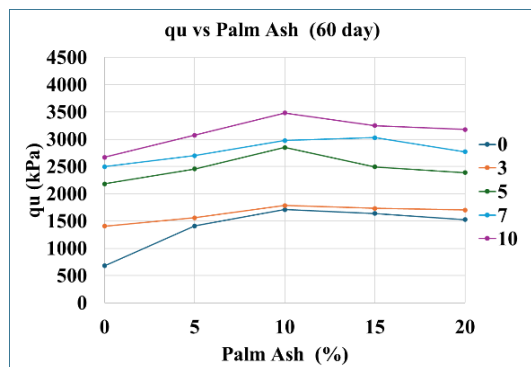
(a)



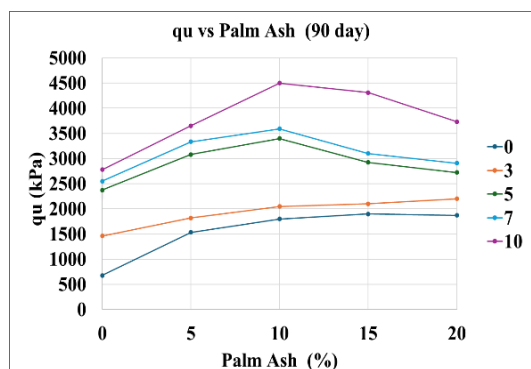
(b)



(c)



(d)



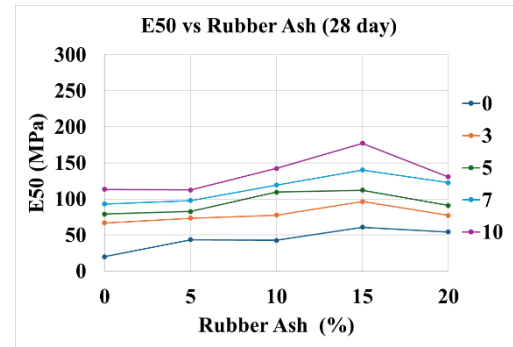
รูปที่ 5 กราฟ UCS ดินตะกอนกว้างพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน (a) ระยะในการบ่มเวลา 7 วัน (b) ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน (c) ระยะเวลาในการบ่ม 60 วัน (d) ระยะเวลาในการบ่ม 90 วัน



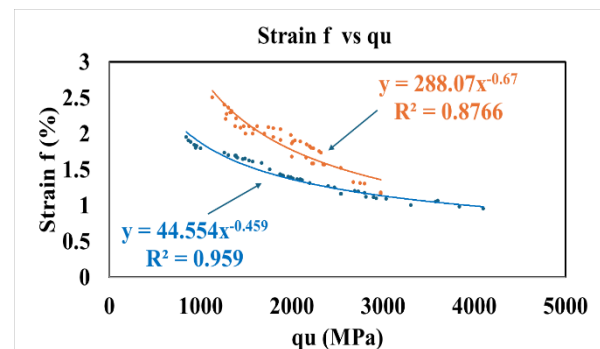
จากภาพ 5(a) การทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าปาล์ม ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกรวดปนทรายที่ผสมปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0%, 3%, 5%, 7% และ 10% ร่วมกับการแทนที่ดินด้วยเถ้าปาล์ม (palm ash) ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่า ค่ากำลังอัด UCS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ส่วนผสมในปริมาณที่เหมาะสมพบว่า ค่ากำลังอัด UCS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% และเถ้าปาล์ม 15% จะให้ค่า UCS สูงสุดที่ 2322 KPa สำหรับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0%, 3%, 5%, 7% พบว่าการเติมเถ้าปาล์มจะช่วยเพิ่มค่า UCS ให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงการแทนที่ปริมาณเถ้าปาล์ม 15% ก่อนจะเริ่มลดลงเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าปาล์มในตัวอย่างมากเกินไป ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินลดลงและทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย [9]

จากภาพ 5(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เถ้าปาล์ม กับ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของตัวอย่างดินตะกอนกรวดปนทรายที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่างกัน หลังบ่ม 28 วัน ตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 10% และเถ้าปาล์ม 10% จะมีค่า UCS สูงสุดที่ 3000 Kpa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างดินตะกอนกรวดปนทรายที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณอื่นๆ เช่นกัน สาเหตุของการเพิ่มของค่า UCS จะพบว่าในส่วนของการผสมปูนซีเมนต์เข้าไปนั้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นได้ผลทำให้ได้สารประกอบตัวใหม่เกิดขึ้นมาเช่น CSH และ CAH ซึ่งจะอยู่ในรูปของผลึกและคุณสมบัติหลักคือให้ความแข็งแรง จึงทำให้ตัวอย่างดินตะกอนกรวดปนทรายมีค่า UCS สูงขึ้นตามไปด้วยและแนวโน้มของกำลังจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม [9],[10]

จากภาพ 5(c-d) ผลการทดสอบที่อายุการบ่ม 60 กับ 90 วัน พบว่า การพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 10% ร่วมกับเถ้าปาล์ม 10% จะมีค่า UCS สูงสุดที่ 3485, 4500 KPa ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มกำลังคล้ายกับที่ 28 วัน และในช่วงเวลาการบ่ม 60, 90 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานมีบทบาทสำคัญมากขึ้น เนื่องจาก Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงมีอยู่และถูกใช้ไปอย่างต่อเนื่อง เถ้าปาล์มจึงสร้างสาร CSH และ CAH เพิ่มเติม ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อดินและสร้างโครงสร้างที่แน่นหนามากขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [12]

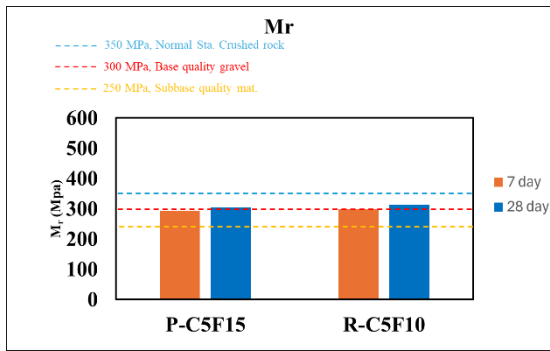


รูปที่ 6 ค่าซีเมนต์โมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเฉพาะดินตะกอนกรวดปนทรายที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มอย่างพารา ที่ 28 วัน จากภาพ 6 แสดงค่าซีเมนต์โมดูลัสที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินตะกอนกรวดปนทรายที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มอย่างพารา ผลการศึกษาพบว่า ค่าความยืดหยุ่น (E50) และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มอย่างพาราที่ใช้ รวมถึงระยะเวลาการบ่ม โดยพบว่าปริมาณเถ้าปาล์มอย่างพาราที่เหมาะสมคือที่ 15% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งเมื่อผสมเถ้าปาล์มอย่างพาราที่ 15% ร่วมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จะให้ค่า E50 สูงสุด



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง strain f กับ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกรวดปนทราย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง strain (f) และ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยวัสดุปอซโซลาน พบว่า เส้นสีน้ำเงิน (ดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มและปูนซีเมนต์) และ เส้นสีส้ม (ดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มและปูนซีเมนต์) ต่างมีแนวโน้มคล้ายกัน คือค่า strain f ลดลงเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น แสดงว่าวัสดุที่มีกำลังอัดสูงจะเสียรูปน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าเส้นสีน้ำเงินมีค่า strain f ต่ำกว่าในช่วงกำลังอัดสูง หมายความว่าดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มและปูนซีเมนต์มีพฤติกรรมที่ แข็งกว่า หรือทนต่อการเสียรูปได้ดีกว่า ขณะที่เส้นสีส้มซึ่งมีค่า strain f สูงกว่า แสดงว่าดินตะกอนผสมเถ้าปาล์มและปูนซีเมนต์มีความเหนียว (ductility) มากกว่า แต่ทนแรงอัดสูงสุดได้น้อยกว่า



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่า Modulus of Resilience (Mr) ของดินตะกอนที่ผสมเถ้าปาล์ม (P-C5F15) และเถ้ายาง (R-C5F10) โดยทดสอบที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

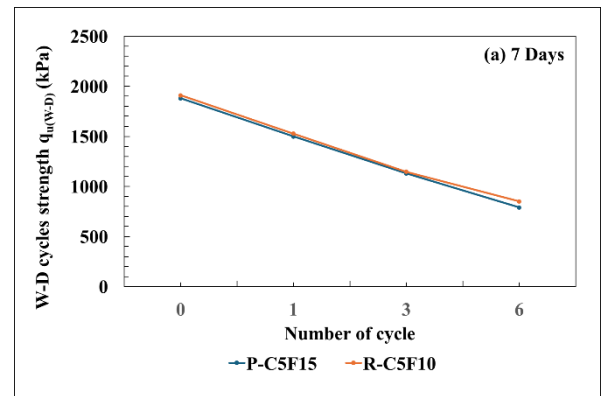
กราฟนี้เปรียบเทียบค่า Modulus of Resilience (Mr) ของดินตะกอนที่ผสมเถ้าปาล์ม (P-C5F15) และเถ้ายาง (R-C5F10) โดยทดสอบที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน จะเห็นได้ว่าค่า Mr ของทั้งสองวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น แสดงถึงการพัฒนาความแข็งแรงตามเวลา ผลการทดสอบยังบ่งชี้ให้เห็นว่า ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 250–350 MPa ซึ่งถือว่าเพียงพอสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ทั้งในระดับชั้นรองพื้นทาง และใกล้เคียงกับวัสดุคุณภาพเบส หมายความว่า การนำเถ้าปาล์มและเถ้ายางมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนให้เหมาะสมต่อการก่อสร้างทางได้จริง

Mix	FFR [m/s]			
	7 day		28 day	
	S-WAVE	P-WAVE	S-WAVE	P-WAVE
P-C5F15	221.85	246.20	312.74	345.50
R-C5F10	228.60	252.20	315.20	350.50

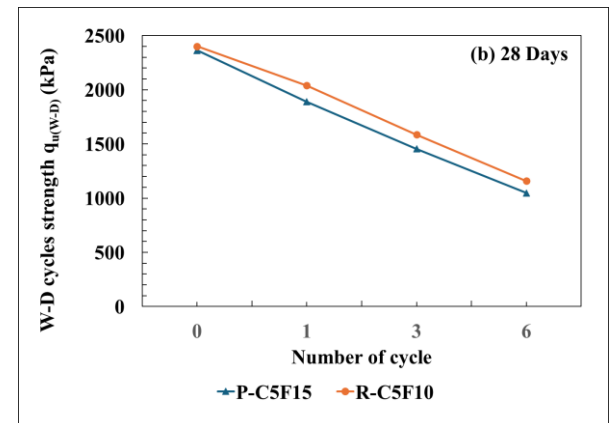
รูปที่ 9 ตารางแสดงค่า First Fundamental Resonance (FFR) ของคลื่นเฉือน (S-wave) และคลื่นอัด (P-wave) ของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์ม (P-C5F15) และเถ้ายาง (R-C5F10) ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความเร็วของทั้ง S-wave และ P-wave มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาความหนาและความแข็งแรงของโครงสร้างดินที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ พบว่า R-C5F10 มีค่าความเร็วของคลื่นทั้ง S-wave และ P-wave สูงกว่า P-C5F15 เล็กน้อยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน แสดงถึงความสามารถในการเสริมสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทานต่อการเสียรูปได้ดีกว่า สอดคล้องกับแนวโน้มกำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

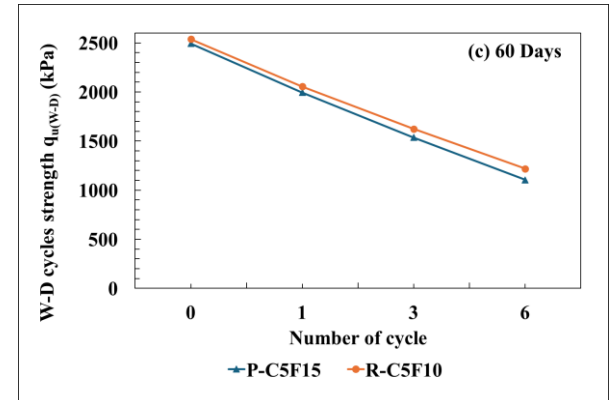
(a)



(b)



(c)



รูปที่ 10 ผลกระทบของวัฏจักรเปียก-แห้งต่อกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มและเถ้ายางที่การบ่ม (a)7 วัน, (b)28 วัน, (c)60 วัน

การศึกษาผลของการเปียกสลับแห้งซ้ำต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปรับปรุงด้วยวัสดุเถ้าปาล์ม 15% ปูนซีเมนต์ 5% และเถ้ายาง 10% ปูนซีเมนต์ 5% (P-C5F15 และ R-C5F10) เหตุผลที่เลือกสองส่วนผสมนี้ เพราะเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมและมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้สูงสุด พบว่า จำนวนรอบการเปียกสลับแห้งมีผลทำให้ค่ากำลังลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการทำให้ตัวอย่างเกิด การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (บวม-หดตัว) ซึ่งสร้าง ความเครียดภายในจนนำไปสู่ การแตกร้าวและการสูญเสียเนื้อวัสดุ/น้ำหนัก (mass loss) หรือ การลดลงของความแข็งแรง โดยแนวโน้มการลดลงเป็นเชิงเส้นชัดเจน ทั้งนี้อายุการบ่มมีบทบาทสำคัญต่อค่ากำลัง



เริ่มต้นและความทนทานของดินที่ปรับปรุงแล้ว ที่อายุการบ่ม 7 วัน ค่ากำลังของทั้งสองสูตรใกล้เคียงกัน แต่เมื่อบ่มครบ 28 และ 60 วัน ซึ่ง R-C5F10 แสดงค่ากำลังสูงกว่าอย่างต่อเนื่อง ทั้งก่อนและหลังผ่านรอบการเปียกสลับแห้ง โดยเฉพาะเมื่อครบ 6 รอบ R-C5F10 ยังคงรักษาค่ากำลังได้มากกว่า P-C5F15 อย่างชัดเจน ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า แม้การเปียกสลับแห้งซ้ำจะทำให้ดินปรับปรุงการสูญเสียกำลัง แต่สูตรวัสดุประสานและอายุการบ่มเป็นปัจจัยที่ช่วยชะลอการเสื่อมสภาพ โดยสูตร R-C5F10 มีความต้านทานต่อการเปียกสลับแห้งที่ดีกว่า และมีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมเปียกสลับแห้งซ้ำในระยะยาว เช่น งานฐานรากหรือโครงสร้างดินภายนอก

5. สรุปผล

ในบทสรุปผลการศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลเพื่อความยั่งยืน การทดสอบมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ตลอดจนสมบัติด้านกำลังและความทนทานของดินตะกอนกวีนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

1.ผลการทดสอบกำลังอัดรับแกนเดียว (UCS)

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 10% และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือ 15% ซึ่งช่วยเสริมประสิทธิภาพในการพัฒนาความแข็งแรงของดินผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การทดสอบยังให้ข้อมูลค่า *Secant Modulus* 50% ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับค่า UCS โดยค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามสัดส่วนของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้เช่นเดียวกัน

2.การเปรียบเทียบค่า Modulus of Resilience (Mr) ของดินตะกอนกวีนพะเยา

การวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่นกลับคืน (*Modulus of Resilience, Mr*) ของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลที่ผสมเถ้าปาล์ม (P-C5F15) และเถ้ายาง (R-C5F10) ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าค่า Mr เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สะท้อนถึงการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 250–350 MPa ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานเป็นวัสดุชั้นทางระดับรองพื้นทาง

3.การทดสอบ First Fundamental Resonance (FFR)

จากการทดสอบ *First Fundamental Resonance (FFR)* ของคลื่นเฉือน (*S-wave*) และคลื่นอัด (*P-wave*) สรุปได้ว่าค่าความเร็วของคลื่นทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สะท้อนถึงการพัฒนาความหนาแน่นและความแข็งแรงของโครงสร้างดินที่ปรับปรุงแล้ว โดยเฉพาะตัวอย่าง R-C5F10 ที่ให้ค่าความเร็วสูงกว่า P-C5F15 เล็กน้อยทั้งที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน แสดงถึงความสามารถในการเสริมสร้างโครงสร้างดินที่แข็งแรงและทนทานต่อการเสียรูปได้ดีกว่า ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า UCS และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ทั้งนี้ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราร่วมกับปูนซีเมนต์ไม่เพียงแต่จะช่วยเพิ่มสมบัติทางวิศวกรรมของดินเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน สามารถนำไปใช้งานในภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

4.การทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wet-Dry Cycles Test)

จากการศึกษาผลของการเปียกสลับแห้งซ้ำต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปรับปรุงด้วยวัสดุประสาน พบว่า จำนวนรอบการเปียกสลับแห้งมีผลให้ค่ากำลังลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกสูตรที่ทดสอบ โดยแนวโน้มการลดลงเป็นเชิงเส้นชัดเจน อย่างไรก็ตาม อายุการบ่มมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่ากำลังเริ่มต้นและความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 และ 60 วัน ค่ากำลังสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและสูญเสียกำลังช้าลงเมื่อเผชิญกับการเปียกสลับแห้งซ้ำ

ในการเปรียบเทียบสูตรวัสดุประสาน พบว่าสูตร R-C5F10 ให้ค่ากำลังสูงกว่าสูตร P-C5F15 อย่างต่อเนื่องทั้งก่อนและหลังการเปียกสลับแห้ง โดยเฉพาะเมื่อครบ 6 รอบ R-C5F10 ยังคงรักษาค่ากำลังได้สูงกว่า แสดงถึงความทนทานที่เหนือกว่า ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าสูตรวัสดุประสานและอายุการบ่มมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมเชิงกลของดินปรับปรุง และสูตร R-C5F10 มีศักยภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในงานวิศวกรรมที่ต้องเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งมากกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ธนกร ขมภูรัตน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายวรากร สุธะดีะ รุ่นพี่นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ และการสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสเรียนรู้และทำงานวิจัยภายใต้การดูแลของรุ่นพี่ นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้สนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ วัสดุ และทรัพยากรต่าง ๆ

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัว และเพื่อน ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดระยะเวลาการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lateritic Soil Quality Improvement Using Palm Oil Fuel Ash and Cement for Road Construction 2023,pp.558-560.
- [2] The soil improvement with Parawood Sawdust Ash.Vol.33 No.1 2014
- [3] Bowles, J.E. (1996). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.123-132. (In case of Book)



- [4] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Thumrongvut, J., Suebsuk, S. and Sookasem, S. (2016). Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali-activated binders under different types of alkali solutions. *Construction and Building Materials*, 127, pp. 673-678. (In case of Journal)
- [5] Patel, V.I. (2013). *Nonlinear Inelastic Analysis of Concrete-Filled Steel Tubular Slender Beam-Columns*. Ph. D. Dissertation, Victoria University, Australia. (In case of Dissertation and Thesis)
- [6] จักขดา อารังวุฒิ, สิทธิศักดิ์ หวังรักกลาง, ธนากร ภูเงินคำ และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ (2559). พฤติกรรมและกำลังของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็ก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*, สงขลา, 28-30 มิถุนายน 2559, หน้า 410-417. (กรณีบทความในเอกสารประกอบการประชุม)
- [7] จักขดา อารังวุฒิ, จิระยุทธ สืบสุข, ชยกฤต เพชรช่วย และ วีรพันธุ์ เจริญมีปรีชา (2560). *วิศวกรรมโยธากับเทคโนโลยีเขียวเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน*. สำนักพิมพ์, หน้า 88-100. (กรณีหนังสือ)
- [8] จักขดา อารังวุฒิ, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ กรรณ คำลือ (2557). ผลของการเสริมกำลังดัดด้วยลวดแบบไม่อัดแรงที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูป. *วารสารวิชาการ มทร.อีสาน*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 16-33. (กรณีบทความในวารสาร)
- [9] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Addison Wesley Longman Ltd.
- [10] N. A. Wahab, M. J. Roshan, A. S. A. Rashid, M. A. Hezmi, S. N. Jusoh, N. D. N. Norsyahariati, and S. Tamassoki, "Strength and durability of cement-treated lateritic soil," *Sustainability*, vol. 13, no.
- [11] Chindaprasirt, P., & Rukzon, S. (2008). Strength, porosity, and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash, and fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1601-1606.
- [12] Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B. K., & Fasihnikoutalab, M. H. (2015). Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. *Transportation Geotechnics*, 4, 132-141.



คุณลักษณะการหดตัวและกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วย เกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย

Shrinkage and compressive strength characteristics of soft Bangkok clay stabilized with cement incorporating graphene nanosheets and fly ash

ปลายฟ้า สุนทรวิภาต^{1*} อรรถพรณ สระทองแก้ว² อุษณา ก้อนแก้ว³ เอื้ออังกร ปันทา⁴ และ ธนกร ชมภูรัตน์⁵

^{1,2,3,4} นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁵รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65103870@up.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอยเพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรมโยธา ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ดัชนีความเหลว(LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม (B/wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 เกล็ดนาโนกราฟีน(GO) โดยใช้วิธีการทดสอบการหดตัวด้วยภาพถ่าย(sk) และการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UC) ที่อายุการบ่มตัว 7 14 และ 28 วัน ผลการวิจัยพบว่า การเสริมเกล็ดนาโนกราฟีนในปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.025% ร่วมกับการใช้เถ้าลอยช่วยลดการหดตัวและเพิ่มกำลังอัดของดินได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะส่วนผสม LI 1.3 B/wc 0.3 GO 0.025 การบ่มตัว 28 วัน มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2426.563 kPa และ LI 1.3 B/wc 0.4 GO 0.025 การบ่มตัว 28 วัน มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 3784.196 kPa

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, ปูนซีเมนต์, เกล็ดนาโนกราฟีน, เถ้าลอย, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, การหดตัว

Abstract

This research investigates the shrinkage response and unconfined compressive strength (UCS) of Bangkok soft clay stabilized with Portland cement incorporating graphene nanosheets (GO) and fly ash (FA), with the objective of determining optimum mixture proportions for civil engineering applications. The experimental variables include a liquidity index (LI = 1.3 and 1.6), binder-to-water content ratio (B/wc = 0.3 and 0.4), and GO dosage as primary variables. Shrinkage was quantified via an image-based technique and reported as percent shrinkage (%CDF), while UCS was determined by unconfined compression testing (ASTM D2166) at curing ages of 7, 14, and 28 days. The results indicate that incorporating a trace amount of GNP, on the order of 0.025% by weight of binder, in conjunction with FA, substantially mitigates shrinkage and enhances UCS. At 28 days, mixes with LI = 1.3, B/Wc = 0.3, GNP = 0.025% and LI = 1.3, B/Wc = 0.4, GNP = 0.025% achieved peak UCS values of 2426.563 and 3784.196 kPa

Keywords: soft Bangkok clay, cemen, graphene nanosheets, fly ash, unconfined compressive strenght, Shrinkage

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันกรุงเทพ และ ปริมณฑลเป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจ วัฒนธรรม สังคม ซึ่งส่งผลให้ความต้องการด้านโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นที่พักอาศัย อาคารพาณิชย์ หรือ ขนส่งมวลชน [17] แต่เนื่องจากลักษณะทางธรณีวิทยาและผลการเจาะสำรวจของพื้นที่พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวอ่อน [18] มีค่าดินประกอบด้วยทราย 3% ตะกอน 27% และดินเหนียว 70% ความถ่วงจำเพาะ 2.63 Liquid Limit (LL) Plastic Limit (PL) 89% 30% ตามลำดับ [5] ทำให้ในการก่อสร้างโครงสร้างต่างๆมีปัญหา เช่นด้านการรับกำลังของดิน การทรุดตัว จึงทำให้ต้องมีการปรับปรุงพัฒนาดินเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้กับงานทางวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสม

การปรับปรุงพัฒนาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพในปัจจุบันมีวิธีและเทคนิคหลากหลาย โดยพบว่าวิธีผสมลึก (Deep mixing method) เป็นวิธีที่ช่วยเสริมกำลังดินโดยเจาะลงไปยังความลึกที่กำหนดแล้วป้อนสารบ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และวัสดุอื่นๆ จากนั้นใช้เครื่องผสมลึกกวนให้ดินและสารบ่มเข้ากันจนทั่ว กระบวนการนี้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างดินเหนียวอ่อนกับสารบ่ม ช่วยลดปัญหาการทรุดตัว กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงแบกทานของดิน ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการผสมลึกในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยของ Suksiripattanapong และคณะ (2022) [14], Phetchuay, C และคณะ (2016) [12] และ Phanikumar, B. R. (2004). [13] พบว่าการผสมปูนซีเมนต์ร่วมกับจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย (Fly Ash Geopolymer) สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength: UCS) และลดการแตกร้าวจากการหดตัว (shrinkage cracking) ขณะที่งานของ Masoero, E และคณะ (2018) [9] แสดงให้เห็นว่าการหนาแน่นของเจล C-S-H ในระดับนาโนมีผลต่อการลดการหดตัวแบบ self-desiccation ซึ่งช่วยให้โครงสร้างคงทนมากขึ้น

นอกจากนี้ การศึกษาโดย Yang, K และคณะ (2017) [16] พบว่าการเติมอนุภาคนาโน ZrO₂ ลงในวัสดุ C-(N)-A-S-H gel ช่วยลดการเกิด micro-cracking และปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกร้าวจากการแห้งตัว ในขณะที่การวิจัยด้านวัสดุเกล็ดนาโนกราฟีนยังชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับปรุงโครงสร้างเจล C-S-H ให้มีความหนาแน่นและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมมากขึ้น

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยวิธีผสมลึกร่วมกับปูนซีเมนต์และวัสดุเสริม เช่น เถ้าลอย จีโอพอลิเมอร์ และวัสดุนาโน เพื่อลดการหดตัว เพิ่มความแข็งแรง



และเพิ่มความทนทานของดิน ซึ่งจะเป็นแนวทางเพื่อลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง และเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้างในระยะยาว

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษากฎการเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีนเสริมด้วยเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1. เพื่อศึกษากฎการหดรัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย

1.2.2. เพื่อศึกษากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษากฎการเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีนเสริมด้วยเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.3.1 เพื่อศึกษากฎการหดรัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย

1.3.2 เพื่อศึกษากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน

1.3.3 เกล็ดนาโนกราฟีน ใช้กราฟีนแบบผง (Graphene nanoplatelet, GNP)

1.3.4 เถ้าลอย โรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง

1.3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพประกอบไปด้วย การทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limit and indices test) มาตรฐาน ASTM D 4318 และ ASTM D 427 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity test) มาตรฐาน ASTM D 854 และการหาขนาดผลึกเม็ดดิน (Grain size analysis test) มาตรฐาน ASTM D 422-63

1.3.6 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1.3.6.1 การศึกษาคุณสมบัติด้านพฤติกรรมการหดรัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอยด้วยวิธีภาพถ่ายประกอบด้วย

-อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) เกล็ดนาโนกราฟีน (GO) เถ้าลอย (FA)

-อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) เกล็ดนาโนกราฟีน (GO) เถ้าลอย (FA) ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3

-อัตราส่วนปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีน เท่ากับ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1%

-อัตราส่วนเถ้าลอย เท่ากับ 5% 10% 15% 20%

1.3.6.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดนาโนกราฟีนและปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอย ประกอบด้วย

-อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/Wc) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) เกล็ดนาโนกราฟีน (GO)

-ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6

-อัตราส่วนปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีน เท่ากับ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1%

1.3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ และเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย มีดังนี้

1.3.7.1 การทดสอบการหดรัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอยด้วยวิธีภาพถ่าย อายุการบ่มตัว 7 14 28 และ 60 วัน

1.3.7.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ตามอัตราส่วนผสมที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบอัตราการหดรัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย

1.4.2 สามารถประเมินกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบเบื้องต้น

1.4.3 ส่งเสริมการใช้เกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุทดแทน เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ลำดับที่	รายละเอียด ก า ร	ระยะเวลา									
		พ.ศ. 2567		พ.ศ. 2568							
	ดำเนินงาน	พย	ธค	มค	กพ	มค	เมย	พค	มิย	กค	สค
1.	สืบค้นข้อมูลงานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง										
2.	คำนวณอัตราส่วนผสมสำหรับการทดสอบ										
3.	ทดสอบและบันทึกผล										
4.	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ										
5.	จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										

*ระยะเวลาการดำเนินงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดทำโครงการนี้ ประกอบด้วย

2.1.1 ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay)

กรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนที่ราบลุ่มแม่น้ำ และสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งไหลผ่านกลางตอนล่างที่ราบในประเทศไทยระดับความลึกของพื้นที่ในกรุงเทพฯ นั้นมีความลึกตั้งแต่ 400 เมตร ถึง 1,800 เมตร และมีความหนาประมาณ 15-25 เมตร[14] เนื่องจากเป็นดินชั้นบนสุดจึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของคนในพื้นที่ราบภาคกลางตอนล่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรุงเทพฯและเขตปริมณฑลซึ่งมีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่มากมาย แต่ดินเหนียวกรุงเทพกลับมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่องานฐานราก เพราะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีน้ำหนักกดทับมากๆ จะบีบน้ำออกไปจากเนื้อดิน ทำให้เกิดการหดตัวลงมากจนทำให้ฐานรากแตกร้าวเสียหาย ดังนั้นการออกแบบของวิศวกรจึงต้องระมัดระวังต่อเรื่องนี้เป็นอย่างยิ่ง ชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย ดังรูปที่ 1

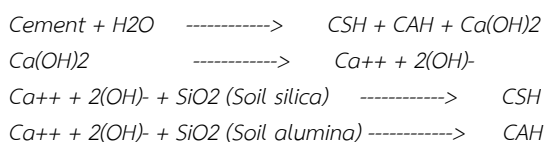


รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินและความยาวของเสาเข็มของอาคาร

2.1.2 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

Lambe et al. [6] ในปี ค.ศ.1959 , Moh.[10] ในปี ค.ศ.1962 และ Cong, M [3] กล่าวไว้ในทิศทางเดียวกันว่า น้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ C3S C2S C3A และ C4AF ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ (released hydrate lime) กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH สารทั้งสองจะมีคุณสมบัติ เป็นตัวยึดเกาะสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันที่มีความแข็งแรงสูงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (hydrated lime)จะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรงอนุภาคดินจะฝังอยู่ในผลิตภัณฑ์ของ ปฏิกิริยา (reaction product) จะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพสต์ (cement paste) จะแข็งตัวตาม เวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งแรง

โดย Moh, Z. C. (1962). [9] ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้



2.1.3 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยเกิดจากการเผาไหม้สิ่งที่เป็นถ่านหินจนอยู่ในสภาพแห้งและมีลักษณะคล้ายฝุ่นจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเถ้าลอย มีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับปูนซีเมนต์ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน[7]

ในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าหลายแห่งที่ใช้ถ่านหินและชีวมวลทำให้เกิดเถ้าลอยซึ่งสามารถนำมาใช้ปรับปรุงดินและลดต้นทุนการก่อสร้างได้ แต่ต้องพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618 หรือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135-2545 โดยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ได้รับการยอมรับว่ามีคุณภาพสูงที่สุดในประเทศ แต่เนื่องจากคุณสมบัติเถ้าลอยจากแหล่งอื่นๆไม่เหมือนกัน ดังนั้นการใช้งานเถ้าลอยในการทดแทนปูนซีเมนต์ควรได้รับการออกแบบตามคุณสมบัติของเถ้าลอยในแต่ละแหล่งที่นำมาใช้งานเพื่อที่จะสามารถปรับปรุงคุณภาพดินโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างและยังลดการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งเถ้าลอยจากแหล่งที่มีระยะทางไกลอีกด้วย

2.1.4 เกล็ดนาโนกราฟีน (Graphene nanoplatelets)

เกล็ดนาโนกราฟีน คือวัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งของแกรไฟต์ มันคือการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในรูปแบบโครงสร้างหกเหลี่ยม และเรียงตัวกันเพียงชั้นเดียวเท่านั้น คุณสมบัติอย่างแรกของกราฟีนจึงเป็นความบางและโปร่งใส หากเทียบให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนแล้วกราฟีนเป็นวัสดุที่บางบางจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้นเราถึงจะมองเห็นเป็นเยื่อบางๆคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดีและมีความยืดหยุ่นสูง กราฟีนถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมาย กราฟีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงกว่าเหล็ก 200 เท่าและสามารถนำไฟฟ้าได้มากกว่าทองแดงหลายเท่าตัว และยังสามารถนำความร้อนได้แล้วยังมีคุณสมบัติในการเพิ่มความแข็งแรงให้คอนกรีตมากขึ้นถึง 35% เพียงผสมกราฟีน 0.1%[8]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

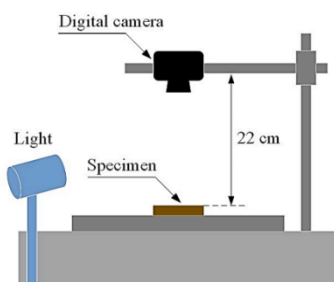
2.2.1 การทดสอบการหดตัวด้วยภาพถ่าย

จากงานวิจัยของ chompoorat T. (2022). [2] ได้ทำการทดสอบการแตกร้าวจากการหดตัวแบบ 2 มิติ ดำเนินการโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล การพัฒนาระบบสำหรับการตรวจสอบการหดตัวได้พัฒนาดังแสดงในรูป ขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทันทีหลังจากคลี่ออกจากนั้นนำชิ้นงานแต่ละชิ้นวางบนแผ่นสีเหลี่ยมสีดำที่บนแผ่นฐานอีกแผ่นหนึ่ง เพื่อให้การวางตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ แผ่นสีดำจะถูกทำเครื่องหมายไว้ตรงกลางของด้านข้างทั้งหมด แผ่นฐานจะถูกทำเครื่องหมายไว้ที่จุดกึ่งกลาง และแผ่นสองแผ่นถูกวางเรียงกันตามเครื่องหมายก่อนการถ่ายภาพ ภาพถ่ายถูกถ่ายในสตูดิโอที่มีไฟฟลูออเรสเซนต์สองดวงอยู่ที่ฐานเพื่อให้แสงสว่างแก่ขอบของตัวอย่างอย่างชัดเจนสำหรับการวัดแบบดิจิทัล ภาพถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลแบบสะท้อนเลนส์เดี่ยว (DSLR) ที่มีเลนส์ 18-35 มม. รูรับแสง F6.3 และความเร็วชัตเตอร์ 1/100 เพื่อให้ได้คอนทราสต์และระยะชัดลึกที่ดีที่สุด ภาพที่ถ่ายได้ถูกตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบวงของตัวอย่างโดยการนับพิกเซล ภาพถ่ายถูกวิเคราะห์ผ่านซอฟต์แวร์ ImageJ ตามที่ Burger และ Burge อธิบายไว้ การใช้ซอฟต์แวร์เพื่อวัดภูมิประเทศของวัสดุที่มีพื้นผิวแตกร้าวได้มีการ



อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โดยสรุป ภาพของตัวอย่างที่มีรอยแตกกว้างบนพื้นผิวจะถูกนำเข้าไปยังซอฟต์แวร์ก่อน จากนั้นภาพจะถูกแปลงเป็นโทนสีเทา และเปลี่ยนเป็นขาวดำ สุดท้ายนี้ การหาตำแหน่งการหดตัวและรอยแตกของตัวอย่างจะอยู่ในภาพ โดยละเอียด ภาพถูกประมวลผลที่ความละเอียด 297 จุด/ซม. (754 จุดต่อนิ้ว) ขนาดตัวอย่างเริ่มต้น (ก่อนการบ่มและการหดตัว) ถูกกำหนดเป็นจำนวนพิกเซล ขนาดของตัวอย่างที่หดตัวพร้อมการบ่มแบบก้าวหน้า รวมถึงพื้นที่รอยแตกและการหดตัว ถูกกำหนดในลักษณะเดียวกันโดยการนับพิกเซล ปัจจัยความหนาแน่นของรอยแตก (CDF) ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการหดตัวและการพัฒนาของรอยแตกในตัวอย่างผสม CDF ถูกกำหนดโดยสมการ (1) โดยที่ A_i คือพื้นที่ตัวอย่างเริ่มต้น, A_a คือพื้นที่การหดตัว, A_c คือพื้นที่รอยแตก และ $A_{ac} (=A_a + A_c)$ คือพื้นที่รอยแตกรวม

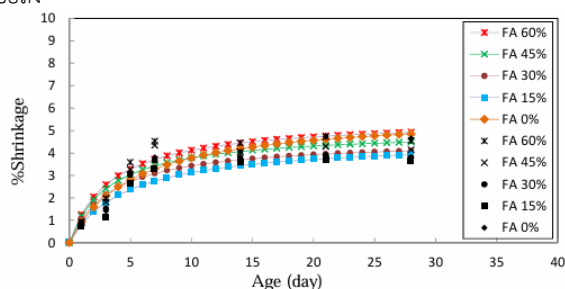
$$CDF = A_{ac}/A_i \times 100\%$$



รูปที่ 2 ทดสอบการแตกกว้างด้วยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล

2.2.2 พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย

นพนันท์ พรหมขาม (2556). [19] ได้ทำการทดสอบการหดตัวของดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอย พบว่าเมื่อผสมเถ้าลอย พบว่าการหดตัวในช่วง 7 วันจะมีการหดตัวสูงมากที่สุดที่ 4-8 % เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดช่องว่างเมื่อมีการระเหยของน้ำที่ผิวของตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดการหดตัวเนื่องจากความเค้นภายในจากแรงดูด (Suction) และจะหดตัวอีกไม่เกิน 1 % เมื่อบ่มได้ 28 วัน เนื่องจากหลังจากที่บ่มได้ 7 วันขึ้นไปจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการระเหยน้อย ส่งผลให้อัตราการหดตัวน้อยลง



รูปที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของตัวอย่างตามเวลาของดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์และเถ้าลอยจากอำเภอมะเมา

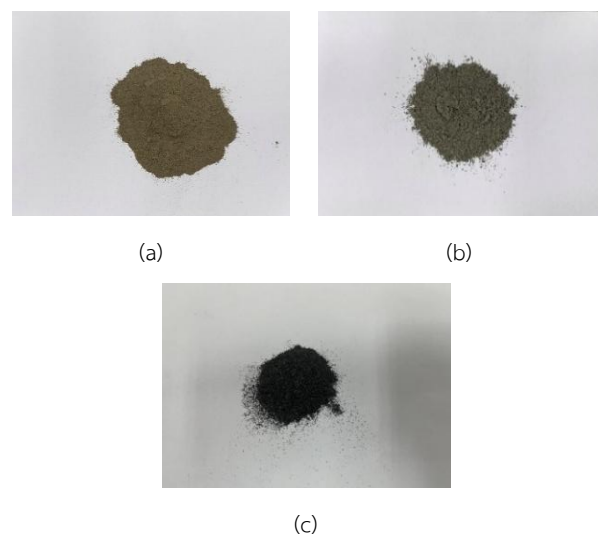
2.2.3 ซีเมนต์ที่ผสมกับเกล็ดนาโนกราฟีน

งานวิจัย Alateah, A. H. (2023). [1] ยังแสดงให้เห็นว่าการเติมกราฟีนช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตทั้งในด้านแรงอัดและแรงดัด ในขณะที่ลดความสามารถในการซึมซับน้ำซึ่งว่ากราฟีนสามารถเพิ่มความสมบูรณ์และความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต ทำให้เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสำหรับการใช้งานด้านโครงสร้าง ผลกระทบของกราฟีนต่อวัสดุประสานยังได้รับการศึกษาในแง่ของโครงสร้างจุลภาคและการเคลื่อนตัวของน้ำ พบว่าแผ่นนาโนกราฟีนสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของเฟสองค์ประกอบในซีเมนต์เพสต์ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนนอกจากนี้ การมีอยู่ของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์ยังส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำในรูปพูนขนาดนาโนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการต้านทานน้ำค้างแข็งของคอนกรีตเสริมกราฟีนการนำกราฟีนมาผสมในคอนกรีตแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปฏิบัติอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยการเพิ่มประสิทธิภาพ ความทนทาน และความยั่งยืนของโครงสร้างคอนกรีต การนำกราฟีนมาผสมมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ คุณสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อน้ำค้างแข็งและการกัดกร่อนที่ดีขึ้น และความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบเนกประสงค์ ผลการวิจัยเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้เข้าใจผลกระทบของกราฟีนต่อวัสดุประสานเท่านั้น แต่ยังมีประโยชน์เชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนาวัสดุและเทคนิคการก่อสร้างขั้นสูงอีกด้วย

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ เกล็ดนาโนกราฟีน เถ้าลอย และ สารลดน้ำพิเศษ (super plasticizer, PS) ดังรูปที่ 4 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ จากพื้นที่บางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งมีความลึกอยู่ที่ 8 ถึง 15 เมตร ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กราฟีนออกไซด์ที่ใช้คือ เกล็ดนาโนกราฟีน (Graphene nanoplatelets) และ เถ้าลอยที่ใช้คือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (a) ดินเหนียวอ่อน (b) ปูนซีเมนต์ และ (c) เกล็ดนาโนกราฟีน



3.2 การสังเคราะห์เกล็ดนาโนกราฟีน

เริ่มต้นด้วยการนำน้ำบรรจุไว้ในขวดลูกชมพูปริมาตร 500 กรัม (ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งจากส่วนผสม) และเตรียมสารลดน้ำพิเศษ ปริมาณ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ หลังจากนั้นนำสารลดน้ำพิเศษที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 5a ผสมเข้ากับน้ำในขวดลูกชมพูโดยใช้แท่งคนสารคนให้เข้ากันแล้วเติมเกล็ดนาโนกราฟีนกับแท่งแม่เหล็กคนสาร ใส่ลงไปพร้อมกับปิดฝาขวดด้วยแผ่นพลาสติกใส จึงจะนำเข้าเครื่องคนสารแม่เหล็ก และทำการคนสารที่ 150 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5b หลังจากครบเวลาแล้วให้นำแท่งคนสารออกจากขวดลูกชมพูและปิดพลาสติกใสอีกครั้งก่อนที่จะใส่ลงไปในเครื่องสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) กำลังไฟ 220 วัตต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5c หลังจากนั้นจะได้เกล็ดนาโนกราฟีนในรูปของเหลวสำหรับการใช้ในการผสมตัวอย่างต่อไป



(a)



(b)



(c)

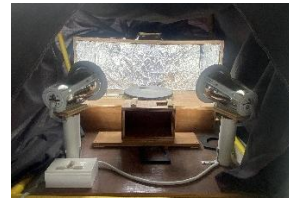
รูปที่ 5 การสังเคราะห์เกล็ดนาโนกราฟีน (a) สารลดน้ำพิเศษและน้ำ (b) เครื่องคนสารแม่เหล็ก และ (c) เครื่องสั่นอัลตราโซนิก

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

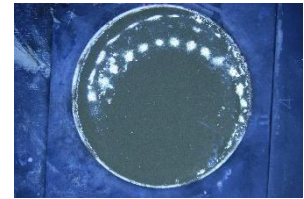
3.3.1 การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย

การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย (Shrinkage test by image processing) ใช้การถ่ายภาพตัวอย่างดินต่อเนื่องในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อวัดการหดตัว แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม ImageJ โดยที่ตัวอย่างที่ใช้เป็นดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งแบ่งส่วนผสมออกเป็นสองกลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมเกล็ดนาโนกราฟีน ส่วนกลุ่มที่สองคือการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมเกล็ดนาโนกราฟีน และเกลือ โดยเริ่มจากการนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดจนเป็นผงแล้วผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ แล้วเติมเกล็ดนาโนกราฟีนในรูปแบบของเหลวและน้ำ จากส่วนผสมที่ออกแบบไว้ แล้วนำมาผสมรวมกัน จนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทลงในโมลตัวอย่างรูปแบบสำหรับทดสอบการหดตัวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร และสูง 0.8 เซนติเมตร เมื่อเทลงไปแล้วให้ปาดหน้าตัวอย่างให้เสมอกัน หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายรูปเพื่อเก็บภาพถ่ายตัวอย่างเริ่มต้นดังรูปที่ 6b จากนั้นนำตัวอย่างปิดด้วยแผ่นพลาสติกใส แล้ว

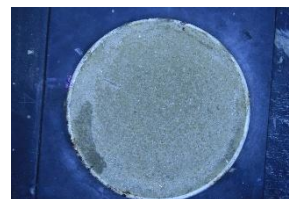
ทำการบ่มต่อเป็นระยะเวลา 7 28 และ 60 วัน เมื่อครบวันบ่มนำตัวอย่างมาถ่ายรูปหลังบ่มตัวดังรูปที่ 6c แล้วนำไปอบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างมาถ่ายรูปอีกครั้ง ดังรูปที่ 6d หลังจากนั้นนำรูปตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม Photoshop เพื่อตัดรูปเฉพาะตัวอย่างดิน แล้วจึงทำการวัดขนาดรูปของตัวอย่างต่อด้วยโปรแกรม ImageJ ผลลัพธ์ที่ได้คือเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแต่ละส่วนผสม และอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้น



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 6 การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีถ่ายภาพ
(a) ทดสอบการแตกร้าวด้วยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล
(b) ภาพตัวอย่างเริ่มต้น
(c) ภาพตัวอย่างหลังจากครบรอบการบ่มตัว และ
(d) ภาพตัวอย่างหลังจากนำไปอบ

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ใช้วัดค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมโดยการบีบตัวอย่างในแนวตั้งจนแตกเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (q_u) โดยที่ตัวอย่างที่ใช้เป็นดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ และเกล็ดนาโนกราฟีน วิธีการเตรียมตัวอย่างนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดจนเป็นผงแล้วผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ แล้วเติมเกล็ดนาโนกราฟีนในรูปแบบของเหลวและน้ำ จากส่วนผสมที่ออกแบบไว้ แล้วนำมาผสมรวมกัน จนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทลงในโมลตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร และสูง 7.5 เซนติเมตร ผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากแรงอัดสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ทำให้สามารถประกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

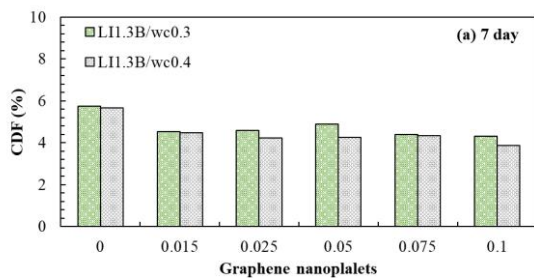


4. ผลการวิจัย

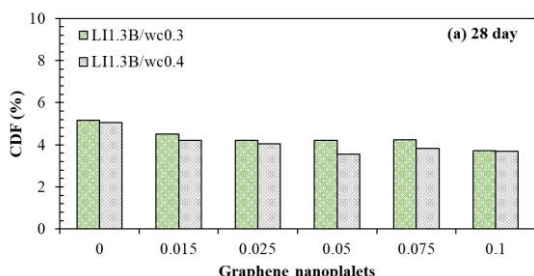
ในการศึกษานี้ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (soft Bangkok) เนื่องจากสามารถนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาได้ ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ เป็นดินที่มีปริมาณน้ำสูงใกล้เคียงกับขีดจำกัดของเหลวจึงทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติยืดยาว อ่อนตัวมาก และมีศักยภาพในการทรุดตัวสูงและมีกำลังรับแรงเฉือนในธรรมชาติต่ำ ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนเริ่มใช้งานฐานราก โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นพัฒนาการปรับปรุงดินด้วยวัสดุเสริม ได้แก่ปูนซีเมนต์ เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน และเถ้าลอย ซึ่งงานวิจัยนี้มีผลการทดสอบ ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบการหดตัวของดินเหนียว (Shrinkage test)

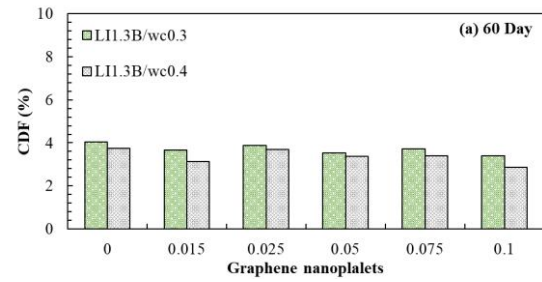
ส่วนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (C) เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน (GO) โดยใช้อัตราส่วนปริมาณส่วนผสมต่อปริมาตรในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ดัชนีของเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 ปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนร้อยละ 0.015 0.025 0.05 0.075 และ 0.1 สำหรับการทดสอบการหดตัวของดินเหนียว (Shrinkage test) ซึ่งมีอายุการบ่มตัวอย่างที่ 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ผลที่ได้คือ แนวโน้มการหดตัวลดลงเมื่อปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนที่มาแทนที่ปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มตัวอย่างมากขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบการหดตัวกับค่า LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 พบว่า LI 1.6 มีการหดตัวน้อยกว่า LI 1.3 ซึ่งเป็นไปตามทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Hobbs, P.R.N. (2019). [4] ได้สรุปความสัมพันธ์ของ LI และ Shrinkage Index ว่าไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น กล่าวคือเมื่อค่า LI มากขึ้นหรือน้อยลงไม่ได้ส่งผลให้ค่าการหดตัวเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่แน่นอนหรือมีนัยสำคัญ



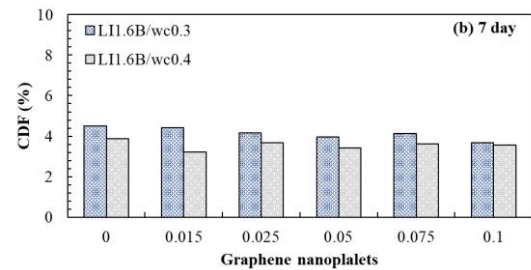
(8.1a)



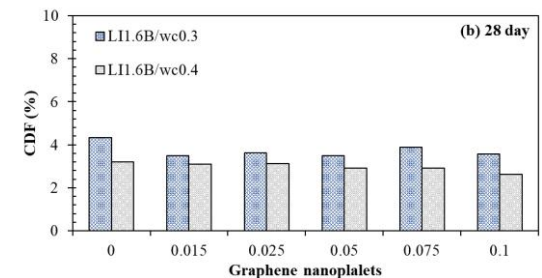
(8.2a)



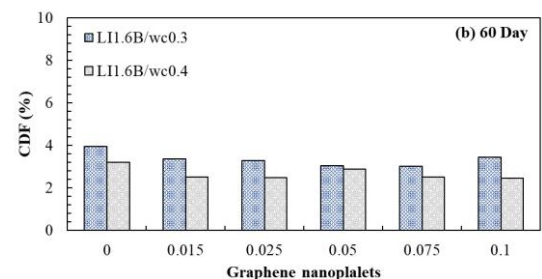
(8.3a)



(8.1b)



(8.2b)



(8.3b)

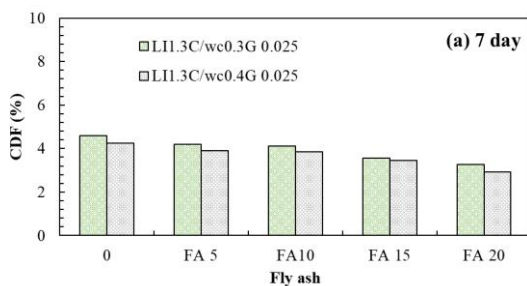
รูปที่ 8 ผลการทดสอบการหดตัวเทียบกับอายุการบ่มตัว

(a) LI 1.3 B/Wc 0.3, 0.4 GO (b) LI 1.6 B/Wc 0.3, 0.4 GO

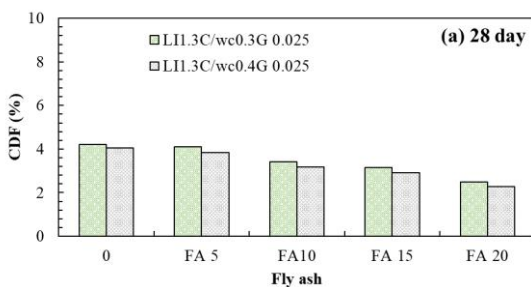
ส่วนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (C) เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน (GO) และเถ้าลอย (fly ash) โดยใช้อัตราส่วนปริมาณส่วนผสมต่อปริมาตรในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดยเลือกใช้ดัชนีของเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 และปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนร้อยละ 0.025 เนื่องจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวประกอบกับผลการทดสอบการหดตัวในส่วนที่ 1 พบว่าส่วนผสม LI 1.3 B/wc 0.3 และ 0.4 GO 0.025 มีกำลังรับแรงอัดและการ



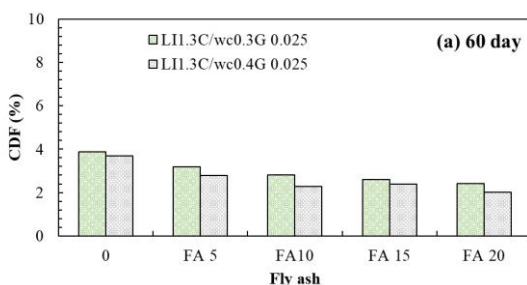
หัตถ์ที่เหมาะสม ดังนั้นจึงนำมาพัฒนาต่อด้วยเถ้าลอย ซึ่งในการทดสอบมีอายุการบ่มตัวอย่างที่ 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 ผลที่ได้คือแนวโน้มการหดตัวลดน้อยลงเมื่อปริมาณร้อยละของเถ้าลอยและอายุการบ่มตัวอย่างมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chompooorat T. (2022). [2] ที่ให้คำอธิบายไว้ว่าเถ้าลอยเป็นสารลดแรงตึงผิว เมื่อกระบวนการ Hydration ของซีเมนต์เกิดขึ้นจะทำให้เกิดโครงสร้างเจล C-S-H และน้ำส่วนเกินจะทำให้เกิดรูพรุนแคปิลลารี (capillary pores) ในชั้นเจล ถ้าหากรูพรุนแคปิลลารีมีขนาดเล็กน้ำภายในส่วนเกินจะไม่สามารถระเหยได้ แต่ถ้ารูพรุนมีขนาดที่ใหญ่กว่าส่วนเกินจะระเหยออกไปซึ่งจะทำให้เกิดแรงตึงผิวของน้ำในรูพรุน (surface tension of pore water) ดึงโครงข่ายเจลเข้าหากันทำให้ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) หดตัว และถ้าแรงตึงผิวมากเกินไป อาจเกิดรอยแตกขนาดเล็ก ๆ (microcracks) ขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้แสดงว่า การเติมเถ้าลอยช่วยลดแรงตึงผิว จึงลดปริมาณการหดตัว



(9.1a)



(9.2a)



(9.3a)

รูปที่ 9 ผลการทดสอบการหดตัวเทียบกับอายุการบ่มตัว

(a) LI 1.3 B/Wc 0.3, 0.4 GO 0.025% FA

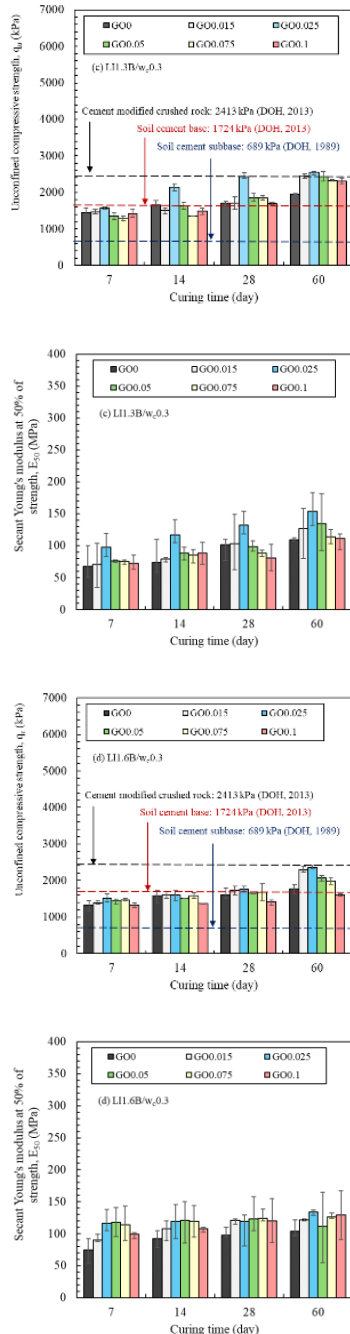
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (C) เกล็ดนาโนกราฟีน (GO) และ เถ้าลอย (FA) โดยใช้อัตราส่วนผสมปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาตรในมวลดิน (B/wc) เท่ากับ 0.3 ใช้ดัชนีความเหลว (Liquidity Index) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 ปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนที่ใช้ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1% สำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test, UC) บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ UC ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 จากผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 B/wc เท่ากับ 0.3 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.025% (LI1.3 B/wc 0.3GO 0.025) เป็นค่ามากที่สุด ในอายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1573.206 kPa อายุการบ่มตัว 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2148.045 kPa อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2426.563 kPa และการบ่มตัว 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2547.947 kPa และในทางตรงกันข้ามส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 B/wc เท่ากับ 0.2 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.1% (LI1.6 B/wc 0.2GO 0.1) เป็นค่าที่น้อยที่สุด อายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1332.949 kPa อายุการบ่มตัว 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1367.917 kPa อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1423.690 kPa อายุการบ่มตัว 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1608.138 kPa จะสังเกตได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่มตัว ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020). [17] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับทดสอบคุณสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนผสมเถ้าลอย และวิจัยของ Mohammed et al. (2022). [11] งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสภาพดินเหนียวด้วยเถ้าลอยให้มีเสถียรภาพ

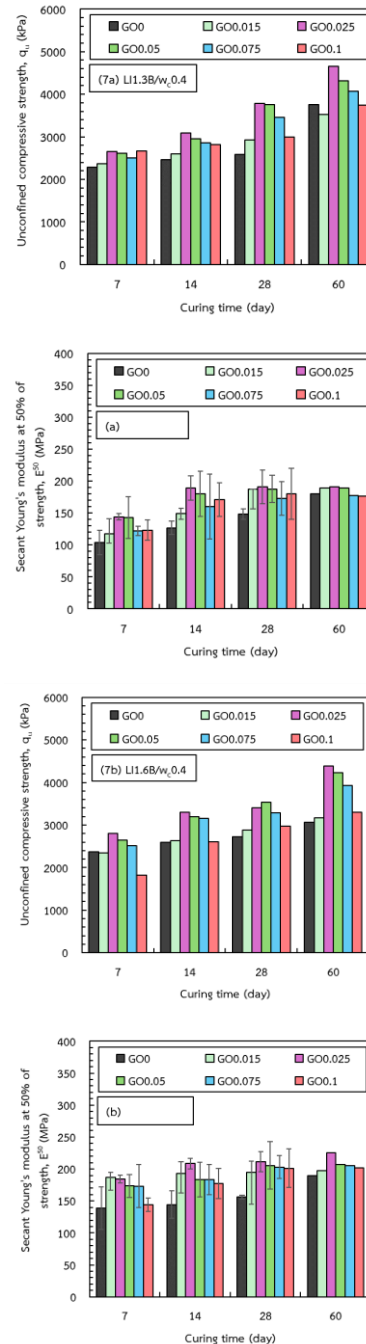
นอกจากนี้ผลการทดสอบที่อายุการบ่มตัวเดียวกันพบว่า ปริมาณกราฟีนจาก 0.015-0.025% มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในมวลดิน มีผลกระทบที่สำคัญต่อการสร้างผลึก แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์, CA(OH)₂ ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนจะช่วยปรับปรุงกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุ ส่งผลให้การสร้างผลึกดังกล่าวมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lv et al. (2013) [8] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของเกล็ดนาโนกราฟีน การสร้างผลึกไฮเดรชันร่วมกับเกล็ดนาโนกราฟีนในปริมาณน้อย ทำให้ได้ผลึกไฮเดรชันมีความหนาแน่นและความแข็งแรงคล้ายรูปดอกไม้ เมื่อส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 B/wc เท่ากับ 0.3 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.025% (LI1.3B/wc 0.3GO 0.025) ในอายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2426.563 kPa ซึ่งเป็นส่วนผสมของปริมาณกราฟีนที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การกระจายตัวของเกล็ดนาโนกราฟีนได้ดีและสม่ำเสมอ ส่งผลให้การกระจายตัวของผลึกมีความหนาแน่นสูงขึ้น โดยผลึกที่กระจายตัวได้ดีจะมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลต่างๆ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณกราฟีนจาก 0.050-0.1% พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง เนื่องจากเกล็ดนาโนกราฟีนในส่วนผสมนี้ทำให้รูปร่างของผลึกไฮเดรชันเปลี่ยนแปลงไป แต่ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6B/Wc เท่ากับ 0.2 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.1%(LI1.6B/wc 0.2GO 0.1) ในอายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่าเท่ากับ 1332.949 kPa ได้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดโดยผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับรูปหลายเหลี่ยมผิบบกคี่ที่เกาะติดกัน ซึ่งแตกต่างจากผลึกที่มีลักษณะคล้ายดอกไม้ที่มีรูปร่างหลาย



เหลี่ยมไม่สมมาตรและแตกออกได้ง่าย ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวในวัสดุ ส่งผลให้ ความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุลดลง โดยการกระจายตัวของผลึก ที่ผิดปกติจะไม่สามารถเสริมความแข็งแรงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อ เทียบกับการก่อตัวของผลึกไฮโดรเจนที่คล้ายดอกไม้เหมือนกับการใส่ ปริมาณเกล็ดนาโนกราฟีนที่เหมาะสมในวัสดุ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปใน ทิศทางเดียวกับงานวิจัย LI et al. (2013) [8] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้าง จุลภาคและคุณสมบัติของเกล็ดนาโนกราฟีน



รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเทียบกับอายุการบ่มตัว



รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเทียบกับอายุการบ่มตัว

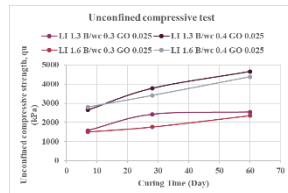
(จากผลงานวิจัยของ ก้องภพค้ำน้อย และคณะฯ (2567). [20])

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวของดินเหนียว และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

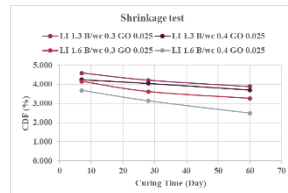
การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดกับการหดตัว โดยพิจารณาเฉพาะส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงที่สุดในแต่ละอัตราส่วนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังหัวข้อที่ 4.2 จะได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดจะอยู่ที่ร้อยละเกล็ดนาโนกราฟีน (GO) 0.025 ดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นไปในทางทิศเดียวกับงานวิจัยของ ก้องภพค้ำน้อย และคณะฯ (2567). [19] ดังรูปที่ 11 ซึ่งได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวโดยใช้ส่วนผสม LI



1.3 B/w_c 0.4 Go และ LI 1.6 B/w_c 0.4 Go เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลคู่กับหัวข้อที่ 4.1 ส่วนที่ 1 จะได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งเมื่อเทียบดัชนีของเหลว LI พบว่า LI 1.3 B/w_c 0.3 และ 0.4 Go 0.025 มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวยาวมากกว่า LI 1.6 B/w_c 0.3 และ 0.4 Go 0.025 ดังรูปที่ 10(a) ซึ่งจะตรงข้ามกับผลการทดสอบที่ LI 1.6 B/w_c 0.3 และ 0.4 Go 0.025 มีอัตราการผลิตน้อยกว่า LI 1.3 B/w_c 0.3 และ 0.4 Go 0.025 ดังรูปที่ 10(b) จากผลดังกล่าวจึงเลือก LI 1.3 B/w_c 0.3 และ 0.4 GO 0.025 เป็น optimum base mix สำหรับการปรับปรุงต่อไปโดยการเสริมด้วย เถ้าลอย (fly ash) เพื่อประเมินผลการทดสอบ



(a)



(b)

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะการหดตัวและกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย

1.จากการศึกษาการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนที่ส่วนผสม LI 1.3 B/w_c 0.3, 0.4 และ LI 1.6 B/w_c 0.3, 0.4 มีแนวโน้มการหดตัวลดลงเมื่อปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเกล็ดนาโนกราฟีน (GO) เพิ่มขึ้นโดยมีค่าเกล็ดนาโนกราฟีนที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 0.025%

2.จากการศึกษาการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนที่ส่วนผสม LI 1.3 B/w_c 0.3 GO 0.025 และ LI 1.3 B/w_c 0.4 GO 0.025 มีแนวโน้มการหดตัวลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยมากขึ้น

3.จากการศึกษากำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนที่ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 B/w_c เท่ากับ 0.3 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.025% (LI 1.3 B/w_c 0.3 GO 0.025) การบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลัง 2426.563 kPa ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง คุณลักษณะการหดตัวและกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เสริมด้วยเกล็ดนาโนกราฟีนและเถ้าลอย เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาในระดับปริญญาตรีสามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ นายอนุพงศ์ คำปลอด และผู้ที่ยังไม่ได้กล่าวถึงที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆเพื่อให้นักวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จัดสรรงบประมาณสนับสนุนโครงการการวิจัย ปีการศึกษา 2568 สุดท้ายนี้ผู้วิจัย

หวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขอรับไว้และขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alateah, A. H. (2023). Graphene concrete: Recent advances in production methods, performance properties, environmental impact and economic viability. *Case Studies in Construction Materials*. Volume 19, e02653.
- [2] Chompoorat T, Thepumong T, Khamplod A, and Likitlersuang S. (2022). Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing. *Construction and Building Materials*, 316, 125858.
- [3] Cong, M., Longzhu, C. and Bing, C. (2014). Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer. *Construction and Building Materials*. Volume 71, PP. 354-362.
- [4] Hobbs, P.R.N. (2019). Shrinkage limit test results and interpretation for clay soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. Volume 52. PP. 220 – 229.
- [5] Horpibulsuk S. (2011). Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Construction and Building Materials*. Volume 25, Issue 4 , PP. 1521-1531.
- [6] Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. *Highway Research Board. Bulletin 241*, pp.67-103.
- [7] Liu, M. (2024). Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: A sustainable solution for pavement construction. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 204. 107533.
- [8] Lv, S. (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*. 49(4):121-127.
- [9] Masoero, E., Cusatis, G., and Di Luzio, G. (2018). A multiscale framework for the prediction of concrete self desiccation. *Computational Modelling of Concrete Structures*. Bad Hofgastein, Austria.
- [10] Moh, Z. C. (1962). Soil stabilization with cement and sodium additives. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(6), pp. 81-105.
- [11] Noaman, M. F., Khan, M. A., Ali, K., & Hassan, A. (2022). A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*. Volume 6. 100151.
- [12] Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C. and Udomchai, A. (2016). Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and



calcium carbide residue based geopolymer. Applied Clay Science. 127-128. PP. 134-142.

[13] Phanikumar, B. R. (2004). Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 130, Issue 7.

[14] Suksiripattanapong, C., Sakdinakorn, R., และคณะ (2022). Properties of soft Bangkok clay stabilized with cement and fly ash geopolymer for deep mixing application

[15] Thitinan_Micropile (2020). สุทธิศักดิ์, ลักษณะดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Bangkok clay).

[16] Yang, K., Özçelik, V. O., Garg, N., Gong, K., and White, C. E. (2017). Drying-induced atomic structural rearrangements in sodium-based calcium-alumino-silicate-hydrate gel and the mitigating effects of ZrO₂ nanoparticles. Physical Chemistry Chemical Physics.

[17] Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Krairan, K., Jongpradist, P., Likitlersuang, S. (2020). Laboratory investigation of the properties of cement fly ash gravel for use as a column-supported embankment. Construction and Building Materials. Volume 257. 119493.

[18] กองนโยบายและแผนงานสำนักงานการวางผังและพัฒนาเมืองกรุงเทพมหานคร (2562). การขยายตัวของที่อยู่อาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร. รายงานการศึกษา.

[19] นพรัตน์ พรหมขาม (2556). พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

[20] ก้องภพ คำห้อย, ณัฏฐธิดา แก้วทอจ, โสภิตา เมืองเมือง, และ ธนกร ชมภูรักษ์. (2567). พฤติกรรมด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์. โครงการวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยพะเยา.



ผลของการใช้ผักตบชวาและเศษคอนกรีตในดินซีเมนต์

Effects of Using Water Hyacinth and RCA in Cement-Stabilized Soil

นายกนกศักดิ์ ชั่วออก^{1*} นางสาวเกษรินทร์ แสงจิต² นางสาวพัสนันท์ นาสวน³ และนายวิวัฒน์ นิการณ⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101407@up.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ผักตบชวาและหินคลุกทดแทน (Recycled Concrete Aggregate: RCA) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ โดยมุ่งเน้นศึกษาความแข็งแรงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์เมื่อแทนที่วัสดุบางส่วนด้วยผักตบชวาและ RCA ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน การทดสอบหลักประกอบด้วย การหาค่าการรับกำลังอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compression Test) และการหาค่าการคงตัวของดิน ผลการศึกษาพบว่า การเติมผักตบชวาในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มความเหนียวของดินซีเมนต์ได้ ขณะที่การเติม RCA ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของดินอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุเหลือใช้อย่างผักตบชวาและ RCA สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุท้องถิ่นเพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืน

Abstract

This study aims to investigate the effects of using water hyacinth and recycled concrete aggregate (RCA) as replacement materials in cement-stabilized soil. The research focuses on evaluating the strength and engineering properties of cement-mixed soil incorporating varying proportions of water hyacinth and RCA. The primary tests include unconfined compression and soil stability analysis. Results indicate that an appropriate amount of water hyacinth enhances ductility and reduces cracking, while RCA significantly increases the compressive strength. The findings suggest that the use of waste materials such as water hyacinth and RCA can serve as a sustainable alternative for improving soil quality and promoting environmental conservation.

คำสำคัญ(Keywords)

1. ดินซีเมนต์
2. ผักตบชวา
3. หินคลุกทดแทน (RCA)
4. การปรับปรุงคุณภาพดิน
5. ความแข็งแรงการรับแรงอัดแกนเดียว

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในรูปแบบใหม่จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาวัชพืชน้ำและเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งจากธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา ซึ่งมักมีการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการผสมซีเมนต์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความคงตัวของดิน อย่างไรก็ตาม การผลิตซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก และมีต้นทุนสูง การใช้วัสดุเหลือใช้อย่างผักตบชวาและวัสดุรีไซเคิล เช่น หินคลุกจากคอนกรีตเก่า (Recycled Concrete Aggregate: RCA) มาทดแทนบางส่วนของดินซีเมนต์ จึงเป็นแนวทางที่สามารถช่วยลดการใช้ซีเมนต์ ลดต้นทุน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุท้องถิ่นให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน โดยประเมินสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ที่ผสมผักตบชวาและหินคลุกรีไซเคิล เพื่อหาความเหมาะสมของสัดส่วนการผสมที่ให้ผลดีที่สุดต่อความแข็งแรงและความคงตัวของดิน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติร่วมกับดินซีเมนต์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเส้นใยจากผักตบชวาเพื่อใช้ในวิศวกรรม
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดแนวเดียวของดินซีเมนต์
4. เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมและเสนอแนวทางการลดปริมาณผักตบชวาที่มีปริมาณมาก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ดินเหนียวอ่อนโดยใช้ขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4
2. เส้นใยผักตบชวาที่ผ่านวิธีปรับปรุงคุณภาพ
3. ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์สูตรไฮดรอลิก
4. ศึกษาทางด้านคุณสมบัติด้านวิศวกรรม โดยการทดสอบแรงอัด Unconfined Compression และ Compaction
5. RCA โดยใช้ขนาดผ่านร่อนที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4



1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.เข้าใจถึงประสิทธิภาพของเส้นใยผักตบชวาที่นำมาใช้ด้านวิศวกรรม
- 2.เข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์
- 3.เข้าใจถึงพฤติกรรมแรงอัดดินซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยผักตบชวา
- 4.สามารถลดปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำ
- 5.สามารถนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้งานใหม่ได้

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ระยะเวลา(เดือน)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาโครงการและงานวิจัย												
2	วางแผนเตรียมวัสดุและหาแหล่งวัสดุ												
3	เตรียมดินเหนียวอ่อนร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4 และเส้นใยผักตบชวา												
4	ทำการทดสอบแรงอัดทางกระบอกดินเหนียวอ่อนผสม CA และเส้นใยผักตบชวา												
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ												
6	จัดทำรูปแบบรายงาน												

ตารางที่ 1 ตารางปฏิบัติแผนงาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินเหนียวกรุงเทพ และปริมาณชล

ดินเหนียวกรุงเทพ เป็นตะกอนชั้นบนที่พบในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างรวมถึงกรุงเทพและเขตปริมณฑลสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 หน่วยได้แก่ หน่วยตะกอนล่างสุดเป็นดินเหนียวปนทรายละเอียด เนื้อแน่นเหนียว สีเทาอ่อน มีจุดปะสีเหลืองประมาณ 5% สะสมตัวในชะวากทะเล ตะกอนหน่วยกลางประกอบด้วยดินเหนียวปนทรายแป้ง เนื้อนิ่ม สีเทาเข้มเศษพืชและเปลือกหอยปนมาก เป็นตะกอนที่สะสมตัวในที่ราบลุ่มน้ำขึ้นถึง ตะกอนหน่วยบนสุดเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งเนื้อนิ่ม สีเทาปนเขียว มีเปลือกหอยปนมาก สะสมตัวบนพื้นที่ระดับต้น ดินเหนียวกรุงเทพมีความหนาประมาณ 15-25 ม.และ มีอายุประมาณปลายยุคไพลสโตซีนถึงยุคโฮโลซีน

ดินเหนียวกรุงเทพประกอบด้วยแร่เคลย์หลายชนิด ได้แก่ แร่มอนโมริลโลไนต์ 60% แร่เคโอลิไนต์ 25% และแร่อีลไรต์ 15% มีคุณสมบัติในการขยายตัวและหดตัวได้มาก มีความแกร่งของเนื้อดินต่ำ และมีค่าดัชนีพลาสติกสูง มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 24-30% คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้โครงสร้างฐานรากทางวิศวกรรมเสียหายแตกร้าวได้ หรืออาจทำให้เกิดรอยแยกและการเลื่อนหลุดเป็นกะบิชของแผ่นดินได้่างย ดังนั้น ในการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ที่ประกอบด้วยดินเหนียวกรุงเทพ จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง และต้องการความเชี่ยวชาญเป็นพิเศษ



รูปที่ 1 ดินเหนียวอ่อน

2.2 ผักตบชวา

ผักตบชวามีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ โดยเชื่อว่ามันต้นกำเนิดมาจากประเทศบราซิลแถบลุ่มน้ำแอมะซอน ดอกของผักตบชวามีสีม่วงอ่อนสวยงามคล้ายดอกไฮยาซินธ์ (Hyacinth) จึงทำให้เป็นที่รู้จักในภาษาอังกฤษว่า Water Hyacinth (วอเตอร์ไฮยาซินธ์) ด้วยความสวยงามนี้เอง ทำให้มีการนำผักตบชวาไปปลูกเป็นไม้ประดับตามสวนพฤกษศาสตร์ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

การเข้าสู่ประเทศไทยการนำผักตบชวาเข้าสู่ประเทศไทยมีหลายข้อมูล แต่ข้อมูลที่ได้รับการอ้างอิงบ่อยที่สุดคือเกิดขึ้นในสมัย รัชกาลที่ 5 (พ.ศ. 2439) เมื่อสมเด็จพระนางเจ้าเสาวภาผ่องศรี พระบรมราชินีนาถ เสด็จประพาสเกาะชวา (ประเทศอินโดนีเซียในปัจจุบัน) และได้ทอดพระเนตรเห็นดอกของพืชชนิดนี้ที่นางกำนัลและเจ้านายฝ่ายในใช้ตัดหู จึงโปรดให้นำกลับมาปลูกในประเทศไทยโดยเริ่มแรกมีการนำมาปลูกไว้ที่วังสระปทุม เพื่อเป็นไม้ประดับ แต่เมื่อเกิดเหตุน้ำท่วม ทำให้ผักตบชวาลุดกระจายออกไปสู่แม่น้ำลำคลอง และด้วยคุณสมบัติการขยายพันธุ์ที่รวดเร็วทั้งแบบอาศัยเพศ (เมล็ด) และไม่อาศัยเพศ (การ



แตกไหล) ทำให้ผักตบชวาแพร่กระจายไปทั่วแหล่งน้ำธรรมชาติอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2 ผักตบชวาหลังมหาวิทยาลัยพะเยา

2.3 การปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์

การปรับปรุงดินมีหลายวิธี ในดินชนิดเดียวกันอาจมีการปรับปรุงที่เหมือนกัน หรือต่างกันก็ได้ทั้งนี้ในการสร้างถนนโดยทั่วไป ดินที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่ำจะเป็นปัญหาต่อการก่อสร้าง ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของดินแต่ละที่อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เกิดได้ทั้งจากตามธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ทำให้คุณภาพของดินลดลงการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ หรือที่เรียกว่าดินซีเมนต์นั้น ส่วนใหญ่มักนำมาเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับงานฐานรองท่อ พื้นที่ลาดชัน และการสร้างถนนโดยปกติดินซีเมนต์จะมีกำลัง แรงอัดแรงเฉือนดี แต่จะมีความเปราะและต้านแรงดึงต่ำ จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร้าวได้ง่าย ส่วนผสมของดินซีเมนต์จะมีความแตกต่างจากใช้ปูนปอร์ตแลนด์หรือไฮดรอกซ์

เรื่องปริมาณซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตซีเมนต์จะเคลือบอนุภาคมวลรวมทั้งหมดและยึดเกาะเข้าด้วยกันแต่ในดินซีเมนต์จะมีปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่าทำให้มีช่องว่างเหลืออยู่ จึงทำให้เนื้อประสานซีเมนต์ยังคงเป็นก้อนและไม่ประสานกัน

ดินซีเมนต์ชนิด Cement-modified soils (CMS) ถูกคิดค้นโดย เบนจามิน แฮร์ริสัน ฟลินน์ เพื่อปูถนนในรัฐลุยเซียนาในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 1 มี 5 ประเภท ดังนี้ Cement-Modified soils (CMS), Soil-Cement base (SCB), Cement-treated base (CTB), อะคริลิกโคพอลิเมอร์, ดินซีเมนต์ผสมยางพารา



ตารางที่ 2 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์

สถาบัน	เกณฑ์การออกแบบ
กรมทางหลวง	UCS ที่อายุการบ่ม 7 วัน
	1 มีค่าไม่น้อยกว่า 2413 Kpa สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทางหินลูก
	2 มีค่าไม่น้อยกว่า 1723 Kpa สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทาง
	3 มีค่าไม่น้อยกว่า 689 Kpa สำหรับก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง
British Road Research Laboratory, UK	USC ที่อายุการบ่ม 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 psi
National Association of Australian State Road Authority (NAASRA), Australia	USC ที่อายุการบ่ม 7 วัน อยู่ในช่วง 150 ถึง 250 psi

2.4 การปรับปรุงดินโดยใช้เส้นใย

กระบวนการปรับปรุงดินมีด้วยกันหลากหลายวิธีดังที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้า การปรับปรุงดินโดยใช้วัสดุเสริมแรงจำพวกเส้นใย ก็เป็นหนึ่งวิธีที่ได้ความนิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเนื่องจากมีต้นทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการปรับปรุงดิน โดยลักษณะทั่วไปของการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดิน สามารถจำแนกตามรูปแบบการใช้งานออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆดังนี้ 1.การใช้ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ และ 2.จากการทดสอบเส้นใยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของตัวอย่างจากวัสดุประเภนี้เป็นวัสดุเหนียว

งานวิจัยหนึ่งศึกษาการเปรียบเทียบพฤติกรรมของดินถมที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนระหว่างมีแผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรงกับไม่มีแผ่นใยสังเคราะห์เสริมความแข็งแรง ศึกษาเฉพาะพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินเหนียวอ่อน เสถียรภาพความลาดชันของดินถมและการยึดตัวของแผ่นใยสังเคราะห์ จากผลการตรวจวัดค่า strain พบว่าแผ่นใยสังเคราะห์จะมีค่า strain เกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณขอบของแผ่นใยสังเคราะห์ สามารถวัดค่า strain ได้เท่ากับ 8.9% นอกจากนี้ strain ที่บริเวณกึ่งกลางได้ค่า strain ใกล้เคียงกับ strain gauge ที่บริเวณขอบ วัดได้ 8.5% ทำให้สรุปได้ว่าค่าแรงดึงสูงสุดเกิดในแผ่นใยสังเคราะห์บริเวณ slope ของดินถม จากการเปรียบเทียบค่า จากการทดสอบหาค่าแรงดึงสูงสุดได้เฉลี่ย 8.3% จากการตรวจวัด inclinometer พบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างมากที่สุด มีค่าประมาณ 0.013 และ 0.023 เมตร เกิดที่ระดับ 1.00 กับ 4.00 เมตร ได้การพังทลายโดยสังเกตเห็นรอยแยกได้อย่างชัดเจนสามารถวัดความกว้างของรอยแยกที่มากที่สุดได้ประมาณ 0.30 เมตร จากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันของดินถมพบว่า F.S. = 1.16 ในกรณีที่ยังไม่มีการเสริมแผ่นใยสังเคราะห์จะมีค่า F.S. = 0.82 และกรณีมีการเสริมแผ่นใยสังเคราะห์ค่า F.S. เพิ่มขึ้นเป็น 1.71

3.วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1.ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และปริมาณชล
- 2.เส้นใยผักตบชวา
- 3.โซดาไฟ หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 4.ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
5. RCA

อัตราส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพฯมาจากแหล่งเดียว จึงใช้ปริมาณส่วนผสม ปูนซีเมนต์ 10-20 % RCA 30-50% โดยอ้างอิงจากมาตรฐานกรมทางหลวง

ตารางที่ 3 รายละเอียดอัตราส่วนผสม

Code	Soil (g)	Fiber (%)	RCA (g)	Cement (g)	Water (g)
W260F0	400	0	500	100	260
W260F1.25	387.5	1.25	500	100	260
W260F2.50	375	2.5	500	100	260
W180F0	400	0	500	100	180
W205F1.25	387.5	1.25	500	100	205
W230F2.50	375	2.5	500	100	230

หมายเหตุ :

F คือ ปริมาณเส้นใยผักตบ

W คือ น้ำที่เหมาะสม

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

เนื่องจากใช้ดินเหนียวกรุงเทพฯจึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของดินที่ใช้เป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดินและส่วนผสมต่างๆของดินรวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยผักตบชวาคด้วยซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และส่วนผสมดินซีเมนต์

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
ความกว้างจำเพาะ,SG	2.57 - 2.73	-
ขีดจำกัดเหลว,LL	70-140	%
ขีดจำกัดพลาสติก,PL	25-45	%
ขีดจำกัดการหดตัว,SL	20-25	%
ค่าดัชนีพลาสติก,PI	40-70	%
ปริมาณดินมีผลละเอียด, % _f	80	%
การจำแนกดิน(USCS)	CH	-
หน่วยน้ำหนักแห้งดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ที่ 10%	7.73	KN/m ³
ความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ที่ 10%	25-40	%

ตารางที่ 5 คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยผักตบชวา

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
Density	0.068042792	kg/m ³
กำลังรับแรงดึง	0.12	MPa (Megapascal)
โมดูลัสยืดหยุ่น	17.6-443	MPa (Megapascal)

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1.แบบโมลทรงกระบอกขนาด 5 x 11 cm
- 2.ค้อนขนาด 2.28 kg
- 3.เครื่องกด Unconfined Compression 5 kN

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การออกแบบพลังงานการบดอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินซึ่งโดยเฉพาะการทดสอบดังกล่าวขนาดของตัวอย่างที่ใช้มีขนาดที่แตกต่างกับตัวอย่างจากทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเหตุผลนี้เองทำให้ต้องมี การควบคุมหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีหน่วยน้ำหนักที่ เท่ากันกับดินที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานซึ่งวิธีการควบคุมหน่วยน้ำหนักจะทำได้โดยวิธีการเทียบพลังงานในการบดอัด โดยมีวิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัดจากการ

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาพลังงานบดอัดจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 15.2 cm ขนาด



ความสูงของโมลต์อัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 48 cm จะได้ปริมาตรของโมลต์อัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 3226.34 cm^3 น้ำหนักของคอนเท่ากับ 6.985 kg ระยะยกของคอนบดอัดเท่ากับ 48cm จำนวนชั้นบดอัด 5 ชั้น จำนวนครั้งในการบดอัดแต่ละชั้น 56 ครั้ง

$$\text{จากสมการ} \quad E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

$$\text{จะได้} \quad E = \frac{56 \times 5 \times 6.985 \times 42}{3226.34} = 29.09749127$$

ขั้นตอนที่ 2 ย้ายสมการเพื่อคำนวณหาจำนวนครั้งในการบดอัดโมลต์หลัก ขนาดความกว้างของโมลต์ เท่ากับ 5 cm ขนาดความสูงของโมลต์ เท่ากับ 11 cm จะได้ปริมาตรของโมลต์อัด เท่ากับ 241.66 cm^3 น้ำหนักของ

คอนบดอัดแบบใหม่เท่ากับ 2.28 kg ระยะยกของคอนแบบใหม่เท่ากับ 54 cm จำนวนชั้นบดอัด 3 ชั้น พลังงานจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน $29.09749127 \text{ cm} \cdot \text{kg} / \text{cm}^3$

$$\text{จากสมการ} \quad E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

$$\text{จะได้} \quad 26.09749127 = \frac{B \times 3 \times 2.28 \times 54}{241.66}$$

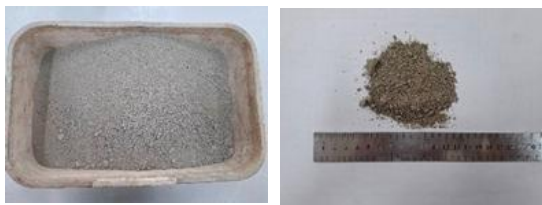
$$\text{ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ} \quad B = \frac{29.09749127 \times 241.66}{3 \times 2.28 \times 54} = 20$$

3.3.2 แนวทางการอภิปรายผลการทดลอง

หลังจากการบ่ม 7 วัน และ 14 วันการทดสอบก็จะดำเนินการทันที สำหรับการทดสอบทั้งหมดที่ดำเนินการนั้นการศึกษาค่าเฉลี่ยของการทดสอบมีการรายงานผลลัพธ์จากตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดเป็นไปตามขั้นรูปโดยใช้เครื่องมือทดสอบโนมิตี ความจุ 5 kN มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีความเร็วในการทดสอบแต่ละครั้งและให้ความเร็วในการทดสอบตัวแปรเต็มที่ 0.2 ถึง 51 mm/min

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

นำดินเหนียวอ่อนเข้าเตาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินตะกอนที่อบเสร็จแล้วมาทุบด้วยค้อนให้ละเอียด แล้วนำมาร้อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4



รูปที่ 3 ดินเหนียวร้อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4

3.3.4 การเตรียมเส้นใยผักตบชวา

จากวิธีเชิงประจักษ์พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแยกเส้นใยผักตบชวาที่เหมาะสมคือการใช้สารละลาย NaOH 1.40g/L ในอัตราส่วนเส้นใยต่อน้ำ 1:20 MLR ที่ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้

ต้มน้ำปริมาณ 20 ลิตรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผสมกับโซดาไฟ 1.40 กิโลกรัม แล้วนำเส้นใยผักตบชวา ปริมาณ 1 กิโลกรัมผสมลงในถังคนเปลือกข้าวโพดย่อยตัว พัก 30 นาที แล้วนำที่ต้มเสร็จมาล้างน้ำผ่านกระชอนกรองสะอาด นำเส้นใยเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้นออก



รูปที่ 4 ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อนอบและหลังอบ

3.2.5 การผสมตัวอย่าง

1. นำดินเหนียวอ่อนที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และทำการเตรียมส่วนผสมโดยการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 10% เส้นใยที่มีปริมาณเส้นใยผักตบชวา 0 12.5 2.5 กรัม ดังตารางที่ 2 ดำเนินงานผสมโดยทำการผสมดินและ ปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน

2. เติมน้ำและ ผสมดิน-ซีเมนต์-น้ำ ให้เข้ากัน จากนั้นจึงผสมเส้นใยผักตบชวาที่เตรียมไว้โดยกระจายเส้นใยผักตบชวาให้ทั่วถึงไม่จับกลุ่มเป็นก้อน



รูปที่ 5 ส่วนผสมดินซีเมนต์และเส้นใยผักตบที่ปรับปรุงคุณภาพ

3. นำส่วนผสมไปบดอัดในโมลต์ ขนาด 5 เซนติเมตร x 11 เซนติเมตร แบ่งเป็น 3 ชั้นบดอัดครั้งละ 20 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4

4. ทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมงและนำตัวอย่างออกจากโมลต์ทำการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อบ่มตัวอย่างไม่ให้สูญเสียความชื้น เป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน



รูปที่ 6 การบดอัดตัวอย่างใส่โมลต์

3.3 ทำการทดสอบ

3.3.1. การทดสอบกำลังรับแรงอัด Unconfined Compression

1. หลังจากอายุบ่มครบแล้วทำการแกะแบริ่งที่พันรอบตัวอย่างและทำการวัดขนาด ความกว้าง ความยาว และความลึก วัดบริเวณ หัว กลาง ห้าย นำค่ามาเฉลี่ย เพื่อใช้ในการคำนวณและนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ

2. จากนั้นทำการจัดเตรียมเครื่องทดสอบ Unconfined Compression 5 kN และติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่ตัวเครื่อง และติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวในแนวตั้ง(Dial Gauge) ให้ตรงเลขศูนย์ก่อนเริ่มการทดสอบ

3. ทำการทดสอบโดยอาศัยการควบคุมการทรุดตัว (Strain Control) และวัดผลของแรงที่เกิดขึ้นของ Proving Ring กำหนดความเร็วอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที จะทดสอบจนกว่าตัวอย่างจะบด



4. หลังจากการวิปิน้ำตัวอย่างที่วิบัติแล้วมาทำการทุบ และเตรียม
กระป๋อง 3 กระป๋องซึ่งนำหนักกระป๋องเปล่า นำตัวอย่างที่ทดสอบมาใส่กระป๋องซึ่ง
และนำตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างเข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาหา water
content (W%) ในตัวอย่าง



รูปที่ 7 การติดตั้งตัวอย่างกับเครื่อง และหลังการฉีกตัว

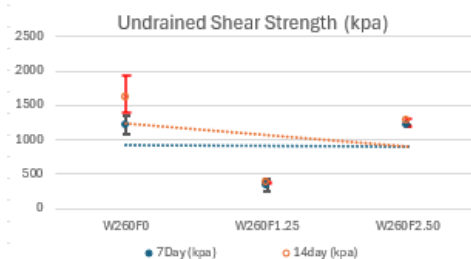
4. ผลการทดสอบและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การทดสอบ

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shear Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จากรูปที่ 8 ค่า
ความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย 7 วัน (7Day (kPa)) W260F0: ค่าความต้านทาน
แรงเฉือนอยู่ที่ประมาณ 1,200 kPa โดยมีค่าความเบี่ยงเบน (error bar) ค่อนข้าง
แคบ W260F1.25: ค่าความต้านทานแรงเฉือนลดลงอย่างมีนัยสำคัญไปอยู่ที่
ประมาณ 350 kPa W260F2.50: ค่าความต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก
W260F1.25 ไปอยู่ที่ประมาณ 1,200 kPa หรือใกล้เคียงกับ W260F0

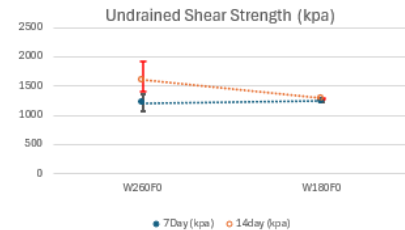
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 14 วัน ค่าความ
ต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย 14 วัน (14Day (kPa)) W260F0: ค่าความต้านทานแรง
เฉือนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากค่า 7 วัน ไปอยู่ที่ประมาณ 1,600 kPa หรือสูงกว่า
โดยมีค่าความเบี่ยงเบนค่อนข้างมาก (แสดงด้วย error bar ที่ยาว) ซึ่งบ่งชี้ถึงความ
แปรปรวนของข้อมูลในกลุ่มตัวอย่าง W260F1.25: ค่าความต้านทานแรงเฉือน
เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่า 7 วัน ไปอยู่ที่ประมาณ 400 kPa W260F2.50: ค่าความ
ต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่า 7 วัน ไปอยู่ที่ประมาณ 1,250 kPa หรือ
สูงกว่า โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่า 7 วัน และค่า 14 วันของ W260F2.50 มีความ
ใกล้เคียงกับค่า 7 วันของ W260F0



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จากรูปที่ 9
W180F0 มีการพัฒนาความแข็งแรงเริ่มต้นที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ
W260F0 ในสัปดาห์แรกของบ่ม (ซึ่งแตกต่างกันระหว่าง 260 และ 180) ยังไม่
ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความแข็งแรง

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 14 วัน W260F0 มี
ความแข็งแรงที่อายุการบ่ม 14 วัน สูงกว่า W180F0 อย่างเห็นได้ชัด W180F0
แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการพัฒนาความแข็งแรง (Curing Reaction) ส่วนใหญ่
สิ้นสุดลงหรือชะลอตัวอย่างรุนแรง ตั้งแต่วันที่ 7 จึงไม่มีการเพิ่มความแข็งแรง

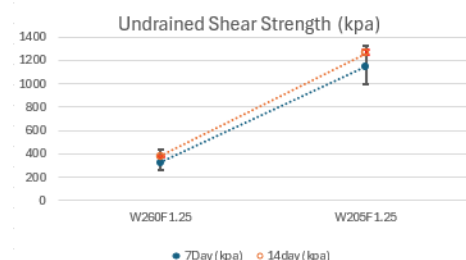


เพิ่มเติมในสัปดาห์ที่สอง W260F0 แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาความแข็งแรงยังคง
ดำเนินต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จากรูป 10
W205F1.25 แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความแข็งแรงเริ่มต้น (Early Strength) ที่
เหนือกว่า W260F1.25 อย่างมีนัยสำคัญ (สูงกว่าประมาณ 3.5 เท่า) ความแตกต่าง
นี้เน้นย้ำว่าปัจจัยน้ำส่งผลให้ค่า (การลดค่าจาก 260 เป็น 205) มีผลกระทบอย่าง
รุนแรงต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ 7 วัน แม้ว่าปริมาณสารเติมแต่งไฟเบอร์จะ
เท่ากัน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 14 วัน เมื่อระยะเวลา
บ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน ค่าความต้านทานแรงเฉือนยังคงแสดงความแตกต่างกัน
อย่างชัดเจนแต่ทั้งสองกลุ่มตัวอย่างแสดงการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรง
W260F1.25: ค่า Su เพิ่มขึ้นจาก 320 kPa ไปอยู่ที่ประมาณ 380 kPa อัตราการ
เพิ่มขึ้น: ประมาณ 60 kPa การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในสัปดาห์ที่สองอยู่ใน
อัตราที่ ต่ำ W205F1.25: ค่า Su เพิ่มขึ้นจาก 1,150 kPa ไปอยู่ที่ประมาณ 1,280
kPa อัตราการเพิ่มขึ้น: ประมาณ 130 kPa การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงใน
สัปดาห์ที่สองอยู่ในอัตราที่ สูงกว่า W260F1.25



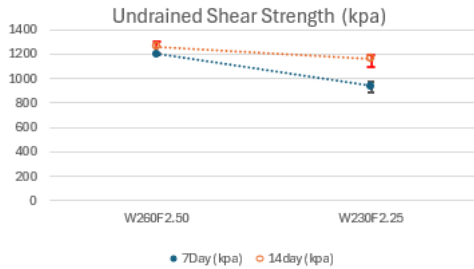
รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

จากรูป 11 W260F2.50: มีค่าเฉลี่ย Su อยู่ที่ประมาณ 1,200 kPa
W230F2.50: มีค่าเฉลี่ย Su ลดลงไปที่ประมาณ 950 kPa ตัวอย่าง W260F2.50
มีการพัฒนาความแข็งแรงเริ่มต้นที่ สูงกว่า W230F2.50 อย่างชัดเจน (ประมาณ
250 kPa) การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ (ลดปริมาณน้ำจาก 260 เป็น 230) ส่งผล
ให้ความแข็งแรงเริ่มต้นลดลง

เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน ความแตกต่างของค่า Su
ยังคงอยู่ และยังคงแสดงให้เห็นถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรง (Strength
Gain) ที่แตกต่างกัน W260F2.50: ค่า Su เพิ่มขึ้นจาก 1,200 kPa ไปอยู่ที่ประมาณ
1,280 kPa อัตราการเพิ่มขึ้น (7D → 14D): ประมาณ 80 kPa แสดงการพัฒนา



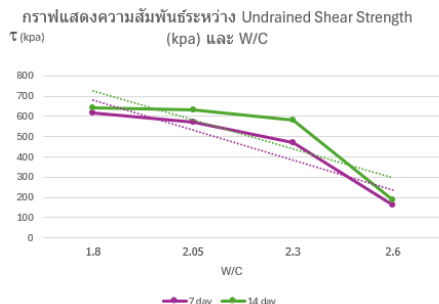
ความแข็งแรงอย่างต่อเนื่องในสัปดาห์ที่สอง W230F2.25: ค่า Su เพิ่มขึ้นจาก 950 kPa ไปอยู่ที่ประมาณ 1,150 kPa อัตราการเพิ่มขึ้น (7D → 14D): ประมาณ 200 kPa แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงที่สูงกว่า W260F2.50 อย่างมีนัยสำคัญในสัปดาห์ที่สอง



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลากการบ่ม 7 วัน จากรูป 12 ค่าความต้านทานแรงเฉือนที่ระยะเวลากการบ่ม 7 วัน แสดงแนวโน้มการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ W/C เพิ่มขึ้น W/C = 1.8 ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 630 kPa W/C = 2.05: ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 600 kPa (ลดลงเล็กน้อย) W/C = 2.3: ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 500 kPa (ลดลงชัดเจน) W/C = 2.6: ค่า Su ลดลงอย่างรวดเร็วไปอยู่ที่ประมาณ 180 kPa ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดในทุกช่วงเวลาและทุกอัตราส่วน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระยะเวลากการบ่ม 14 วัน ค่าความต้านทานแรงเฉือนระยะเวลากการบ่ม 14 วัน แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับ 7 วัน แต่มีค่าโดยรวมสูงกว่า W/C = 1.8: ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 650 kPa W/C = 2.05: ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 640 kPa (แทบไม่เปลี่ยนแปลง) W/C = 2.3: ค่า Su อยู่ที่ประมาณ 580 kPa (เริ่มลดลง) W/C = 2.6: ค่า Su ลดลงอย่างรวดเร็วไปอยู่ที่ประมาณ 200 kPa ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด ณ 14 วัน

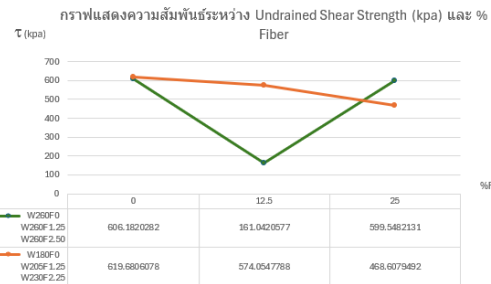


รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนระยะการบ่ม 7 และ 14 วัน

จากรูป 13 W180 (เส้นสีส้ม) ค่าเริ่มต้น (0% Fiber) มีค่าใกล้เคียงกับกลุ่ม W260 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยค่าความต้านทานแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น การลดลงของความแข็งแรงไม่ได้รุนแรงเหมือนในกลุ่ม W260 โดยปริมาณเส้นใย 12.5% ยังคงรักษาความแข็งแรงไว้ได้ในระดับสูง ซึ่งบ่งชี้ว่าสูตรผสม W180 มีความทนทานต่อผลกระทบเชิงลบของเส้นใยในปริมาณน้อยได้ดีกว่า

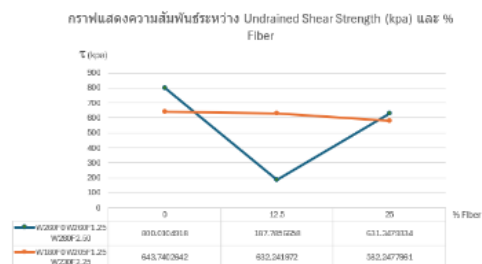
W260 (เส้นสีเขียวเข้ม) ปริมาณเส้นใย 12.5% ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเฉือน ลดลงต่ำที่สุด อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณนี้อาจรบกวนปฏิกิริยาการบ่มหรือการจัดเรียงตัวของวัสดุในสูตรผสม W260 ปริมาณเส้นใย 25% สามารถฟื้นฟู ความแข็งแรงให้กลับสู่ระดับเริ่มต้นที่ไม่มีเส้นใย (0%) ได้

อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของการใช้ปริมาณเส้นใยที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในสูตรผสมนี้



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนกับปริมาณไฟเบอร์

จากรูป 14 W260 ค่าสูงสุดเริ่มต้น: ที่ 0% Fiber (W260F0) ค่าความต้านทานแรงเฉือนเริ่มต้นที่สูงที่สุดในกราฟทั้งหมด (≈ 800 kPa) การลดลงอย่างรุนแรง: เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 12.5% (W260F1.25) ค่า τ ลดลงไปสู่ระดับต่ำที่สุด (≈ 188 kPa) ซึ่งแสดงถึงการรบกวนปฏิกิริยาการบ่มหรือคุณสมบัติทางกลของวัสดุอย่างรุนแรง การฟื้นตัว: เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มเป็น 25% (W260F2.50) ค่า τ ฟื้นตัวกลับมาสู่ระดับสูง (≈ 631 kPa) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น W180 ค่าเริ่มต้นที่ 0% Fiber (W180F0) ค่าความต้านทานแรงเฉือนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า กลุ่ม W260 เล็กน้อย (≈ 644 kPa) ความเสถียรที่ 12.5%: เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 12.5% (W205F1.25) ค่า τ แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง (≈ 632 kPa) ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับกลุ่ม W260 การลดลงอย่างต่อเนื่อง: เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น

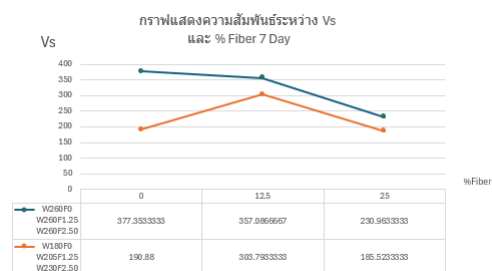


25% (W230F2.50) ค่า τ ลดลง

รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์การรับแรงเฉือนกับปริมาณไฟเบอร์

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity)

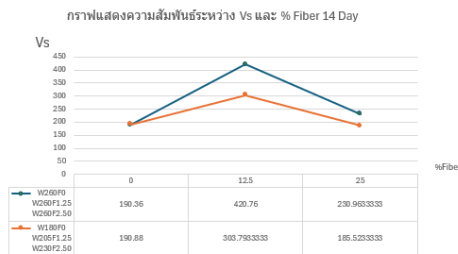
ค่าความเร็วแรงเฉือนที่ระยะเวลากการบ่ม 7 วัน จากรูปที่ 15 W260F (เส้นสีน้ำเงินเข้ม) ที่ 0% Fiber ค่า Vs เริ่มต้น สูงสุด ที่ 377.35m/s ที่ 12.5% Fiber ค่า Vs ลดลงเล็กน้อยเป็น 357.0m/s ที่ 25% Fiber ค่า Vs ลดลงเป็น 230.96m/s



รูปที่ 15 กราฟค่าความเร็วคลื่นที่ระยะเวลากการบ่ม 7 วัน



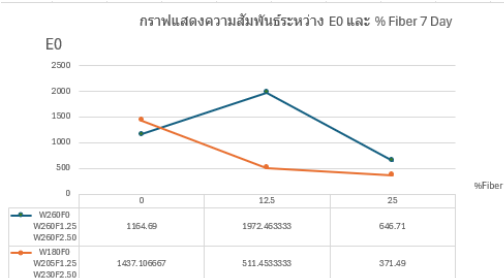
ค่าความเร็วแรงเฉือนที่ระยะการบ่ม 14 วัน W260F (เส้นสีน้ำเงินเข้ม) ที่ 0% Fiber (W260F0) ค่า Vs เริ่มต้นอยู่ที่ 190.36m/s ที่ 12.5% Fiber (W260F1.25) ค่า Vs เพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นค่าสูงสุดของกราฟที่ 420.76m/s นี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใย 12.5% มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเสริมความแข็งแรง/ความหนาแน่นของตัวอย่าง W260F ที่ 14 วันที่ 25% Fiber (W260F2.50) ค่า Vs ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็น 230.96m/s แม้จะลดลงมาจากจุดสูงสุด



รูปที่ 16 กราฟค่าความเร็วแรงเฉือนที่ระยะเวลา 14 วัน

4.1.3 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus)

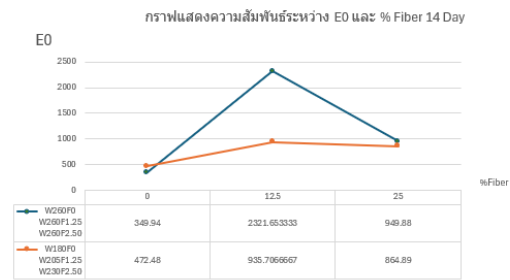
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จากรูปที่ 17 W260F (เส้นสีน้ำเงินเข้ม) ที่ 0% Fiber (W260F0): ค่า E0 เริ่มต้นอยู่ที่ 1164.69 ที่ 12.5% Fiber (W260F1.25): ค่า E0 เพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นค่าสูงสุดของกราฟที่ 1972.46. นี้แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใย 12.5% ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุในชุด W260F ได้อย่างมีนัยสำคัญที่ 25% Fiber (W260F2.50): ค่า E0 ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็น 646.71. ค่านี้ต่ำกว่าค่าเริ่มต้นที่ 0% Fiber อย่างชัดเจน (646.71 vs 1164.69) W180F (เส้นสีส้ม) ที่ 0% Fiber (W180F0) ค่า E0 เริ่มต้นอยู่ที่ 1437.11. ค่านี้สูงกว่าค่าเริ่มต้นของชุด W260F เล็กน้อยที่ 12.5% Fiber (W205F1.25) ค่า E0 ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็น 511.45 ที่ 25% Fiber (W230F2.50): ค่า E0 ลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นค่าต่ำสุดของกราฟที่ 371.49.



รูปที่ 17 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะเวลา 7 วัน

โมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะการบ่ม 14 วัน จากรูปที่ 18 W260F (เส้นสีน้ำเงินเข้ม) ที่ 0% Fiber (W260F0): ค่า E0 เริ่มต้นค่อนข้างต่ำที่ 349.94 ที่ 12.5% Fiber (W260F1.25): ค่า E0 เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล เป็นค่าสูงสุดของกราฟที่ 2321.65 นี้คือการเพิ่มขึ้นที่โดดเด่นที่สุดในข้อมูลทั้งหมด และแสดงให้เห็นว่าเส้นใย 12.5% มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มความแข็งแรงของตัวอย่าง W260F หลัง 14 วันที่ 25% Fiber (W260F2.50): ค่า E0 ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็น 949.88. ถึงแม้จะลดลงจากจุดสูงสุด แต่ค่านี้ยัง สูงกว่าค่าเริ่มต้นที่ 0% Fiber มากกว่าสองเท่า (949.88 vs 349.94) W180F (เส้นสีส้ม) ที่ 0% Fiber (W180F0): ค่า E0 เริ่มต้นอยู่ที่ 472.48. ค่านี้สูงกว่าค่าเริ่มต้นของชุด W260F เล็กน้อย ที่ 12.5% Fiber (W205F1.25): ค่า E0 เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เป็นค่าสูงสุดของชุดนี้ที่ 935.71

ที่ 25% Fiber (W230F2.50): ค่า E0 ลดลงเล็กน้อย เป็น 864.89. ค่านี้ยังคง สูงกว่าค่าเริ่มต้นที่ 0% Fiber อย่างชัดเจน



รูปที่ 18 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะเวลา 14 วัน

4.1.5 ดัชนีความเหนียว (Toughness Index, TI)

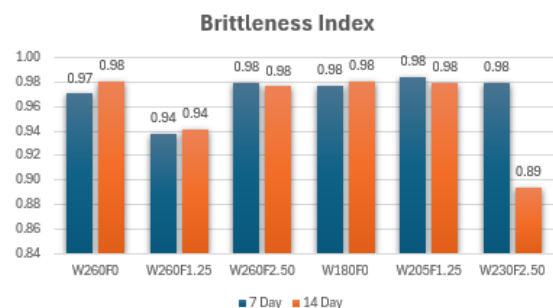
$$TI_{FT} = \frac{E_{CTSF}(FT)}{2q(CTSF)}$$

เมื่อ TI_{FT} คือ ดัชนีความเหนียว (Toughness Index)
 $E_{CTSF}(FT)$ คือ ค่าแรงจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด
 $q(CTSF)$ คือ ค่ากำลังรับแรงสูงสุดในแต่ละการทดลอง

จากรูปที่ 19 การทดสอบแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณไฟเบอร์ 0% มีช่วงค่าดัชนีความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.38 - 0.43 รองลงมาคือ อัตราปริมาณไฟเบอร์ 1.25% อยู่ในช่วง 0.32 - 0.41 และปริมาณไฟเบอร์ 2.5% มีช่วงค่าดัชนีความเหนียวที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.42 - 0.24 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของดัชนีความเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเพิ่มปริมาณไฟเบอร์

การทดสอบแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 14 วัน อัตราปริมาณไฟเบอร์ 0% มีช่วงการค่าดัชนีความเหนียวที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.36 - 0.46 รองลงมาคือ อัตราปริมาณไฟเบอร์ 1.25% อยู่ในช่วง 0.40 - 0.45 และปริมาณไฟเบอร์ 2.5% มีช่วงค่าดัชนีความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.46 - 0.41

จากการวิเคราะห์พบว่ากราฟการค่าดัชนีความเหนียว(TI) กราฟความเหนียว (TI) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ในช่วงระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ค่าจะมีค่าแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ ส่วนในระยะการบ่ม 14 วัน ค่ามีแนวโน้มไม่แน่นอน ซึ่งเกิดจากไฟเบอร์ดูดน้ำไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 19 กราฟการพัฒนาความเหนียว



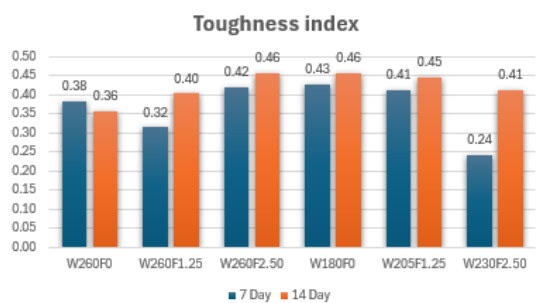
4.1.6 ค่าความเปราะ (Brittleness Index, BI)

$$BI_{FS} = \frac{q_{f,\delta=2mm}}{q_f}$$

เมื่อ BI_{FS} คือ ดัชนีความเปราะของวัสดุ (Brittleness Index)
 q_f คือ กำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุที่วัดได้จากการทดสอบ (Peak Strength)
 $q_{f,\delta=2mm}$ คือ กำลังรับแรงของวัสดุเมื่อมีการเสียรูป (deformation) เท่ากับ 2 มม

จากรูปที่ 20 การทดสอบแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณไฟเบอร์ 1.25% มีช่วงค่าความเปราะที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.94 รองลงมาคืออัตราปริมาณไฟเบอร์ 0% อยู่ในช่วง 0.97 และปริมาณไฟเบอร์ 2.5% มีช่วงค่าความเปราะที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.98 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของความเปราะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเพิ่มปริมาณไฟเบอร์

การทดสอบแรงเฉือนระยะเวลาการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณไฟเบอร์ 0% มีช่วงค่าความเปราะที่สูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.98 รองลงมาคืออัตราปริมาณไฟเบอร์ 1.25% อยู่ในช่วง 0.94 และปริมาณไฟเบอร์ 2.5% มีช่วงค่าความเปราะที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.89 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากลดลง



รูปที่ 20 กราฟค่าความเปราะ

5. สรุป

กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงเฉือนแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยค่าจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม (7 วันไป 14 วัน) ผลของไฟเบอร์ปริมาณเส้นใยผกตบชาที่ 1.25% มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงต่ำที่สุด ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 2.5% ช่วยฟื้นฟูความแข็งแรงให้กลับสู่ระดับเริ่มต้นที่ไม่มีเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วคลื่นเฉือนค่า Vs (และความแข็งแรงของดิน) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยความเปราะการใช้เส้นใยส่งผลให้ค่าดัชนีความเปราะ (Brittleness Index, BI) ลดลง ซึ่งหมายความว่าวัสดุมีพฤติกรรมที่เหนียวขึ้นเส้นใยผกตบชาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในดินซีเมนต์ได้ และสามารถช่วยลดปริมาณผกตบชาในแหล่งน้ำได้ อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม (เช่น 2.5% ในงานวิจัยนี้) เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงที่ต้องการ

กิตติประกาศ

ผู้เขียนกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนศ ทองเดชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยช่วยเหลือชี้แนะให้คำแนะนำตลอดจนถึงการแก้ไขข้อบกพร่องในการศึกษา การดำเนินงานการปฏิบัติการทดสอบรวมทั้งการให้คำที่ปรึกษาในการจัดการทำการการศึกษา ด้วยความเอาใจใส่ และสนับสนุนทุกด้านอย่างเสมอตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการปฏิบัติการทดสอบและการเขียนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์สำเร็จได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ในการสนับสนุนทุนทรัพยากรการศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์และให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบ สถานที่ และวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ของทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณค่าและคุณประโยชน์จากการศึกษาระดับนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ถ้าหากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือบกพร่องประการใดผู้เขียนขอน้อมรับไว้ และหวังอย่างยิ่งว่าการศึกษางานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] นพรัตน์ ฤทธิ์กระจาย ผลของเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไฟเบอร์ซีเมนต์ นพรัตน์ ฤทธิ์กระจาย
- [2] ธราดล ดวงแก้ว (2567) พฤติกรรมแรงดัดดินตะกอนผสมซีเมนต์และผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด
- [3] มาตรฐานกรมทางหลวงชั้นรองพื้นทาง ปี 2532
- [4] นายอดุลย์ วงศ์สุจริต ปี 2559 การพัฒนาแผ่นพื้นคอนกรีตทางเท้าผสมเส้นใยผกตบชา
- [5] มทข. 244 – 2567 งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)
- [6] ณัฐวุฒิ อินทบุตร 2561 คุณสมบัติทางกลและการนำความร้อนสำหรับ การพัฒนาอิฐบล็อกประสานจากดินตะกอนประปาและผกตบชา
- [7] นาย สุธรรม โจนเมฆา ปี 2541 การใช้แผ่นใยสังเคราะห์ช่วยเสริมกำลังรับแรงในการก่อสร้างถนนชั้นดินเหนียวอ่อน



การประเมินพฤติกรรมทางธรณีวิศวกรรมและการศึกษาสมบัติเชิงกลในชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัว: กรณีศึกษาอุโมงค์พะเยา ฝั่งด้านเหนือ Geotechnical Ground Behavior Assessment and Mechanical Properties Study of Un-Consolidated Sediments: A Case Study of Phayao Tunnel (North Portal)

จารุวิทย์ ปู่เมือง¹ ณัฐธิดา บุญมา² ณัฐธิดา บุ่งจันทร์³ เอกรัช มาช่วย^{4*}

นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102925@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นประเมินพฤติกรรมทางธรณีวิศวกรรมและศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัวในบริเวณอุโมงค์แม่กา ฝั่งด้านเหนือ จังหวัดพะเยา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการรถไฟเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ภายใต้การดำเนินงานของการรถไฟแห่งประเทศไทย การสำรวจและประเมินธรณีเบื้องต้นชี้ให้เห็นความซับซ้อนของสภาพธรณีวิทยาในพื้นที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อดำเนินการก่อสร้างจริง พบว่าสภาพดินและหินมีลักษณะที่เอื้ออำนวยต่อการก่อสร้างมากกว่าที่คาดการณ์ไว้ การทดสอบและการศึกษานี้ครอบคลุมหลายด้าน ได้แก่ การจำแนกประเภทและคุณลักษณะของดิน การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและเชิงกล การวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือน การวิเคราะห์พฤติกรรมมวลดิน รวมถึงการศึกษาผลกระทบจากการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของผนังอุโมงค์ในชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัว ผลการศึกษาให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าสำหรับการปรับปรุงและแก้ไขแผนการก่อสร้างให้สอดคล้องกับสภาพภูมิธรณีที่แท้จริง การวิจัยนี้เน้นย้ำถึงความจำเป็นและความสำคัญของการวางแผนการก่อสร้างแบบมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาที่มีความซับซ้อน ผลงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลอ้างอิงที่สำคัญสำหรับการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟในพื้นที่การสะสมของชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัวของประเทศไทยในอนาคต

คำสำคัญ: ชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัว, พฤติกรรมมวลหิน, การก่อสร้างอุโมงค์, วิศวกรรมทางรถไฟ

Abstract

This study focuses on geotechnical behavior assessment and properties of unconsolidated sediments of the Mae Kha

Tunnel (north portal), Phayao province, which forms part of the Den Chai-Chiang Rai-Chiang Khong railway project under the State Railway of Thailand's operation. Initial geological investigation and assessments indicated complex geological conditions in the area. However, during actual construction, the soil and rock conditions were found to be more favorable for construction than initially anticipated. The testing and investigation encompass multiple aspects, including soil classification and characterization, particle size distribution analysis, basic physical and mechanical property testing, shear strength ratio analysis, ground behavior analysis and convergence monitoring of tunnel walls in unconsolidated sediments. The study results provide valuable insights for improving and modifying construction plans to align with actual geological conditions. This research emphasizes the necessity and importance of flexible and adaptable construction planning in complex geological environments. The research findings will serve as crucial reference data for future railway infrastructure development projects in unconsolidated sedimentary formations throughout Thailand.

Keywords: Unconsolidated sediments, Ground behavior, Tunnel construction, Railway engineering

1. บทนำ

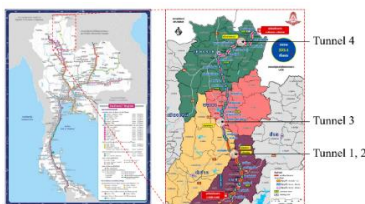
การพัฒนาระบบการขนส่งทางรถไฟในประเทศไทยถือเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและเชื่อมโยงภูมิภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่ง



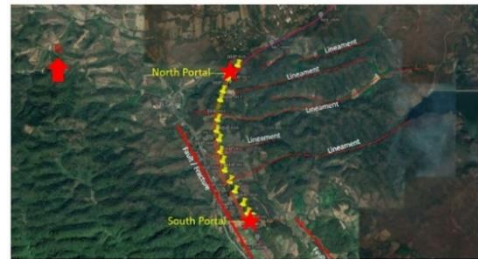
โครงการรถไฟเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ตามรูปที่ 1 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแผนแม่บทการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งของภาคเหนือ โครงการนี้มีระยะทางประมาณ 323 กิโลเมตร โดยเชื่อมต่อจังหวัดแพร่ ลำปาง พะเยา และเชียงราย เข้าด้วยกัน ทำให้เกิดการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนอย่างก้าวกระโดด ลักษณะภูมิประเทศของภาคเหนือที่เป็นพื้นที่ภูเขาและความซับซ้อนทางธรณีวิทยา ทำให้การก่อสร้างโครงการรถไฟในพื้นที่นี้ต้องเผชิญกับความท้าทายทางด้านวิศวกรรม [1],[2] โดยเฉพาะการก่อสร้างอุโมงค์ผ่านภูเขาและพื้นที่ที่มีชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัว การศึกษาและทำความเข้าใจพฤติกรรมทางธรณีวิศวกรรมของชั้นดินและหินในพื้นที่จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการ อุโมงค์พะเยาฝั่งด้านเหนือ เป็นหนึ่งในโครงสร้างสำคัญของเส้นทางรถไฟสายนี้ ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสภาพธรณีวิทยาที่น่าสนใจ โดยพบชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัวที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมของชั้นตะกอนเหล่านี้จะช่วยให้การออกแบบและการก่อสร้างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัย

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การก่อสร้างอุโมงค์พะเยา ตามรูปที่ 2 จังหวัดลำปางและจังหวัดพะเยามีการดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์จากสองฝั่ง คือ ฝั่งเหนือในพื้นที่ ต.แม่กา อ.เมือง จ.พะเยา และฝั่งใต้ในพื้นที่ ต.บ้านร้อง อ.งาว จ.ลำปาง ชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัวมีความซับซ้อนทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากชั้นตะกอนประเภทนี้มีคุณสมบัติที่อยู่ระหว่างดินอ่อนและหินแข็ง ทำให้การคาดการณ์พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างมีความไม่แน่นอนสูง ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางธรณีวิศวกรรมของชั้นตะกอนกึ่งแข็งตัวในบริบทของการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยยังมีจำกัด ส่งผลให้การออกแบบและการก่อสร้างอาจไม่เพียงพอกับสภาพธรณีวิทยาจริงในพื้นที่ งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการเพิ่มพูนองค์ความรู้ทางด้านธรณีวิศวกรรมเฉพาะสำหรับประเทศไทย โดยผลการศึกษาจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการก่อสร้างอุโมงค์และโครงสร้างใต้ดินอื่นๆ ช่วยลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัย เพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ และลดต้นทุนการก่อสร้างในระยะยาว นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนาโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ในพื้นที่ภูเขาของประเทศไทย โดยเฉพาะโครงการรถไฟสายอื่นๆ ที่กำลังอยู่ในขั้นตอนการวางแผนและการออกแบบ



รูปที่ 1 แผนที่ระยะทางก่อสร้างทางรถไฟทางคู่ สายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ



รูปที่ 2 แผนที่การขุดอุโมงค์รถไฟพะเยา

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เปรียบเทียบสภาพธรณีวิทยาที่พบในระหว่างการก่อสร้างกับผลการสำรวจธรณีเบื้องต้น
2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของดินบริเวณอุโมงค์พะเยา ฝั่งเหนือ
3. ประเมินความแข็งแรงและเสถียรภาพของมวลดินในบริเวณอุโมงค์ ฝั่งเหนือ เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ และระยะเวลาดำเนินงานก่อสร้าง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

พื้นที่หลัก: อุโมงค์พะเยา ฝั่งด้านเหนือ ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา

ระยะทางการศึกษา:

STA 665+979.235 to 664+629.235, 1350 เมตร ฝั่ง Down track,
STA 666+001.52 to 664+650.520, 1351 เมตร ฝั่ง Up track
รวมระยะทาง 2 อุโมงค์ คือ 2701 เมตร

ระยะเวลาการศึกษา: 10 เดือน ตั้งแต่ เดือนตุลาคม พ.ศ.2567 ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2568

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 Atterberg 's Limits หรือ การทดสอบขีดแอตเตอร์เบอร์ก

ในการทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM Designation: D 4318-93, D 427-93 โดยอ้างอิงมาจาก หนังสือมาตรฐาน ASTM ประจำปี พ.ศ. 2538 พิลาดเลเพีย ลิชลิทธี สมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบและวัสดุ, Bardet J.P. กลศาสตร์ดินเชิงทดลอง พ.ศ. 2540, Lui C. Evett J.B. การทดสอบคุณสมบัติของดิน การวัด และการประเมิน พ.ศ. 2540, Mitchell J.K. พื้นฐานพฤติกรรมของดิน พ.ศ. 2519

จุดเปลี่ยนสถานะภาพ หรือ ลิมิตของมวลดิน ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ A. Atterberg ภายหลังจากนำมาใช้



ประโยชน์ทางด้านประวัติศาสตร์เพียงสามมิติสุดท้ายเท่านั้น Liquid Limit (WL หรือ L.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous Fluid) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานะพลาสติก (Plastic State), Plastic Limit (Wp หรือ P.L.) คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Semi-solid state), Shrinkage Limit (Wsk หรือ S.L.) คือ ความชื้น ณ จุดที่ดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไป ฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดิน และทำให้เกิดสภาวะไม่อุ้มตัวเกิดขึ้น จนกระทั่งไม่มีความชื้นอยู่เลย

2.1.2 การจำแนกประเภทและคุณลักษณะของดิน soil classification and characterization

Unified Soil Classification System พัฒนาจากระบบการจำแนกสนามบิน Airfield Classification System ที่ A. Casagrande สร้างขึ้นในช่วงต้นทศวรรษ 1940 หน่วยงานรัฐบาลสหรัฐอเมริกาหลายแห่งได้นำระบบที่ปรับปรุงแล้วมาใช้ในปี 1952 และเรียกว่า "ระบบการจำแนกประเภทดินแบบรวม"

ทฤษฎีการจำแนกประเภทและคุณลักษณะของดินอาศัยหลักการที่ว่า คุณสมบัติของดินขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดิน และลักษณะของแร่ธาตุที่ประกอบเป็นดินการจำแนกประเภทดินใช้หลักการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดเป็นหลัก โดยแบ่งดินออกเป็น กรวด หยาบ ดินเหนียวหยาบ และดินเหนียว กรวดและหยาบมีความแข็งแรงสูงและระบายน้ำได้สูง ดินเหนียวมีความเหนียวสูงแต่ระบายน้ำได้ต่ำ

2.1.3 Specific Gravity of Soil : ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

ในการทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D 854-92 โดยอ้างอิงมาจากหนังสือมาตรฐาน ASTM ประจำปี พ.ศ. 2538 พิลาดิเลียม ลิขสิทธิ์ สมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบและวัสดุ, Bowles J.E. คุณสมบัติทางกายภาพและเทคนิคของดิน พ.ศ. 2527, Lamb T.W. การทดสอบดินสำหรับวิศวกร พ.ศ. 2494 Lui C. Evett J.B. การทดสอบคุณสมบัติของดิน การวัด และการประเมิน พ.ศ. 2540.

การหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินทำได้โดยใช้ขวดหา ถ.พ. (Pycnometer) ซึ่งมี 2 ขนาดคือ ขวดตวงปากเล็ก (Volumetric Flask) ขนาด 100 – 500 ลบ.ซม. ซึ่งเหมาะสำหรับดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่ และขวดจุกแก้วขนาด 25 -100 ลบ.ซม. สำหรับดินเม็ดละเอียด แต่วิธีการทดลองส่วนใหญ่เหมือนกันจึงขอกล่าวเฉพาะการใช้ขวดแบบแรกเท่านั้น

$$\text{จากคำนิยาม ถ.พ. ของเม็ดดิน} = \frac{\gamma_s(\text{ดิน})}{\gamma_w(\text{น้ำที่ } 4^\circ\text{C})}$$

ผลของการทดสอบหา ถ.พ. ของดินมักขึ้นอยู่กับความละเอียดพิถีพิถันของผู้ทดสอบเป็นอย่างมาก จึงใช้การพิจารณาเปรียบเทียบกับผลที่ได้

2.1.4 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน particle size distribution analysis

การศึกษานี้มีการอ้างอิงมาจากหนังสือมาตรฐาน ASTM พ.ศ.2538 พิลาดิเลียม ลิขสิทธิ์ สมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบและวัสดุ, Bardet J.P. กลศาสตร์ดินเชิงทดลอง พ.ศ. 2540, Lui C. Evett J.B. การทดสอบคุณสมบัติของดิน การวัด และการประเมิน พ.ศ. 2540

การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน (Particle Size Distribution Analysis หรือ PSD) เป็นการทดสอบพื้นฐานในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน โดยเป็นการกำหนดสัดส่วนของเม็ดดินขนาดต่างๆภายในตัวอย่างดิน มีความสำคัญต่อการคาดการณ์พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดิน เช่น ความซึมผ่านได้ ความแข็งแรง และการอัดตัว

2.1.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือน strength ratio analysis

การวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือน (Strength Ratio Analysis) เป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินความมั่นคงของวัสดุและโครงสร้างภายใต้แรงเฉือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการขุดอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งต้องเผชิญกับแรงดันดินและแรงภายนอก เช่น แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว จึงใช้หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์แรงเฉือนในชั้นดินใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb ซึ่งกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดที่ดินสามารถรับได้กับแรงดันดินและสมบัติทางกลของดินตามสมการ

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

โดยที่ τ คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน

C คือ ความยึดเหนี่ยว

σ คือ แรงดันดินที่มีผล

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

ในบริบทของอุโมงค์ใต้ดิน การวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนมักพิจารณาในรูปของอัตราส่วนระหว่างแรงดันภายในอุโมงค์ σ_i ต่อแรงยึดเหนี่ยวของดิน C หรือ $\frac{\sigma_i}{C}$ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความมั่นคงของผนังอุโมงค์และช่วยในการออกแบบแรงดันรองรับที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการลื่นไถลหรือพังทลายของชั้นดินรอบอุโมงค์ นอกจากนี้ รูปทรงหน้าตัดของอุโมงค์ ส่งผลต่อค่าขอบเขตของเสถียรภาพและอัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ การวิเคราะห์เหล่านี้ช่วยให้วิศวกรสามารถ



วางแผนและออกแบบระบบรองรับแรงดันดินได้อย่างเหมาะสม ลดความเสี่ยงจากการล้มเหลวของโครงสร้างอุโมงค์ในระหว่างและหลังการก่อสร้าง

2.1.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมมวลดิน ground behavior analysis

Karl Terzaghi (1946) เป็นผู้นำเสนอทฤษฎี Rock Load Theory และได้กำหนดความหมายของ "squeezing rock" หรือ "squeezing ground condition" เป็นสภาวะที่มวลหินที่มีรอยแตกและอ่อนแอจะเสียรูปภายใต้ความเค้นที่สูงและบีบอัดเข้าไปในอุโมงค์ ซึ่งการเกิด Squeezing Ground ในทางกายภาพจะเกิดขึ้นในอุโมงค์ลึกที่มีความเค้นสูง หินที่มีรอยแตกมาก มีความแข็งแรงต่ำ การเสียรูปเกิดขึ้นตามเวลา (time-dependent deformation) และการเกิด Squeezing Ground ในทางกลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อมวลหินถูกกระทำด้วยความเค้นเกินขีดความสามารถ (overstressed) และเมื่อ "critical strain" ของอุโมงค์ที่ไม่มีการค้ำยันถูกเกินขีดจำกัด

2.1.6 การพยากรณ์การทรุดตัวของพื้นผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ Gaussian Settlement Trough

Peck, R.B. (1969) - ผู้พัฒนาทฤษฎี Gaussian Settlement Trough อธิบายรูปแบบการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์ที่เกิดจากการขุดในดินอ่อนหรือดินแข็งกึ่งตัว การทรุดตัวจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเหนืออุโมงค์และจะลดลงแบบเส้นโค้งคล้ายกราฟการแจกแจงปกติเมื่อห่างออกไปจากกึ่งกลาง

$$\text{สมการ } S(x) = S_{max} \times e^{\frac{-x^2}{2i^2}}$$

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่ตำแหน่งใดๆ กับระยะทางจากกึ่งกลางอุโมงค์ โดย
S(x) คือการทรุดตัวที่ตำแหน่ง x จากกึ่งกลางอุโมงค์
Smax คือค่าทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นเหนืออุโมงค์
i คือค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงระยะอิทธิพลของการทรุดตัว

ค่า i มีความสัมพันธ์กับความลึกของอุโมงค์ (H) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 0.4H ถึง 0.7H สำหรับดินเหนียวอ่อน และ 0.2H ถึง 0.3H สำหรับดินทรายหรือดินแข็ง ทฤษฎีนี้ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดอุโมงค์ต่อโครงสร้างบนผิวดินและใต้ดิน รวมถึงการกำหนดมาตรการป้องกันหรือลดผลกระทบจากการทรุดตัวในพื้นที่ที่มีโครงสร้างสำคัญ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การประเมินทางธรณีวิศวกรรมและพฤติกรรมมวลหินบริเวณแนวคดโค้งสุโขทัย ในภาคเหนือของประเทศไทย กรณีศึกษาทางเข้าอุโมงค์แม่ติบของอุโมงค์งาว ภายใต้โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (สัญญาที่ 1 ช่วงเด่นชัย-งาว)

ชื่อผู้เขียน : ศุภวิชญ์ ปารมภ์ สาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา , ปี พ.ศ. 2569

การศึกษากการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิคของอุโมงค์เข้า-ออก แม่ติบ ในโครงการทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (สัญญาที่ 1 ช่วงเด่นชัย-งาว) โดยอุโมงค์มีความยาว 260.76 เมตร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุโมงค์หลักของโครงการทางรถไฟสายเหนือ เด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ตัดผ่านพื้นที่ธรณีวิทยาที่ซับซ้อนในแอ่งลำปาง-แพร่ มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินสภาพธรณีวิทยาก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ การใช้ระบบการจัดอันดับมวลหินในการประเมินสภาพธรณีวิทยา การติดตามการเคลื่อนตัวของอุโมงค์อย่างต่อเนื่อง การศึกษาสามารถวิเคราะห์เทคนิคและการปรับเปลี่ยนแผนการก่อสร้างอุโมงค์ในโครงการทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ

2.2.2 Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel

ชื่อผู้เขียน : Janaka J. Kumara, Kimitoshi Hayano และ Keita Ogiwara ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยแห่งชาติโยโกฮาม่า ประเทศญี่ปุ่น , ปี พ.ศ. 2555

การใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อหาการกระจายขนาดของกรวด พบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับวิธีร่อนตะแกรงแบบเดิม ปัจจัยหลักเกิดจากการนิยามขนาดเม็ดกรวด, ผลกระทบจากเงา, และจำนวนอนุภาคที่วิเคราะห์งานวิจัยเสนอให้ใช้พื้นที่หลังสีดำเพื่อลดผลของแสง ซึ่งทำให้วิธีนี้เหมาะสมกับการทดสอบหน้างานจริง โดยใช้อุปกรณ์เพียงกล้องและคอมพิวเตอร์

2.2.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนเพื่อประเมิน

เสถียรภาพอุโมงค์โดยวิธี Strength Reduction Method

ชื่อผู้เขียน: Z. Shi, H. Zhang และ X. Xu (ปี พ.ศ. 2562)

สาขา: วิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมธรณีเทคนิค

งานวิจัยนี้เน้นการประเมินความมั่นคงของอุโมงค์ใต้ดินในชั้นดินและหินโดยใช้วิธี Strength Reduction Method (SRM) ร่วมกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดที่ดินสามารถรับได้และแรงดันภายในดิน งานวิจัยได้คำนวณอัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนหรือปัจจัยความปลอดภัย เพื่อประเมินความมั่นคงของผนังอุโมงค์และออกแบบระบบรองรับที่เหมาะสม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า SRM ช่วยทำนายการล้มเหลวของชั้นดินได้อย่างแม่นยำ และการวิเคราะห์อัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนมีบทบาทสำคัญในการลดความเสี่ยงของการพังทลายของอุโมงค์ นอกจากนี้งานวิจัยยังเน้นการประยุกต์ใช้ผลลัพธ์ในการออกแบบระบบสนับสนุนอุโมงค์ที่มีประสิทธิภาพและประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง

2.2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมมวลดินในสภาวะ squeezing เพื่อการออกแบบระบบรองรับอุโมงค์

ชื่อผู้เขียน: Shalabi (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ประเทศสหรัฐอเมริกา),
ปี พ.ศ.2548

พื้นที่ก่อสร้างอุโมงค์ในสภาวะ squeezing ground หรือสภาวะที่มวลดินรอบอุโมงค์ได้รับแรงดันและความเค้นสูงกว่าปกติ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปและการเสียรูปสะสมของดินอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจนำไปสู่การพังทลายของโครงสร้างอุโมงค์ งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการคืบตัวของดินโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขผ่านวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEA) ร่วมกับแบบจำลอง creep สองแบบ คือ Power-law และ Hyperbolic creep models เพื่อวิเคราะห์แรงดันและการเปลี่ยนรูปของมวลดินรอบอุโมงค์ ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง Power-law สามารถทำนายพฤติกรรมดินได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่มีความล่าช้าในการติดตั้งผนังอุโมงค์ซึ่งทำให้แรงดันสะสมในดินเพิ่มสูงขึ้น งานวิจัยนี้ช่วยส่งเสริมการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบรองรับอุโมงค์ในพื้นที่ squeezing ground เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพของงานก่อสร้าง

2.2.5 การทบทวนการพยากรณ์และมาตรการแก้ไขพฤติกรรม squeezing ground ในงานอุโมงค์

ชื่อผู้เขียน: รัตัน ดาส (สาขาวิศวกรรมโยธา ประเทศอินเดีย), ปี พ.ศ.
2566

งานวิจัยนี้เป็นกรอบทบทวนงานวิจัยและโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่ squeezing ground หรือสภาวะที่ดินและหินรอบอุโมงค์เกิดการบีบอัดและเปลี่ยนรูปร่างรุนแรง ส่งผลกระทบต่อนามันคงของโครงสร้างและประสิทธิภาพการก่อสร้าง โดยเน้นการพยากรณ์ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์และแรงดันดินด้วยการวัด deformation จริง รวมถึงการประเมินและออกแบบระบบรองรับที่เหมาะสม เช่น การใช้ yielding support, flexible lining, semi-rigid segments และการขุดแบบ staged excavation เพื่อควบคุมแรงดันและลดความเสียหายของโครงสร้าง ผลการทบทวนพบว่าปัจจัยเชิงกลของดิน เช่น ความแข็งแรง มุมเสียดทานภายใน และพฤติกรรม stress path มีผลสำคัญต่อพฤติกรรม squeezing การแก้ไขปัญหาดิน squeezing จึงต้องใช้แนวทางที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง และออกแบบระบบรองรับอย่างรอบคอบเพื่อป้องกันการเสียหายของโครงสร้าง งานวิจัยนี้เป็นแนวทางสำคัญสำหรับวิศวกรในการบริหารจัดการและออกแบบงานอุโมงค์ให้ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.6 วิธีของ Bland-Altman สำหรับการเปรียบเทียบวิธีการวัด และการตอบสนองต่อข้อวิจารณ์

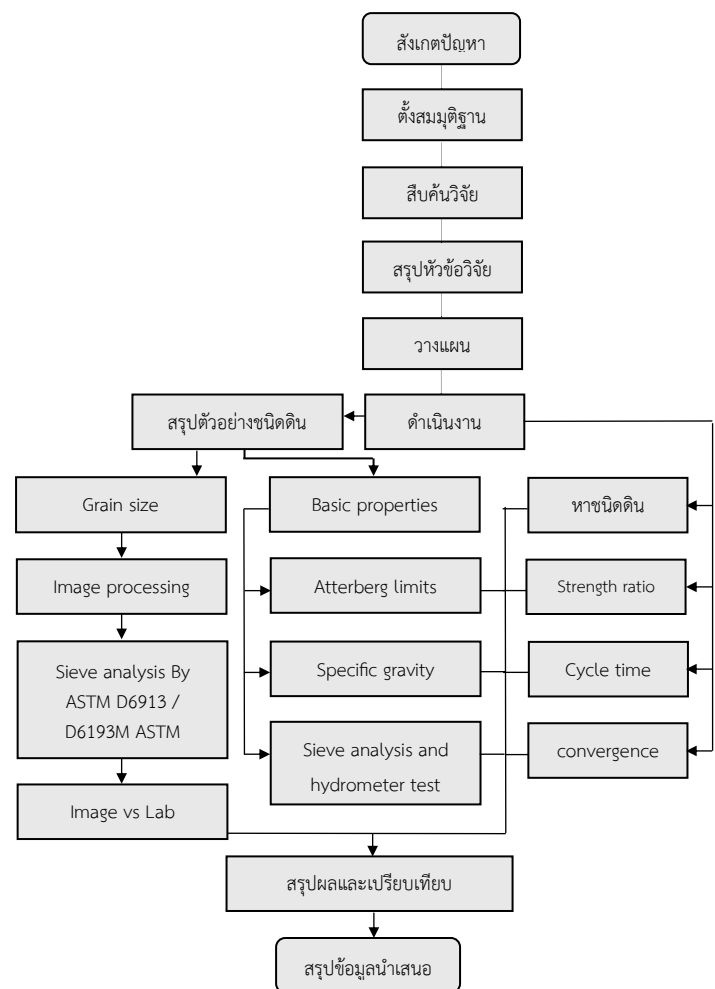
ชื่อผู้เขียน: Mohammad Ali Mansournia (ภาควิชาระบาดวิทยาและ
สถิติชีวภาพ ประเทศอิหร่าน), ปี พ.ศ.2564

การเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างเครื่องมือวัดสองชนิดนิยมใช้วิธีของ Bland-Altman ซึ่งถูกนำเสนอในปี 1983 และกลายเป็นวิธี

มาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง (Bland & Altman, 1983) ซึ่งบทความนี้ได้ตอบข้อวิจารณ์ดังกล่าวโดยยืนยันว่าวิธีของ Bland-Altman ยังคงมีความเหมาะสมและถูกต้อง หากใช้ในบริบทของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดโดยเฉพาะ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้การทดสอบดิน
อุโมงค์กะเยา-ฝ่งเหวือโดยแผนผังการดำเนินงานวิจัยเป็นดังรูป



รูปที่ 3 แผนดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

1. ตั้งสมมุติฐาน
2. เก็บรวบรวมข้อมูลและสืบค้นวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนดำเนินงาน
4. ดำเนินงานตามแผนระยะเวลา



- 4.1 หาเปอร์เซ็นต์ชนิดดินในอุโมงค์
- 4.2 หาขนาดผลของเม็ดดิน
- 4.3 ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์
- 4.4 หาอัตราส่วนกำลังรับแรงของดิน
- 4.5 หาระยะเวลาดำเนินงานที่เปลี่ยนไปของโครงการ
- 4.6 หาการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์
- 5.วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ
- 6.เปรียบเทียบผลเจาะสำรวจสภาพธรณีกับการขุดเจาะอุโมงค์จริง
- 7.สรุปงานวิจัย

4. ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์ชนิดดิน

จากผลการวิเคราะห์ชนิดดินในอุโมงค์แสดงให้เห็นว่าดิน Sandy Gravelly Clay มีสัดส่วนสูงสุด 55.20% ของฝั่งเหนือขาขึ้น (North up track) และ 57.66% ของฝั่งเหนือขาลง (North down track) ตามตารางที่ 1 ซึ่งเป็นกลุ่มดินที่มีปริมาณมากสุดในการขุดเจาะอุโมงค์ โดยดินชนิดนี้มีความยากปานกลางถึงสูงต่อการขุดเจาะเนื่องจากอนุภาคหยาบเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนและการสึกหรอเครื่องมือ แต่ส่วนดินเหนียวช่วยเสริมความเสถียรหน้าขุดทำให้ขุดเจาะได้ง่ายกว่าดินเม็ดหยาบล้วนดังนั้นจึงได้คัดเลือกดินชนิด Sandy Gravelly Clay จากฝั่งเหนือขาลงเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

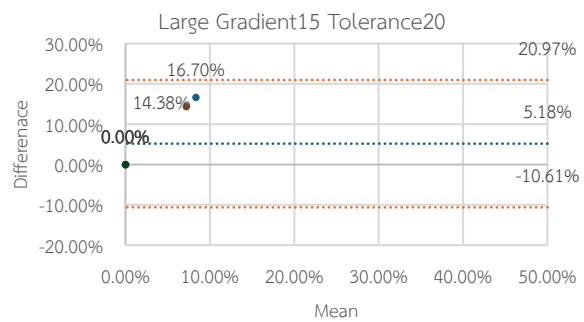
อัตราส่วนดินในอุโมงค์รางคู่		
ชนิดดิน	เส้นทางขาขึ้น	เส้นทางขาลง
Sandy gravelly clay	55.18%	57.66%
Silty clay	34.39%	36.08%
Gravelly clayey sand	7.22%	4.57%
Lean clay	0.22%	0.10%
Poorly graded sand	0.21%	0.39%
Clayey sand	0.02%	0.39%
Clayey sand gravel	2.27%	0.64%
Silty sand	0.00%	0.00%
Sandy silt	0.49%	0.16%
Gravelly sand	0.00%	0.01%

ตารางที่ 1 ตารางปริมาณชนิดดินที่พบในอุโมงค์

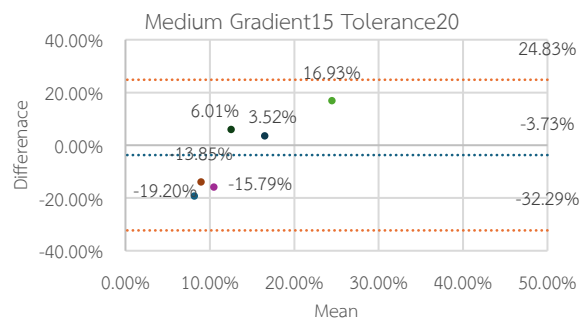
4.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลรูปถ่ายกับผลจากการทดสอบ

การศึกษาภาพถ่ายภาคสนามเทียบกับผลห้องปฏิบัติการพบว่า Large G15 T20 แสดงให้เห็นถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่ +5.18% โดยมีขอบเขตของแคบกว่า (-10.61% ถึง +20.97%) เมื่อเปรียบเทียบกับ

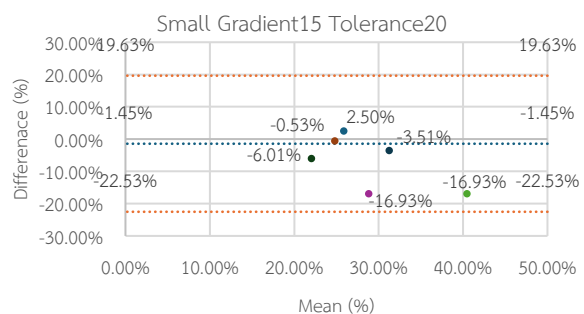
Small และ Medium แต่ความสอดคล้องของข้อมูลไม่สัมพันธ์กัน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะประเมินค่าวัดสูงเกินมาตรฐาน Medium G15 T20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ -3.73% โดยมีขอบเขต -32.29% ถึง +24.83% ซึ่งบ่งชี้ถึงความแปรปรวนที่กว้างระหว่างสองวิธี และ Small G15 T20 แม้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยน้อย (-1.45%) แต่ขอบเขตกว้าง (-22.53% ถึง +19.63%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการใหม่นี้อาจไม่สามารถใช้แทนได้อย่างสม่ำเสมอ สรุปได้ว่าไม่แม่นยำพอที่จะทดแทนวิธีมาตรฐานได้โดยตรง สาเหตุมาจากแสงเงาของรูปถ่าย



รูปที่ 4 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับรูปถ่ายที่เม็ดดินขนาดใหญ่



รูปที่ 5 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับรูปถ่ายที่เม็ดดินขนาดกลาง



รูปที่ 6 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับรูปถ่ายที่เม็ดดินขนาดเล็ก

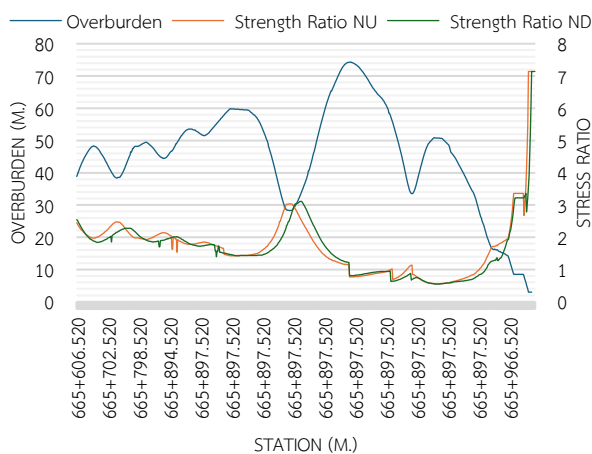


4.3 กำลังรับแรงอัดของมวลดิน (Strength Ratio)

ตามรูปที่ 7 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ของชั้นดินในแนวอุโมงค์ฝั่งเหนือ โดยใช้ตัวชี้วัดทางวิศวกรรมคือ Strength Ratio ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงของมวลดิน ต่อแรงกดทับจากน้ำหนักดินด้านบน เพื่อประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์และความเสี่ยงต่อการเกิด Squeezing Ground จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยของ Strength Ratio ในแนว อุโมงค์ขาขึ้น Up track มีค่าสูงกว่าแนว อุโมงค์ขาลง Downtrack ซึ่งบ่งชี้ว่าในบางช่วงของแนว Up track มีชั้นดินที่มีความแข็งแรงสัมพัทธ์ต่ำกว่าแนว Downtrack นอกจากนี้ ยังพบค่าที่ สูงผิดปกติ ในแนว Downtrack ช่วงท้ายอุโมงค์ โดยมีค่า Strength Ratio สูงสุดอยู่ที่ 7.14 ต่ำสุดอยู่ที่ 0.10 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.22 ซึ่งแตกต่างจากค่ากลางของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ ความผิดปกตินี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนชนิดของชั้นดิน เช่น ดินที่มีความแน่นสูง ดินลูกรัง หรือดินผสมหิน

ข้อมูลจากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึง พฤติกรรมของชั้นดินที่แตกต่างกันตลอดแนวอุโมงค์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของโครงสร้างอุโมงค์ โดยเฉพาะในช่วง กลางอุโมงค์ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่ำ ควรให้ความสำคัญในการออกแบบมาตรการป้องกันการยุบตัวจาก Squeezing Ground อย่างรอบคอบ ขณะที่ช่วง ท้ายอุโมงค์ ที่พบค่าความแข็งแรงสูงกว่าปกติ ควรดำเนินการตรวจสอบคุณลักษณะของชั้นดินเพิ่มเติม เพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อการออกแบบระบบรองรับโครงสร้างอุโมงค์ในพื้นที่ดังกล่าว

Compressive strength of rock mass types
along Phayao North Tunnel



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของมวลหินตามแนวอุโมงค์ฝั่งเหนือ จังหวัดพะเยา

4.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ในการทดสอบ Atterberg Limits พบว่าค่าความสามารถในการเปลี่ยนสถานะของดินมีความแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ 2 และ 3 มีค่า Plasticity Index สูงกว่าตัวอย่างที่ 5 อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมของดินที่มีแนวโน้มเป็นดินเหนียว มากกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่ 5 มีค่า PI ค่อนข้างต่ำ แสดงถึงการมีส่วนผสมของทราย ในปริมาณมากกว่า ทำให้ดินมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อรับน้ำหนักต่ำกว่าจากการทดสอบการกระจายขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis) ทั้งตัวอย่างดิน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 2, 3 และ 5 ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ พบว่า:

- ตัวอย่างที่ 2 มีสัดส่วนของดินละเอียด (Silt & Clay) สูงถึง 40% บ่งชี้ถึงแนวโน้มในการอุ้มน้ำ การระบายน้ำต่ำ และการอัดตัวที่สูง ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของดินเมื่อรับน้ำหนักหรือสัมผัสความชื้น ดินกลุ่มนี้สามารถจัดอยู่ในประเภท ดินเหนียวอนินทรีย์ (CH)
- ตัวอย่างที่ 3 และ 5 มีปริมาณทรายสูงถึง 60.72% และดินละเอียดเพียง 19.28% แสดงถึงคุณสมบัติในการระบายน้ำได้ดี และสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินเนื้อละเอียด อาจจำแนกอยู่ในกลุ่ม ดินเหนียวอนินทรีย์ (CL) หรือ Silty Sand (SM) หรือ Clayey Sand (SC)

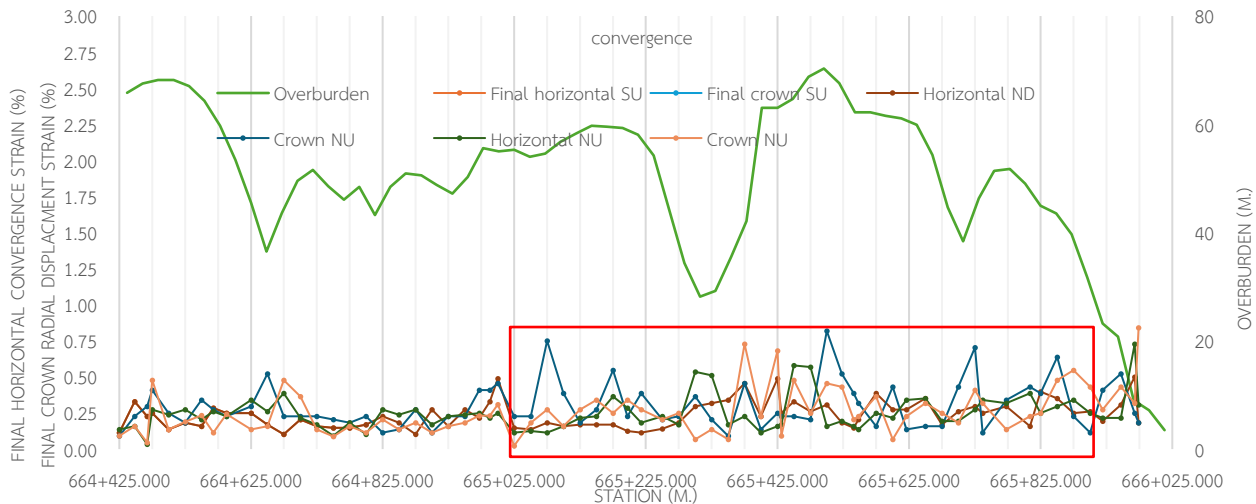
ผลการวิเคราะห์นี้มีความสำคัญต่อการออกแบบและวางแผนโครงการด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประเมินพฤติกรรมของดินต่อการรับน้ำหนัก การเสริมกำลังดิน และการป้องกันปัญหาดินทรุดตัวหรือการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง

ประเภทการทดสอบ	รายละเอียด	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 5
Atterberg Limits	- LL : Liquid Limit (%)	38.76	19.56	19.2
	- PL : Plastic Limit (%)	38.58	20.87	17.7
	- PI = PL-LL	45.26	26.27	18.99
Specific Gravity	ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	2.2	2.68	2.97
Grain Size Analysis	-% Gravel	20	20	20
	-% Sand	39.28	60.72	60.72
	-% Silt & Clay	40	19.28	19.28

ตารางที่ 2 ตารางผลการทดสอบคุณสมบัติดิน

4.5 Cycle Time

การขุดเจาะอุโมงค์เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลาหลายขั้นตอน ได้แก่ ระยะเวลาการขุดต่อรอบ (Average Cycle Time) เวลาขุด



รูปที่ 8 แสดงการบีบตัวด้านข้างและการเคลื่อนที่ของรัศมีหลังคาอุโมงค์ อุโมงค์พะเยา

(Excavation Time) เวลาติดตั้งโครงสร้างเสริม (Support Time) และเวลาหยุดรอ (Downtime) ซึ่งข้อมูลและวิธีการวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบ Cycle Time ของการขุดอุโมงค์ในสามรูปแบบ ได้แก่ Top Heading, Bench และ Invert เพื่อลดระยะเวลาการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพการขุดเจาะ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อมูลและสรุปผลวิเคราะห์ Cycle Time Uptrack ในแต่ละรูปแบบการขุด

Type of excavation	Cycle time (Hr : min)	Excavation time (%)	Support time (%)	Down time(%)
Top heading	4.87	36	52	12
Bench	4.72	59	33	8
Invert	3.82	57	36	8

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลและสรุปผลวิเคราะห์ Cycle Time Downtrack ในแต่ละรูปแบบการขุด

Type of excavation	Cycle time (Hr : min)	Excavation time (%)	Support time (%)	Down time(%)
Top heading	4.81	35	51	14
Bench	4.68	59	33	9
Invert	3.73	57	34	9

จากตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 ระยะเวลาขุด Top heading, Bench, Invert รวมกันเป็น 13 ชั่วโมง ทั้ง Cycle Time Uptrack และ Cycle

Time Downtrack แต่ Cycle Time Uptrack จะใช้ระยะเวลามากกว่า Cycle Time Downtrack 19 นาที ซึ่งอาจเกิดจากการทำงานที่แตกต่างกันหรือสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกันเล็กน้อย

4.6 ตรวจสอบการเคลื่อนตัว (convergence)

จากรูปที่ 8 เป็นภาพแสดงการทรุดตัวและการบีบตัวของหลังคาอุโมงค์ ฟัง Up track ที่ STA. 664+625.000 ถึง STA. 665+973.800 ได้ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวตามแนวรอยเลื่อน คือ 2.2 เซนติเมตร มีการทรุดตัวมากที่สุดที่ 6.4 เซนติเมตรและมีการทรุดตัวน้อยสุด 0.3 เซนติเมตร ส่วน ฟัง Down track ที่ STA. 664+650.000 ถึง STA. 665+996.000 ได้ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวตามแนวรอยเลื่อน คือ 2.1 เซนติเมตร มีการทรุดตัวมากที่สุดที่ 4.4 เซนติเมตรและมีการทรุดตัวน้อยสุด 0.9 เซนติเมตร ซึ่งจากค่า Stress ratio ที่ 1.26 กับ 1.29 ที่มีโอกาสเกิด Squeezing Ground ต่ำ และค่า Convergence ที่ได้มีการทรุดตัวต่ำ ทำให้โอกาสที่หลังคาจะบีบตัวน้อย

6. วิเคราะห์และสรุปผล

จากการตรวจสอบพื้นที่ก่อสร้างอุโมงค์พะเยาฝั่งเหนือ พบว่าชั้นดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวผสมทราย ซึ่งจำแนกได้หลายประเภท (CH, CL/SM, CL/SC) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของตัวอย่างดินที่ 2, 3 และ 5 มีค่าเท่ากับ 2.20, 2.67 และ 2.98 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นถึง ความแปรปรวนของความหนาแน่นและส่วนประกอบของแร่ธาตุและแม้จะมีความหลากหลายของชั้นดิน แต่ผลการประเมินเสถียรภาพของอุโมงค์กลับชี้ชัดว่า แนวอุโมงค์มีความมั่นคงแข็งแรงสูง โดยมีค่า Stress Ratio อยู่ในระดับปลอดภัย



(1.22–1.29) และมีการเปลี่ยนรูป (Deformation) ต่ำกว่า 1% ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความเสี่ยงต่อการบีบตัวของอุโมงค์ (Squeezing Ground) น้อยมากด้วยเสถียรภาพที่ดีเยี่ยมนี้ ประกอบกับประสิทธิภาพในการขุดเจาะที่ได้สูงกว่าแผน (เฉลี่ย 13.2-13.4 ชั่วโมง/วัน) โครงการจึงสามารถปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินงาน โดยเพิ่มความยาวของการขุดเจาะในแต่ละครั้งจากเดิม 1 เมตร เป็น 2 เมตร

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธเนศ ทองเดชศรี อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้
ขอบคุณ นาย ศุภวิชญ์ ปราบมภ์ ผู้ช่วยผู้เชี่ยวชาญอุโมงค์รถไฟ ผู้ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษาและให้ข้อมูลการทำวิจัย

ขอบคุณ นาย อนุพงศ์ คำปลอด ผู้ให้คำปรึกษาในการทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ขอบคุณ กิจการร่วมค้า ซีเคเอสที-ดีซี 2 ที่ให้ความเมตตาสถานที่และอุปกรณ์ สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อหาขนาดเม็ดดินโดยต้องขอขอบคุณ นาย เสนีย์ วงษาภา ผู้ที่เป็นคนช่วยดูแลการทดสอบ และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ศุภวิชญ์ ปราบมภ์. (2568). การประเมินทางธรณีวิศวกรรมและพฤติกรรมมวลหินบริเวณแนวคดโค้งสุโขทัยในภาคเหนือของประเทศไทย กรณีศึกษาทางเข้าอุโมงค์แม่ตึบของอุโมงค์กาว ภายใต้โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (สัญญาที่ 1 ช่วงเด่นชัย-จาว). *วารสารช่างทางรถไฟ*. ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 6-8.

[2] G. H. A. Janaka J. Kumara. (2012). Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel. *International Journal of GEOMATE Int. J. of GEOMATE*, Sept., 2012, Vol. 3, No. 1 (Sl. No. 5), pp. 290-297 *Geotec., Const. Mat. & Env.*, ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan.

[3] E. Hoek. (2018). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

[4] Mohammad Ali Mansournia. (2021). Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to

criticisms. *Global Epidemiology Volume 3*, November 2021, 100045

[5] ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (ม.ป.ป.). *การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ*. เข้าถึงเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Introduce/Soil%20Laboratory%20Testing.htm>

[6] Shi, Z., Zhang, H., และ Xu, X. (2562). การวิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์โดยใช้วิธีลดกำลังรับแรงเฉือนร่วมกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 95–104. จาก <https://www.perplexity.ai/search/kaarwiekhraaahphrtikrmmwldina-4uwWpYz1Q6eMfO8OvYHU.Q>

[7] สมาคมวิศวกรรมธรณีเกาหลี. (ม.ป.ป.). หินมวลที่มีแรงดันเกิน (Overstressed Rock Mass) และความเสี่ยงทางธรณีเทคนิคในการก่อสร้างอุโมงค์. *นิตยสารวิศวกรรมธรณี*. จาก <https://www.kgs-m.org/magazine/kgs-m/22/pt-post/nd-435>

[8] Shalabi, F. I. (2005). FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 433–449. form <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779804003335>

[9] Ratan Das (2023). Tunneling in squeezing ground – a review on prediction and measurement of boundary deformation and available mitigation methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 130, 104519. form https://www.researchgate.net/publication/368849006_Tunneling_in_squeezing_ground_-_a_review_on_prediction_and_measurement_of_boundary_deformation_and_available_mitigation_methods



การประเมินความปลอดภัยทางถนนในช่วงเส้นทางภูเขาของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 120 ด้วยวิธีตาม แนวทางของโครงการประเมินถนนระหว่างประเทศ (iRAP)

Safety Assessment in Mountainous Section of the National Highway No. 120 Based on the Guidelines of the International Road Assessment Programme (iRAP)

นายเชิธรนริศ เมืองมีศรี^{1*} นายกฤษณภูมิ มิ่งขวัญ² นายนิยาม พันนุญโพธิ์³ และนายนรเศรษฐ์ พรหมมา⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101946@up.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ประเมินความปลอดภัยของทางหลวงหมายเลข 120 ในช่วงถนนที่เป็นภูเขาโดยใช้เกณฑ์แนวทางของโครงการประเมินถนนระหว่างประเทศผ่านโปรแกรม ViDA จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าความปลอดภัยของถนนมีระดับเพียง 1 ดาวซึ่งมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุ โดยมีปัจจัยหลักคือ โค้งที่ลาดชัน ขาดราวกันตก และป้ายเตือนไม่เพียงพอ จึงเสนอมาตรการปรับปรุง ได้แก่ การติดตั้งราวกันตก ป้ายสะท้อนแสง เพิ่มไฟส่องสว่าง และเพิ่มความปลอดภัยของผิวทาง ทำให้ระดับความปลอดภัยของรถยนต์และรถจักรยานยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 2 ดาว และลดความเสี่ยงผู้เดินเท้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นว่ามาตรการเชิงวิศวกรรมสามารถยกระดับความปลอดภัยของถนนในพื้นที่ภูเขาได้จริง

คำสำคัญ: ความปลอดภัยทางถนน, ทางหลวงในพื้นที่ภูเขา, การประเมินความเสี่ยง, แนวทางโครงการประเมินถนนระหว่างประเทศ

Abstract

This study assesses the safety of Highway No. 120 in mountainous section by using the iRAP criteria through the ViDA program. The assessment reveals that the road safety currently achieves only 1-star rating, indicating a high risk of traffic accidents due to steep curves, the absence of guardrails, and insufficient warning signs. After several improvement measures are proposed, including installation of guardrails, warning signs, street lighting, and increase in friction of pavement, these countermeasures can improve the safety rating for both automobiles and motorcycles from 1 star to 2 star and

can significantly reduce accident risks for pedestrians. The results demonstrate that engineering-based countermeasures can effectively enhance road safety, particularly in mountainous areas.

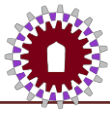
Keywords: Road Safety, Mountainous highway, Risk Assessment, iRAP

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทางหลวงหมายเลข 120 ช่วง กม. 19+800 ถึง กม. 20+200 เป็นเส้นทางบนภูเขาที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุ เนื่องจากสภาพถนนมีลักษณะคดเคี้ยว ทางลาดชัน ทัศนวิสัยแย่และอาจได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศที่แปรปรวน โดยเฉพาะในฤดูฝนหรือฤดูหนาว ถนนในพื้นที่นี้ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น ดินสไลด์ น้ำป่าไหลหลาก และหินร่วง ซึ่งล้วนเพิ่มความเสี่ยงต่อการเดินทาง จากข้อมูลสถิติอุบัติเหตุพบว่าเหตุการณ์ในช่วงถนนดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] โดยปัจจัยสำคัญมาจากการออกแบบทางที่มีพื้นที่เขตทางจำกัด สภาพถนนมีสภาพเสื่อมโทรมเนื่องจากเปิดการจราจรมาหลายปี จากการติดตั้งอุปกรณ์การจราจรเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่ที่ยังไม่เหมาะสมและครบถ้วน เช่น ราวกันอันตรายและป้ายจราจรเพื่อเตือนและบังคับและจากพฤติกรรมขับขี่ เช่น การขับเร็วเกินกำหนด กฎหมายหรือขาดวินัยในการขับขี่ นอกจากนี้ช่วงถนนดังกล่าวอาจยังไม่มีวิธีการประเมินความปลอดภัยโดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆ อย่างแน่ชัด

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุบัติเหตุและประเมินความปลอดภัยของทางหลวงหมายเลข 120 ในช่วง



ถนนที่เป็นภูเขา โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงด้านกายภาพของถนนสภาพแวดล้อมพฤติกรรมของผู้ใช้ถนน และให้ระดับดาวถนน หรือ iRAP star rating จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อเสนอแนวทางปรับปรุงมาตรการความปลอดภัยที่เหมาะสมและครบถ้วนอันจะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้งานถนนทางหลวงซึ่งจะสนับสนุนการพัฒนากระบวนคมนาคมในพื้นที่ภูเขาให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินและศึกษาปัจจัยเสี่ยงด้านความปลอดภัยของถนนทางหลวงหมายเลข 120 ช่วง กม. 19+800 ถึง กม. 20+200 ชายกว๊าน ต.เวียง อ.เมือง พะเยา ในพื้นที่ภูเขาลาดชันด้วยวิธี iRAP
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์อุบัติเหตุบนถนนที่น่าจะเกิดขึ้นในพื้นที่ภูเขาที่มีความคดเคี้ยวและลาดชัน
3. เพื่อเสนอแนวทางและมาตรการตามหลักวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงความปลอดภัย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลการแก้ไขปัญหาจุดเสี่ยงบนทางหลวงหมายเลข 120 ช่วง กม. 19+800 ถึง กม. 20+200 โดยขอบเขตด้านเนื้อหา : มีประเด็นดังนี้

1. ความเสี่ยงจากผลกระทบอุบัติเหตุทางกายภาพของถนน
2. ตรวจสอบคุณภาพของถนนตามหลักเกณฑ์ “การประเมินความปลอดภัยตามมาตรฐาน iRAP” และเสนอแนวทางการแก้ปัญหา
3. ขอบเขตด้านระยะเวลาโดยทำการศึกษาในช่วงระหว่างเดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2567 ถึง ตุลาคม พ.ศ.2568

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวทางการประเมินความปลอดภัยตามมาตรฐาน iRAP

แนวทางการประเมินความปลอดภัยตามมาตรฐาน iRAP หรือ International Road Assessment Programme [2] เป็นกรอบแนวทางการประเมินความปลอดภัยถนนที่ได้รับการยอมรับทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อ “สร้างถนนปลอดภัยสำหรับทุกคน” ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพของถนน

และการประเมินความเสี่ยงเชิงโครงสร้าง โดยแบ่งออกเป็นส่วนสำคัญดังนี้

2.1.1 ระบบดาวความปลอดภัย (Star Rating System)

iRAP ใช้ระบบดาว 1-5 ดาวเพื่อประเมินระดับความปลอดภัยของถนน โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ เช่น ความกว้างของไหล่ทาง ลักษณะทางโค้ง รวากันอันตราย ไฟส่องสว่าง พื้นผิวถนน บ้ายจราจร และมาตรการแยกช่องจราจร ตัวอย่างเช่น: ถนนที่มีเพียงเลนสวนกัน ไม่มีไฟ ไม่มีราวกันตกเท่ากับ 1 ดาว (เสี่ยงสูง) ถนนที่มีเกาะกลาง ราวเหล็กกันตก และจุดข้ามปลอดภัยเท่ากับ 4 ถึง 5 ดาว (เสี่ยงต่ำ) รายละเอียดการคำนวณค่าคะแนนจากการประเมินองค์ประกอบถนนตามมาตรฐาน iRAP การจัดลำดับดาวของถนนจะอาศัยค่าคะแนนที่ได้จากการประเมิน องค์ประกอบถนนตามมาตรฐานของ iRAP คือ ค่าคะแนนการจัดลำดับ (Star Rating Score: SRS) โดยมีรายละเอียดการคำนวณค่า คะแนน ดังสมการที่ 1

$$SRS = \sum \text{Crash Type Scores} \quad (1)$$

โดยที่

SRS คือ ระดับความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตและบาดเจ็บสาหัสสำหรับผู้ใช้งานแต่ละประเภท

Crash Type Scores คือ ค่าคะแนนของการชนแต่ละประเภท ดังสมการที่ 2

$$\text{Crash Type Scores} = \text{Likelihood} \times \text{Severity} \times \text{Operating speed} \times \text{External flow influence} \times \text{Median traversability} \quad (2)$$

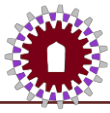
โดยที่

Likelihood คือโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุโดยพิจารณาจากค่าความเสี่ยงของปัจจัยทางถนนที่อาจจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุ

Severity คือความรุนแรงของอุบัติเหตุ โดยพิจารณาจากค่าความเสี่ยงของปัจจัยทางถนนที่มีผลต่อความสูญเสียเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

Operating speed คือ ความเร็วของการจราจรโดยพิจารณาจากความเสี่ยงปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการจราจร

External flow คือปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้องระหว่างความเสี่ยงของผู้ใช้ทางคนหนึ่งจะส่งผลต่อโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุของผู้ใช้ทางคนอื่น



Median traversability คือการข้ามเกาะกลางถนน ซึ่งจะส่งผล ต่อแนวโน้มที่ยานพาหนะเดินทางผิดทิศทางจราจร โดยคะแนนระดับดาวมีความหมายดังนี้

คะแนนระดับดาว 4 ถึง 5 ดาว หมายถึง ถนนที่มีความปลอดภัยสูง ซึ่งลักษณะกายภาพของถนนที่ปลอดภัยสูงจะประกอบด้วย เกาะกลางถนนหรือกำแพงคอนกรีต สภาพข้างทางที่มีความปลอดภัย ถนนที่ มีความกว้างและไหล่ทางที่เหมาะสมและมีสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับคนเดินเท้าและจักรยาน เป็นต้น

คะแนนระดับ 3 ดาว หมายถึง ถนนที่มีความปลอดภัยในระดับปานกลางหรือเป็นคะแนนระดับดาวขั้นต่ำที่ทาง iRAP แนะนำสำหรับถนนที่มีความปลอดภัยเนื่องจากถนนที่มีระดับต่ำกว่า 3 ดาวมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุที่เกิดการบาดเจ็บและเสียชีวิต

คะแนนระดับ 1 ถึง 2 ดาว หมายถึง ถนนที่มีความปลอดภัยอยู่ในระดับที่น้อย หรือไม่ปลอดภัย ซึ่งถนนลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะเป็นถนนสองช่องจราจรที่มีลักษณะเป็นทางโค้ง มีขนาดช่องจราจรแคบ ไหล่ทางและผิวทางอาจจะไม่ได้ปูผิว หรือเส้นจราจรเลือนลาง ถนนอาจเป็นหลุมเป็นบ่อ เป็นต้น

2.1.2 การเสนอแนวทางการปรับปรุง (Safer Roads Investment Plan)

ผลลัพธ์จากการประเมินจะใช้สร้างแผนลงทุนเพื่อปรับปรุงถนนให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยให้ความสำคัญกับผลตอบแทนต่อการลงทุน (Benefit-Cost Ratio) ตัวอย่างมาตรการที่เสนอ เช่น การติดตั้งราวกันอันตราย ปรับปรุงจุดกลับรถ หรือการทำสัญลักษณ์จราจรที่ชัดเจนขึ้น

2.2 คู่มือมาตรการความปลอดภัยทางถนนของกรมทางหลวง

คู่มือมาตรการด้านความปลอดภัยทางถนน [3] เป็นเอกสารหลักที่ให้แนวทางในการจัดการความปลอดภัยของถนนในประเทศไทย โดยครอบคลุมเนื้อหาสำคัญในหลายประเด็น ได้แก่

2.2.1 การบริหารจัดการจุดเสี่ยง (Hazardous Location Management)

เน้นการใช้ข้อมูลอุบัติเหตุเชิงสถิติย้อนหลัง (เช่น จำนวนครั้งและความรุนแรงของอุบัติเหตุ) เพื่อระบุจุดเสี่ยงบนถนน การจัดลำดับความสำคัญของจุดเสี่ยงจะคำนึงถึงระดับความเสี่ยง

และผลกระทบหากเกิดอุบัติเหตุในพื้นที่นั้น รวมถึงเสนอวิธีการปรับปรุงเฉพาะจุด (Spot Improvement) ที่มีต้นทุนคุ้มค่า เช่น การติดตั้งป้ายเตือนล่วงหน้า การทาสีทางข้าม การติดตั้งราวกันตก

2.2.2 แนวทางการวางแผนปรับปรุงความปลอดภัย

การวางแผนปรับปรุงต้องครอบคลุมทั้งด้านวิศวกรรม การบังคับใช้กฎหมาย และการให้ความรู้ผู้ใช้ทาง โดยมีการกำหนดลำดับการดำเนินงานชัดเจน เช่น การสำรวจภาคสนาม การประชุมร่วมกับหน่วยงานในพื้นที่ การออกแบบมาตรการ และการติดตามผลลัพธ์หลังดำเนินการแล้วเสร็จ

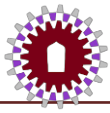
2.2.3 การมีส่วนร่วมของท้องถิ่นและภาคประชาชน

เอกสารนี้เน้นย้ำความสำคัญของการมีส่วนร่วมจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานด้านความปลอดภัยทางถนนในพื้นที่และชุมชนเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการดูแลรักษาความปลอดภัยบนถนน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์จุดเสี่ยงบนทางหลวง งานวิจัยโดย รังสิยา และพวงเพ็ชร [4] มุ่งเน้นการประเมินความปลอดภัยบริเวณจุดเสี่ยงบนทางหลวงแผ่นดิน โดยอาศัยทั้งข้อมูลอุบัติเหตุย้อนหลัง และการสำรวจสภาพถนนจริงเพื่อระบุปัจจัยเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง นักวิจัยได้ใช้ดัชนีเชิงสถิติเพื่อจัดลำดับความรุนแรงของจุดเสี่ยง พร้อมทั้งลงพื้นที่ตรวจสอบรายละเอียดด้านกายภาพของถนน เช่น ความโค้ง ระยะการมองเห็น การจัดช่องจราจร และการมีหรือไม่มีไฟส่องสว่างในเวลากลางคืน ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ปัญหาหลักเกิดจากการออกแบบถนนที่ไม่สอดคล้องกับมาตรฐาน ความเร็วของผู้ขับขี่ที่เกินกำหนด รวมถึงสภาพอากาศและการขาดมาตรการควบคุมทิศทางจราจรอย่างเหมาะสม จากข้อค้นพบดังกล่าว งานวิจัยเสนอแนวทางการปรับปรุงโดยเน้นการแก้ไขเชิงวิศวกรรม เช่น การปรับปรุงรัศมีและความลาดเอียงของทางโค้ง การเพิ่มไหล่ทาง ตลอดจนการติดตั้งไฟฟ้าแสงสว่างและป้ายจำกัดความเร็ว เพื่อยกระดับความปลอดภัยและลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุในพื้นที่วิกฤต

การประเมินความปลอดภัยทางถนนด้วยระดับดาว iRAP กรณีศึกษาของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย งานวิจัยโดย อนุพันธ์ จิตอารีและคณะ [5] ได้นำเสนอการประเมินความปลอดภัยทางถนนภายในมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง โดยอ้างอิงหลักเกณฑ์การให้ระดับดาวของโครงการ iRAP เพื่อ



ระบุจุดเสี่ยงและเสนอแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านความปลอดภัยบนถนน ในการศึกษา มีการเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของถนน เช่น ความกว้างของทางเดินเท้า สิ่งกีดขวาง และระบบควบคุมทางแยก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ของ iRAP เพื่อประเมินระดับความปลอดภัยในรูปแบบระดับดาว ผลการศึกษาพบว่า ถนนส่วนใหญ่มีระดับความปลอดภัยอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ โดยเฉพาะในบริเวณที่ยังไม่มีมาตรการแบ่งแยกพื้นที่การใช้งานระหว่างคนเดินเท้าและยานพาหนะอย่างชัดเจน ทั้งนี้ บทความยังได้เสนอแนะแนวทางที่หน่วยงานภายในสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อยกระดับความปลอดภัยในการใช้ถนนภายในพื้นที่ศึกษาต่อไป

การพัฒนาแนวทางการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนสำหรับรถจักรยานยนต์ โดย ภูทริยา มีอุสาร์ [6] ได้พัฒนาแนวทางประเมินความปลอดภัยทางถนนที่ตอบสนองต่อความเสี่ยงเฉพาะของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ โดยศึกษาข้อมูลอุบัติเหตุและแนวทางการตรวจสอบที่มีอยู่เดิม เช่น iRAP เพื่อนำมาปรับใช้ให้เหมาะกับบริบทของประเทศไทย ผลการวิจัยชี้ว่า แนวทางที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุจุดเสี่ยงได้แม่นยำ และเหมาะสมสำหรับใช้ในการสำรวจภาคสนาม เพื่อเสนอแนวทางแก้ไขที่ส่งผลต่อการลดอุบัติเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

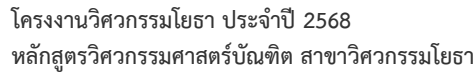
การประเมินและปรับปรุงความปลอดภัยทางถนนด้วยระดับดาวของ iRAP ในถนนที่มีความเสี่ยงในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดย ณัฐภพ อินหม่อมและ จารัส พิทักษ์ศฤงคาร [7] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้หลักเกณฑ์ระดับดาวของ iRAP เพื่อประเมินความปลอดภัยทางถนนในกรุงเทพมหานคร โดยเน้นผู้ใช้งาน 4 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ขับขี่รถยนต์ รถจักรยานยนต์ คนเดินเท้า และผู้ใช้จักรยาน ดำเนินการโดยคัดเลือกถนนที่มีความเสี่ยงสูงจากอัตราการเกิดอุบัติเหตุ เก็บข้อมูลจากแหล่งทุติยภูมิและการสำรวจภาคสนามตามเกณฑ์ iRAP จำนวนกว่า 50 ปัจจัย ก่อนนำเข้าระบบ ViDA เพื่อประเมินระดับดาวแยกตามประเภทผู้ใช้งาน จากผลการประเมินถนนรัชดาภิเษกพบว่า คนเดินเท้ามีระดับความปลอดภัยสูง ส่วนรถจักรยานยนต์และจักรยานมีความเสี่ยงสูงจากระดับดาวที่ต่ำกว่าเกณฑ์ ขณะที่รถยนต์อยู่ในระดับปานกลาง ข้อเสนอแนะเน้นการควบคุมความเร็ว แยกช่องทางจราจรเฉพาะสำหรับกลุ่มเสี่ยง

และส่งเสริมพฤติกรรมการใช้ถนนอย่างปลอดภัย โดยใช้แนวทางของ iRAP เป็นเครื่องมือประเมิน

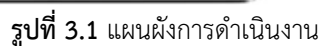
การประเมินความปลอดภัยทางถนนของกรมทางหลวง ด้วยวิธีการให้คะแนนระดับดาวของ iRAP งานวิจัยโดย ศิริวิชัย ชุ่มไชยพุกษ์และคณะ [8] ได้นำเสนอผลการประเมินความปลอดภัยทางถนนอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ก่อนดำเนินการก่อสร้างหรือปรับปรุงถนน บนพื้นฐานวิธีการให้คะแนนระดับดาวสำหรับการออกแบบตามมาตรฐานของหน่วยงาน International Road Assessment Programme (iRAP Star Rating for Design) โดยประเมินจากแบบก่อสร้างของกรมทางหลวง ประเทศไทย การประเมินระดับความปลอดภัยได้จำแนกตามกลุ่มผู้ใช้งาน ได้แก่ รถยนต์ และจักรยานยนต์ โดยผลการประเมินสามารถบ่งชี้ความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุที่มีผลจากสภาพถนน สิ่งอันตรายสองข้างทางของถนนรวมถึงปัจจัยและองค์ประกอบต่างๆ ของถนนที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ถนนแต่ละกลุ่ม อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นข้อเสนอแนะประกอบในการปรับปรุงแบบก่อสร้าง และปรับเปลี่ยนแนวทางการออกแบบถนนต่อไปในอนาคต

2.4 การประยุกต์ใช้กับถนนในพื้นที่ศึกษา

จากการทบทวนเอกสารข้างต้นสามารถสรุปแนวทางสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้กับทางหลวงหมายเลข 120 ได้โดยการระบุจุดเสี่ยงโดยใช้ข้อมูลอุบัติเหตุย้อนหลัง ควบคู่กับการสำรวจภาคสนามเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและรอบด้าน ประเมินความปลอดภัยด้วยแนวทาง iRAP เช่น การให้คะแนน Star Rating เพื่อจัดลำดับความเร่งด่วนในการปรับปรุง ออกแบบมาตรการปรับปรุงที่คุ้มค่าและเป็นไปได้ เช่น การเพิ่มราวกันตกในทางโค้ง การปรับปรุงป้ายจราจรให้ชัดเจน และการใช้วัสดุสะท้อนแสงส่งเสริมความร่วมมือกับท้องถิ่น เพื่อให้การปรับปรุงมีความยั่งยืนในระยะยาว



วิธีการดำเนินงานสามารถแสดงได้ในรูปแบบที่ 3.1



ข้อมูลปริมาณจากราจากการลงพื้นที่สำรวจพื้นที่จริงโดย
ปริมาณจากราทุกๆ 15 นาทีโดยประเภทของยานพาหนะและ
ช่วงเวลาแบ่งตามรูปที่ 3.2

แบบฟอร์มการกระจายสินค้าภายในอาคาร													
การประเมินความหนาแน่นของรถโดยสารสาธารณะ 120 คน มี 19-800 คน มี 20													
วันที่ทำการ	25/6/2568	จุดทำการ	ศูนย์รวมวิถีชีวิต	มี 20	จุดจอดรถ	ศูนย์รวมวิถีชีวิต	มี 120	ทิศทาง	ทางออก	วิถีชีวิต	มี 20	จุดทำการ	มี 20
Time	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ	รถโดยสาร สาธารณะ
1245- 1300	-	2	17	-	-	-	-	3	1	1	-	-	-
1300- 1315	-	2	13	1	-	-	-	1	1	-	1	-	-
1315- 1330	-	1	20	2	-	-	-	7	-	1	1	3	-
1330- 1345	-	1	11	-	-	-	-	2	1	-	-	1	-
1345- 1400	-	6	11	2	-	-	-	3	2	-	-	-	-

รูปที่ 3.2 ข้อมูลปริมาณจราจรแยกตามประเภทยานพาหนะ

ทางหลวงหมายเลข 120 เป็นเส้นทางที่เชื่อมระหว่าง จ. พะเยา อ.วังเหนือ จ.ลำปาง และ จ.เชียงใหม่ โดยลักษณะของพื้นที่ทางกายภาพของถนนมีดังนี้

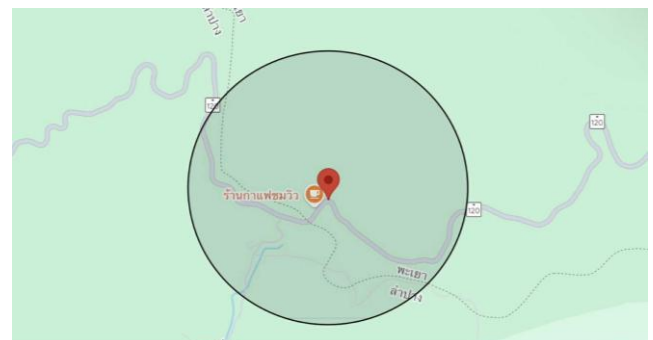
1. ลักษณะผิวถนนเป็นพื้นผิวถนนเป็นถนนลาดยางมีสภาพดีในบางช่วงและบางช่วงมีการก่อสร้างปรับปรุงเนื่องจากความเสียหายจากการใช้งาน

2. ลักษณะของช่องจราจรมี 3 ช่องจราจรโดยทางไปวังเหนือมี 2 ช่องจราจรและทางไปพะเยามี 1 ช่องจราจรขนาดความกว้าง 3.5 เมตรต่อ 1 ช่องจราจร

3. ลักษณะภูมิประเทศ ช่วง กม. ที่ 19+800 ถึง กม. ที่ 20+200 มีลักษณะเป็นป่าไม้ ภูเขา และมีความชันเฉลี่ยของถนน อยู่ที่ 6%

4. มีสิ่งอำนวยความสะดวกทางจราจร เช่น เสไฟฟ้าที่ให้
ความสว่างในขณะที่สัญญาณจราจรติด ความเร็ว และป้ายบอก
ความลาดชันของถนน

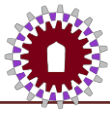
เนื่องจากช่วงดังกล่าวเป็นจุดที่มีความโค้งต่อเนื่องและมีความลาดชันมากที่สุดของเส้นทาง อีกทั้งมีสถิติการเกิดอุบัติเหตุสูงกว่าช่วงอื่นบนทางหลวงหมายเลข 120 และยังมีข้อจำกัดของพื้นที่สองข้างทางที่ค่อนข้างแคบ ทำให้ติดตั้งอุปกรณ์ความปลอดภัยได้ยาก จึงเลือกจุดนี้เป็นกรณีศึกษาตัวแทน เพื่อให้เห็นภาพรวมของปัญหาความปลอดภัยบนถนนภูเขาและสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประยุกต์กับช่วงอื่นที่มีสภาพคล้ายกันได้



รูปที่3.3 แผนที่ถนนบริเวณที่ศึกษา

3.2 การจัดเตรียมข้อมูลและป้อนเข้าสู่โปรแกรม ViDa เพื่อประเมินความปลอดภัยของถนนตามมาตรฐาน iRAP

มาตรฐาน iRAP Star Ratings คือ การจัดระดับความปลอดภัยของถนนตั้งแต่ 1 ถึง 5 ดาว โดย 1 ดาวคืออันตรายที่สุด และ 5 ดาวคือปลอดภัยที่สุด โดยอาศัยข้อมูลเช่น ความเร็วของยานพาหนะ ลักษณะทางกายภาพของถนน และสิ่งอำนวยความสะดวก



ความปลอดภัยอื่นๆ มาวิเคราะห์ โดยแต่ละระดับจะสะท้อนความเสี่ยงต่อผู้ใช้งาน ได้แก่ ผู้ขับขี่รถประเภทต่างๆและคนเดินเท้าเพื่อช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องวางแผนปรับปรุงถนนให้ปลอดภัยขึ้นแสดงผลในรูปแบบที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 หน้าจอการเลือกสภาพแวดล้อมถนน



รูปที่ 3.5 แสดงถึงผลการประเมินระดับดาว

จากนั้นข้อมูลระดับดาวที่ได้มาตรวจสอบกับมาตรฐาน Star Ratings เพื่อดูว่าเส้นทางถนนของเรานั้นมีระดับดาวอยู่ที่เท่าไรความเสี่ยงมากน้อยแค่ไหน เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงเพื่อที่จะลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุให้ได้มากที่สุดโดยมาตรฐานระดับดาวนั้นจะมีตั้งแต่ 1 ดาวถึง 5 ดาว โดยเกณฑ์การประเมินระดับดาวแสดงได้ในรูปที่ 3.6

ระดับดาว (Star Rating)	ความหมาย	ระดับความเสี่ยง	คำแนะนำทั่วไป
★ (1 ดาว)	อันตรายมาก	เสี่ยงเสียชีวิตสูงที่สุด	ควรเร่งปรับปรุงทันที
★★ (2 ดาว)	อันตราย	เสี่ยงสูง	ควรเริ่มปรับปรุงระยะสั้น
★★★ (3 ดาว)	ปานกลาง	เสี่ยงปานกลาง	อาจพิจารณาปรับปรุงเฉพาะ
★★★★ (4 ดาว)	ปลอดภัย	เสี่ยงต่ำ	บำรุงรักษาดี อาจปรับปรุงเพิ่มเติม
★★★★★ (5 ดาว)	ปลอดภัยมาก	เสี่ยงต่ำมาก	มาตรฐานดีมาก ควรรักษาสภาพไว้

รูปที่ 3.6 ระดับดาวตามมาตรฐาน iRAP

3.3 การเสนอแนวทางแก้ปัญหา

การตรวจสอบและเสนอแนวทางการแก้ไขความปลอดภัยทางจะอ้างอิงจากคู่มือการตรวจสอบความปลอดภัยสำหรับถนนที่มีการเปิดให้บริการแล้วของกรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2564 [9] โดยคัดเลือกเฉพาะบางประเด็นที่เกี่ยวข้องและปรับให้เข้ากับสภาพเส้นทางที่ต้องการตรวจสอบเมื่อได้ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมตามหัวข้อ 3.1 และการวิเคราะห์สภาพถนนจากระบบ Vida ตาม หัวข้อ3.2 แล้ว จึง

สามารถระบุความเสี่ยงของถนนตามมาตรฐานของ iRAP ได้ จากนั้นจะดำเนินการพิจารณา และเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไข โดยคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะของถนนงบประมาณที่มีอยู่ ความเป็นไปได้ในการดำเนินการ และผลกระทบต่อผู้ใช้งาน แนวทางการปรับปรุงอาจประกอบด้วย การติดตั้ง อุปกรณ์เสริมความปลอดภัยการปรับปรุงสภาพทางกายภาพของถนน การจัดการด้านจราจรรวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นและการรับรู้ของผู้ขับขี่ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้ถนน

4.ผลการศึกษา

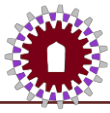
4.1 สถิติข้อมูลอุบัติเหตุ

สถิติข้อมูลอุบัติเหตุทางหลวงหมายเลข 120 กมที่ 19+800 ถึง 20+200 ในช่วงปีพ.ศ.2563 ถึง พ.ศ.2566 จากระบบ“MOT DATA CATALOG” [1] สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเกิดอุบัติเหตุปี พ.ศ 2563 ถึง พ.ศ.2566

ปี (พ.ศ.)	จำนวนอุบัติเหตุ (ครั้ง)	ประเภทการเกิดเหตุ	ลักษณะการเกิดเหตุ
2563	8	รถยนต์ส่วนบุคคล: 4, รถรับส่งพนักงาน: 1, รถบรรทุก 6 ล้อ: 1, รถจักรยานยนต์: 1, รถตู้: 1	พลิกคว่ำ/ตกถนน ในทางโค้ง: 7, ชนกัน: 1
2564	10	รถพ่วง: 3, รถตู้: 4, รถยนต์ส่วนบุคคล: 3	พลิกคว่ำ/ตกถนน ในทางโค้ง: 10
2565	12	รถพ่วง: 2, รถตู้: 4, รถยนต์ส่วนบุคคล: 4, รถจักรยานยนต์: 2	พลิกคว่ำ/ตกถนน ในทางโค้ง: 11, ชนกัน: 1
2566	3	รถตู้: 2, รถยนต์ส่วนบุคคล: 1	พลิกคว่ำ/ตกถนน ในทางโค้ง: 3

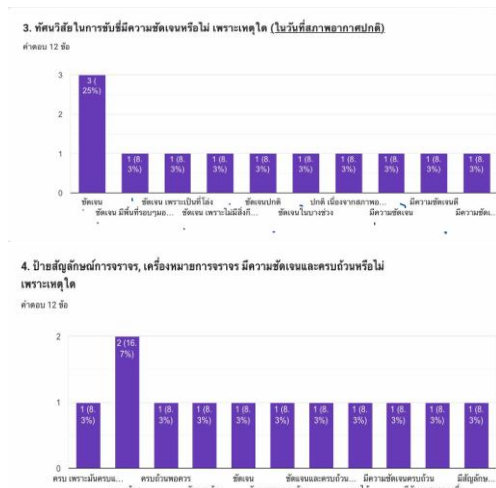
ข้อมูลจากฐานสถิติการเกิดอุบัติเหตุในเส้นทางนี้ระบุว่า มีจำนวนอุบัติเหตุรวมกว่า 33 ครั้ง ภายในช่วงเวลาเพียง 4 ปี ซึ่งถนนมีลักษณะเป็นเส้นทางที่ลัดเลาะเลียบเชิงเขาและมีโค้งต่อเนื่องหลายจุด ประเภทของยานพาหนะที่ประสบอุบัติเหตุส่วนใหญ่ ได้แก่ รถตู้รับส่งผู้โดยสาร, รถบรรทุกหนัก และรถยนต์ส่วนบุคคล ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะการเกิดเหตุพบว่า กว่า 90% ของกรณีเกิดจากการ “พลิกคว่ำ” หรือ “ตกถนนในทางโค้ง” โดยที่ปัจจัยร่วมที่มักปรากฏในรายงาน



เหตุการณ์ คือ การขับด้วยความเร็วสูง การเสียหลักจากผิวถนนไม่เรียบ การขาดป้ายเตือนหรืออุปกรณ์ป้องกันเชิงวิศวกรรมในบริเวณเสี่ยง บริเวณพื้นที่ทำการศึกษา มีลักษณะภูมิประเทศที่ลาดเอียง และไม่มีแนวกันตกถาวรสำหรับยานพาหนะ [8]

4.2 ผลการสำรวจข้อมูลผู้ขับขี่

ข้อมูลความไม่ปลอดภัยจากหัวข้อ 4.1 สามารถนำไปสู่แนวทางการเสนอแนะการแก้ไขปัญหาให้กับผู้รับผิดชอบได้อย่างเป็นระบบ การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามประชาชนที่อยู่ในพื้นที่และผู้ขับขี่ยานพาหนะสัญจรผ่านพื้นที่ศึกษาโดยแบบสอบถามประกอบด้วย 3 ส่วนโดยส่วนที่ 1 เกี่ยวข้องกับความเหมาะสมกับการติดตั้งสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ส่วนที่ 2 การเดินทางเกี่ยวข้องกันในเวลากลางวันและกลางคืนและส่วนที่ 3 เกี่ยวข้องกับข้อมูลผู้ให้สัมภาษณ์ (อายุตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไปโดยพิจารณาจากวุฒิภาวะในการขับขี่) โดยข้อมูลจากแบบสอบถามของผู้ใช้ถนนเส้นทางผ่านพื้นที่ศึกษาและผู้อยู่อาศัยจำนวน 12 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ข้อคิดเห็นต่อความเหมาะสมในการติดตั้งสิ่งอำนวยความสะดวก

จากผลการลงพื้นที่สำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้ถนนในรูปที่ 4.1 พบว่าทัศนวิสัยในการขับขี่มีความชัดเจนหากไม่มีฝนตก (ในวันที่มีสภาพอากาศปกติ) เนื่องจากในช่วงเวลานั้นไม่มีสิ่งกีดขวางและพื้นที่รอบๆยังสามารถมองเห็นได้สะดวก ในส่วนของป้ายสัญลักษณ์การจราจร เครื่องหมายการจราจร ความคิดเห็นส่วนใหญ่พบว่ามีความชัดเจนและครบถ้วนพอสมควร

5. ปัจจัยที่มีผลต่อการขับขี่

คำตอบ 12 ข้อ

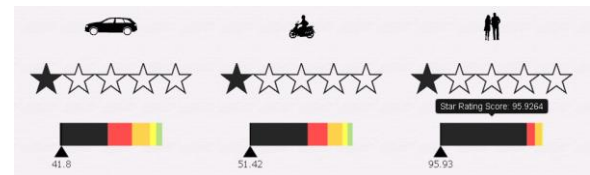


รูปที่ 4.2 ข้อคิดเห็นในการปรับปรุงและปัจจัยที่มีผลต่อการขับขี่

จากผลการสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้ถนนในรูปที่ 4.2 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการขับขี่ส่วนใหญ่จะเป็นเรื่องความโค้งของถนนที่มีลักษณะความโค้งมากจนเกินไปและสภาพอากาศในช่วงที่เกิดฝนตกหนัก นอกจากนี้ยังมีความคิดเห็นในการปรับปรุงถนนสายนี้ที่หลากหลายเช่น ควรตัดต้นไม้ข้างทางและควรมีกระจกตรงทางโค้ง

4.3 ผลการวิเคราะห์ iRAP

ผลข้อมูลระดับดาวของถนนทางหลวงหมายเลข 120 กมที่ 19+800 ถึง 20+200 โดยจะวิเคราะห์ระดับดาวออกเป็น 4 ประเภท คือ รถยนต์ รถจักรยานยนต์ รถจักรยาน และคนเดินทางเท้า ซึ่งได้คำนวณระดับดาวผ่านโปรแกรม ViDa ผลระดับดาวจะแสดงในรูปภาพที่ 4.3 ตารางที่ 4.4

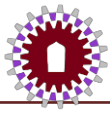


รูปที่ 4.3 ผลคะแนนระดับดาว

ประเภทผู้ใช้ถนน	ระดับดาว	ค่าคะแนนความเสี่ยง	หมายเหตุเพิ่มเติม
รถยนต์	★☆☆☆☆	41.8	ความเสี่ยงปานกลาง-สูง
รถจักรยานยนต์	★☆☆☆☆	51.42	ความเสี่ยงค่อนข้างสูง
คนเดินถนน	★☆☆☆☆	95.93	ความเสี่ยงสูงมาก (เกือบ 100%)

รูปที่ 4.4 ผลคะแนนระดับดาว

จากผลการประเมินโปรแกรม Vida จะพบว่าความปลอดภัยของทางหลวงหมายเลข 120 กมที่ 19+800 ถึง 20+200 นั้นมีความปลอดภัยอยู่เพียง 1 ดาวทั้ง 3 ประเภทซึ่งมีความปลอดภัยที่ต่ำมาก โดยรถยนต์จะมีค่าคะแนนความเสี่ยงที่ 41.8% รถจักรยานยนต์จะมีค่าคะแนนความเสี่ยงอยู่ที่ 51.93% และคนเดินถนนจะมีค่าคะแนนความเสี่ยงอยู่ที่ 95.53% ซึ่งเป็นค่าความเสี่ยงที่สูงมาก [1] ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสี่ยง ได้แก่ ความลาดชันของภูมิประเทศ ลักษณะทางโค้งต่อเนื่อง การขาดพื้นที่ไหล่ทางที่ปลอดภัย และการไม่มีโครงสร้างป้องกันการตกเขาในบางจุด ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง

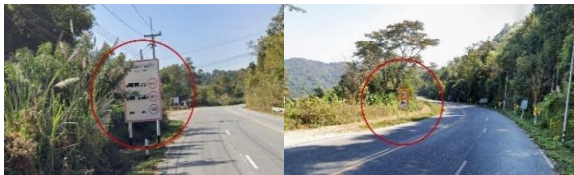


ดำเนินการปรับปรุงสภาพถนนและติดตั้งมาตรการด้านความปลอดภัยเพิ่มเติมที่เหมาะสมกับบริบทพื้นที่ภูเขา เช่น การติดตั้งราวกันตก การปรับปรุงไหล่ทาง การจัดทำช่องทางเดินปลอดภัย หรือใช้มาตรการเตือนผู้ขับขี่ให้ชะลอความเร็วในจุดเสี่ยง เพื่อยกระดับความปลอดภัยให้กับผู้ใช้ถนนทุกประเภท

4.4 ประเด็นมาตรการแก้ไขและแนวทางการปรับปรุง

จากการศึกษาคู่มือการตรวจสอบความปลอดภัยถนนสำหรับถนนที่เปิดบริการแล้วของกรมทางหลวงชนบทกระทรวงคมนาคม ปี 2564 [9] เป็นการตรวจสอบความปลอดภัยตามมาตรฐานความปลอดภัยการจราจรและขนส่งซึ่งกำหนดแนวทางในการตรวจสอบความสะดวกและประสิทธิภาพของถนนโดยมีประเด็นมาตรการแก้ไขดังนี้

4.4.1. การควบคุมความเร็ว



รูปที่ 4.5 ป้ายจำกัดความเร็ว

ประเด็นเสนอแนะ : เนื่องจากมีการติดตั้งป้ายเตือนโค้งและป้ายจำกัดความเร็วอยู่แล้วจึงเสนอเป็นการปรับปรุงเป็นป้ายสะท้อนแสงมาตรฐาน (Type IX หรือ XI) เพื่อให้เห็นชัดเจนในเวลากลางคืนและทำ Rumble Strip ก่อนเข้าโค้ง

4.4.2 ทิศนวิสัย



รูปที่ 4.6 บริเวณที่ทัศนวิสัยถูกบดบังด้วยวัชพืช

ประเด็นเสนอแนะ : ติดตั้งหลักนำโค้ง (Chevron Sign) หมุดสะท้อนแสง (RPM) และตัดแต่งต้นไม้ตามข้างทาง

4.4.3 ราวกันและสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 4.7 ไม่มีการติดตั้งราวกันตกและการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างที่เพียงพอ

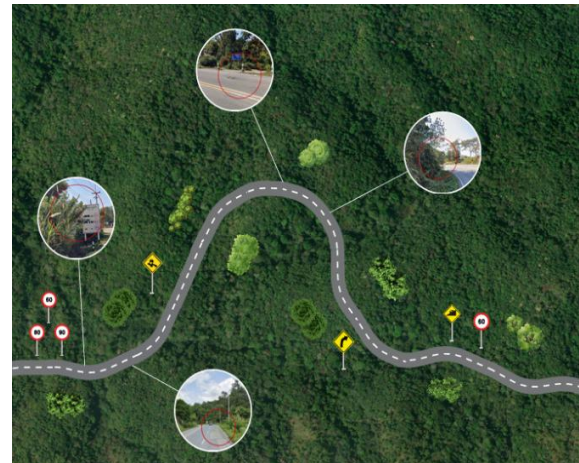
ประเด็นเสนอแนะ : ขยายการติดตั้งราวกันตก (Guardrail หรือ Wire Rope Barrier) ให้ครอบคลุมจุดเสี่ยง ดัดแต่งไม้สิ่งกีดขวาง และติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างเฉพาะจุด

4.4.4 สภาพผิวทาง



รูปที่ 4.8 บริเวณพื้นผิวถนนที่เกิดการชำรุด

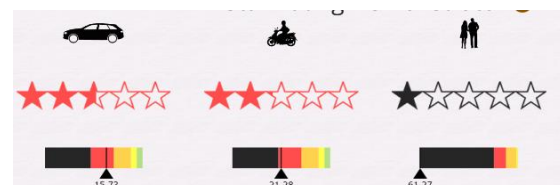
ประเด็นเสนอแนะ : ใช้ผิวทางที่มีแรงเสียดทานสูง (High Friction Surface) ปรับ Superelevation ของโค้งให้เหมาะสม และคอยบำรุงรักษาไม่ให้เกิดการชำรุด



รูปที่ 4.9 สรุปข้อเสนอแนะการปรับปรุงแก้ไขถนน

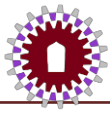
4.5 การเสนอมาตรการแก้ไขเพิ่มเติม

ผลข้อมูลระดับดาวของถนนทางหลวงชนบทหมายเลข 120 กมที่ 19+800 ถึง 20+200 หลังจากปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะเป็นไปดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพระดับดาวหลังจากการแก้ไขคุณภาพถนน

หลังจากการเสนอแนวทางการปรับปรุง เช่น ขยายการติดตั้งราวกันตก การปรับปรุงป้ายเตือนโค้งกับป้ายจำกัดความเร็วเป็นป้ายสะท้อนแสงและการปรับปรุงพื้นผิวถนน พบว่าผลการประเมินมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดีขึ้น โดยระดับดาวของรถยนต์และรถจักรยานยนต์เพิ่มขึ้นจาก 1 ดาวเป็น 2



ดาว ซึ่งแสดงถึงการลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผู้เดินเท้ายังคงมีระดับ 1 ดาว แต่คะแนนความเสี่ยงลดลงจาก 95.93 เป็น 61.27 การปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยที่นำมาใช้ในบริเวณถนนสายนี้สามารถช่วยยกระดับความปลอดภัยของผู้ใช้ถนน โดยเฉพาะกลุ่มผู้ใช้รถยนต์และรถจักรยานยนต์ได้อย่างเห็นได้ชัด และช่วยลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุรุนแรงในพื้นที่เสี่ยงดังกล่าวผลจากการแก้ไขที่มีต่อระดับดาว iRAP [1] โดยผลการปรับปรุงแก้ไขสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการเสนอมาตรการการแก้ไข

มาตรการแก้ไข	อ้างอิงตามคู่มือฯ [9]	ผลที่มีต่อระดับดาว iRAP
ควบคุมความเร็ว - ปรับปรุงป้ายเตือนโค้ง ป้ายจำกัดความเร็ว และทำ Rumble Strip ก่อนถึงโค้ง	มาตรการควบคุมความเร็วและป้ายจราจร (หัวข้อการจัดการความเร็วและการสัญญาณเตือน)	ลดความเร็วของผู้ขับขี่ก่อนเข้าโค้ง → ลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุ เพิ่มคะแนนความปลอดภัย
ติดตั้งหลักนำโค้ง (Chevron Sign), หมุดสะท้อนแสง (RPM)	มาตรการปรับปรุงทัศนวิสัยและการนำทาง (หัวข้อเครื่องหมายและอุปกรณ์อำนวยความสะดวก)	ผู้ขับขี่มองเห็นแนวโค้งชัดเจน กลางวัน-กลางคืน → ลดความเสี่ยงรถหลุดโค้ง
ติดตั้งราวกันตก (Guardrail หรือ Wire Rope Barrier)	มาตรการด้านโครงสร้างและสิ่งกีดขวาง (หัวข้อราวกันและสิ่งกีดขวางข้างทาง)	ลดความรุนแรงหากรถหลุดโค้ง โดยเฉพาะพื้นที่ที่ติดเหวหรือทางชัน → ลดระดับความรุนแรงของการชน
ปรับปรุงทัศนวิสัย - ติดตั้งต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และติดตั้งไฟฟาส่องสว่างเฉพาะจุดเสี่ยง	มาตรการเพิ่มทัศนวิสัยและการมองเห็น (หัวข้อสิ่งกีดขวางและแสงสว่าง)	เพิ่มความสามารถในการมองเห็นเส้นทาง → ลดอุบัติเหตุจากการประมาทในโค้งมืด
ใช้ผิวทางที่มีแรงเสียดทานสูง (High Friction Surface) และปรับ Super-elevation ของโค้งให้เหมาะสม	มาตรการด้านผิวทางและโครงสร้างถนน (หัวข้อการออกแบบและบำรุงรักษาผิวทาง)	ลดการลื่นไถล รถสามารถเข้าโค้งได้ปลอดภัยมากขึ้น → เพิ่มคะแนนความปลอดภัย

เนื่องจากถนนทางโค้งในภูเขาที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และสภาพภูมิประเทศ ทำให้ไม่สามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มระดับดาวได้เต็มที่เหมือนถนนทางหลักในเขตเมือง อย่างไรก็ตามการเสนอมาตรการที่เหมาะสมสามารถยกระดับดาวจาก 1 ดาว เป็น 2 ถึง 3 ดาวได้ถือเป็นการลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุได้พอสมควร

5.สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้ดำเนินการประเมินความปลอดภัยทางถนนบนทางหลวงหมายเลข 120 ช่วง กม. 19+800 – กม. 20+200 ซึ่งเป็นเส้นทางภูเขาที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุ โดยใช้แนวทางการประเมินตามมาตรฐาน iRAP ผ่านโปรแกรม ViDA ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพของถนนและสิ่งแวดล้อม ผล

การประเมินพบว่าถนนช่วงดังกล่าวอยู่ในระดับความปลอดภัย 1 ดาว สำหรับผู้ใช้รถยนต์และรถจักรยานยนต์ ซึ่งจัดว่าอยู่ในกลุ่มเสี่ยงสูงต่อการบาดเจ็บและการเสียชีวิต โดยปัจจัยเสี่ยงสำคัญได้แก่ ลักษณะทางโค้งที่ลาดชัน ทัศนวิสัยที่จำกัด การขาดราวกันอันตราย และป้ายเตือนที่ยังไม่เพียงพอ

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับคู่มือการตรวจสอบความปลอดภัยถนนของกรมทางหลวงชนบท 2564 พบว่ามาตรการด้านความปลอดภัยในพื้นที่ศึกษายังมีข้อจำกัดหลายด้าน โดยเฉพาะในส่วนของการเสริมความปลอดภัยและการจัดการความเสี่ยงในสภาพพื้นที่ภูเขาที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ใช้สอยอย่างไรก็ตามหากมีการดำเนินการมาตรการปรับปรุงที่เหมาะสม เช่น การติดตั้งราวกันอันตรายในทางโค้ง การเสริมป้ายเตือนและไฟส่องสว่าง รวมถึงการปรับปรุงทัศนวิสัยถนน ก็จะสามารถยกระดับความปลอดภัยได้อย่างน้อย 1-2 ระดับดาว ซึ่งจะช่วยลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุรุนแรงและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้ถนนทุกกลุ่ม

นอกจากนี้ แนวทางการประเมินตามหลัก iRAP สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับถนนในพื้นที่ภูเขาอื่น เช่น ถนนภายในมหาวิทยาลัยพะเยา หรือถนนทางขึ้นเขาในจังหวัดใกล้เคียง เพื่อใช้ในการประเมินและจัดลำดับความเสี่ยงของเส้นทางภายในพื้นที่จำกัดที่มีลักษณะลาดชันและคดเคี้ยว โดยเฉพาะในบริเวณที่มีนักศึกษาและบุคลากรใช้เส้นทางร่วมกันระหว่างคนเดินเท้า จักรยานยนต์ และรถยนต์ ซึ่งการใช้เกณฑ์ iRAP ร่วมกับการสำรวจภาคสนามจะช่วยให้สามารถวางแผนมาตรการเชิงวิศวกรรมได้ตรงจุด และเป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานของถนนภายในสถาบันหรือพื้นที่เมืองภูเขาอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านปัจจัยสภาพอากาศ ควรพิจารณาเพิ่มเติมในกระบวนการประเมิน iRAP โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนหรือหมอกจัด ซึ่งทำให้ค่าทัศนวิสัยลดลงและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ รวมทั้งควรมีการบันทึกข้อมูล “ทิศทางขึ้นและลงเขา” ของถนนในการประเมิน เนื่องจากความลาดชันและแรงเฉื่อยของยานพาหนะมีผลต่อพฤติกรรมการเบรก การเข้าโค้ง และการควบคุมรถในแต่ละทิศทาง ข้อมูลส่วนนี้จะช่วยให้การให้ระดับดาวสะท้อนความเสี่ยงจริงของพื้นที่ภูเขาได้แม่นยำยิ่งขึ้น



สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไป แนะนำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องดำเนินการตามมาตรการที่กล่าวมาอย่างเป็นระบบ โดยควบคู่กับการบังคับใช้กฎหมายด้านความเร็ว การติดตามตรวจสอบสภาพถนนและอุปกรณ์จราจรอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการศึกษาเพิ่มเติมในพื้นที่ถนนภูเขาอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบและสร้างฐานข้อมูลเชิงวิชาการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรมีการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน (Benefit-Cost Ratio) เพื่อประกอบการตัดสินใจด้านนโยบายและการจัดสรรงบประมาณในอนาคต อันจะช่วยให้การปรับปรุงถนนในพื้นที่ภูเขามีความคุ้มค่าและยั่งยืนต่อไป

6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ แขนงทางหลวงชนบทพะเยา กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคมและอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์ พร้อมทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับบัณฑิตศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงคมนาคม, “ชุดข้อมูลอุบัติเหตุทางถนน ปี 2563: อุบัติเหตุบนโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคม ได้แก่ ทางหลวง ทางหลวงชนบท และทางด่วน, (Ministry of Transport, “Road Traffic Accidents 2020 dataset: Road network accidents under the Ministry of Transport on highways, rural highways, and expressways,”
- [2] International Road Assessment Programme (iRAP), iRAP Road Safety Manual. London, UK: iRAP, 2017.
- [3] กรมทางหลวง, คู่มือมาตรการด้านความปลอดภัยทางถนน. กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง, 2564.
(Department of Highways, Road Safety Measures Manual. Bangkok, Thailand: Department of Highways, 2021.)
- [4] รังสิยา และ พวงเพ็ชร, “การประเมินความปลอดภัยบริเวณจุดเสี่ยงบนทางหลวงแผ่นดิน,” 2563. (Rungsiyan, R., and Phongpetch, P., “Safety assessment of hazardous locations on national highways in Thailand,” 2020.)
- [5] อนุนันท์ จิตอารี และคณะ, “การประเมินความปลอดภัยทางถนนภายในมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงด้วยเกณฑ์ iRAP Star

Rating,” 2565. (Anuphan Chit-aree et al., “Road safety assessment at Mae Fah Luang University using iRAP star rating,” 2022.)

[6] ภูทริยา มีอุส่าห์, “การพัฒนาแนวทางการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนสำหรับรถจักรยานยนต์,” 2563.

(Phutriya Mee-ussah, “Development of a road safety inspection approach for motorcycles in Thailand,” 2020.)

[7] ณฐภพ อินหม่อม และ จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร, “การประเมินความปลอดภัยทางถนนในกรุงเทพมหานครด้วยระดับดาวของ iRAP,” 2562.

(Natthaphop Inmom and Chamras Phithaksarinkarn, “Road safety assessment in Bangkok using iRAP star rating system,” 2019.)

[8] ศิริวิชญ์ ชุ่มไชยพฤกษ์ และคณะ, “การประเมินความปลอดภัยทางถนนของกรมทางหลวงด้วยการให้คะแนนระดับดาวของ iRAP,” 2565.

(Sirawich Chumchaiphruet et al., “Road safety assessment of the Department of Highways using iRAP star rating for design,” 2022.)

[9] กรมทางหลวงชนบท, คู่มือการตรวจสอบความปลอดภัยสำหรับถนนที่เปิดให้บริการแล้ว, กรุงเทพฯ: กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม, 2564.

Department of Rural Roads, *Road Safety Audit Manual for In-Service Roads*, Bangkok: Department of Rural Roads, Ministry of Transport, 2021.



การศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ในเส้นทางภูเขาของถนน 4 ช่องจราจร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณGPS Study on Driving Behaviors on a Mountainous Four-Lane Highway by Using GPS Devices

นางสาวขวัญชนก ไจวงศ์^{1*} นางสาวขวัญชนก พวงกุหลาบ² นางสาวณัฐพร มาทา³ และนายพงษ์นรินทร์ ปานทอง⁴

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101429@up.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากถนนในพื้นที่ภูเขามีสภาพลาดชันและมีรัศมีความโค้งที่แคบ อาจส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุจากการสูญเสียการควบคุมของผู้ขับขี่ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่ โดยเลือกถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยาเป็นพื้นที่ศึกษา โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณGPS เพื่อบันทึกค่าพิกัด ความเร็ว และทิศทางของรถยนต์ส่วนบุคคลและรถโดยสารประจำทาง ผลการศึกษาพบว่า รถทั้ง 2 ประเภทมีการใช้ความเร็วเฉลี่ยที่สูงในช่วงทางลงเขา ส่งผลให้เกิดค่าความเร่งแนวยาวและความเร่งด้านข้างสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการขับขี่ที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียการควบคุม โดยเฉพาะในช่วงทางโค้งแคบที่ต้องอาศัยทักษะในการบังคับรถสูง นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงเวลาเร่งด่วน การขับขี่มีความเร่งแนวยาวอยู่ระหว่าง $2.7-7 \text{ m/s}^2$ เมื่อเทียบกับช่วงนอกเวลาเร่งด่วนอยู่ระหว่าง $1.5-3 \text{ m/s}^2$ ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการควบคุมรถที่ยากขึ้น ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการเพื่อเพิ่มความปลอดภัยบนถนนในพื้นที่ภูเขาที่มีช่องจราจรตั้งแต่ 4 ช่องขึ้นไป

คำสำคัญ: ถนนในพื้นที่ภูเขา, การวิเคราะห์ GPS, พฤติกรรมการขับขี่

Abstract

Since difficult driving control affected traffic accidents on mountainous highways caused by steep gradients and narrow curve radius. Therefore, the aim of this study is to analyze driving behavior on the entrance road to the University of Phayao. Driving data were collected using GPS devices to record the coordinates, speeds, and driving directions of personal cars and public buses. This study found that both types of vehicles

exhibited higher average speeds, longitudinal acceleration, and lateral acceleration in the downslope direction, which may result in a loss of driving control, particularly on short-radius curves. So drivers must have advanced their own skills. It was also found that during peak hours, the longitudinal acceleration ranged between $2.7-7 \text{ m/s}^2$, compared to $1.5-3 \text{ m/s}^2$ during off-peak hours, which indicates a higher risk of more difficult vehicle control. The study results can be implemented in the guidelines to increase safety on multi-lane mountainous highways.

Keywords: Mountainous highway, GPS analysis, Driving behaviors

1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การศึกษาพฤติกรรมการขับขี่บนถนนภูเขามีความสำคัญ เนื่องจากลักษณะเฉพาะของถนนที่มีความลาดชัน โค้งรัศมีแคบ และทัศนวิสัยที่จำกัด ส่งผลต่อความยากลำบากในการควบคุมยานพาหนะและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ นอกจากนี้ สภาพอากาศ เช่น การมีหมอกลงจัดหรือฝนตกหนัก ยังเป็นปัจจัยที่ทำให้การขับขี่มีความลำบากเพิ่มมากขึ้น

จากข้อมูลสรุปอุบัติเหตุของกรมทางหลวงในปี 2567 [1] พบว่าอุบัติเหตุบนทางหลวงที่มีลักษณะภูมิประเทศแบบภูเขาและลาดชันมีแนวโน้มสูงกว่าถนนในพื้นที่ราบ โดยมีรายงานการเกิดอุบัติเหตุจำนวนมากในช่วงฝนตกหรือกลางคืน เนื่องจากการขับขี่รถด้วยเร็วสูงเกินกฎหมายกำหนด ดังนั้นการศึกษาและการเสนอมาตรการเพื่อแก้ไขปัญหานี้สามารถบ่งชี้ถึงความสำคัญของพฤติกรรมการขับขี่ได้



การจราจรบนถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา มีความสำคัญต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการเดินทางของทั้งนักศึกษา บุคลากร และประชาชนทั่วไปเนื่องจากถนนดังกล่าวตั้งอยู่ในพื้นที่ภูมิประเทศแบบภูเขา ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดลักษณะการขับขี่ที่มีความแตกต่างจากถนนในพื้นที่ราบ เช่น การใช้ความเร็วไม่เหมาะสม การเปลี่ยนช่องจราจรกะทันหัน หรือการไม่ปฏิบัติตามกฎจราจร

ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน การใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS ในการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการขับขี่ของผู้ใช้ถนนนั้นมีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง ข้อมูลที่ได้สามารถสะท้อนถึงพฤติกรรมการใช้ถนน เช่น ความเร็วเฉลี่ย ระยะเวลากการเดินทาง และจุดที่เกิดการเร่งหรือชะลอความเร็ว นอกจากนี้ ข้อมูลเหล่านี้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมเสี่ยงที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ เช่น การกำหนดมาตรการที่จะช่วยลดพฤติกรรมเสี่ยงในการขับขี่บนเส้นทางภูเขา เพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ถนน และลดความรุนแรงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเก็บรวบรวมข้อมูลจาก GPS เพื่อศึกษาพฤติกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขาของผู้ใช้ถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา เช่น การขับรูดสายไปมา ทำให้เกิดความเร่งด้านข้าง และการขับรดด้วยความเร็วที่แปรผันบ่อยครั้ง หรือการเปลี่ยนช่องจราจรบ่อยครั้ง อาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนี้ยังได้มีการเสนอแนวทางปรับปรุงเส้นทางหรือพฤติกรรมการขับขี่เพื่อส่งเสริมความปลอดภัยและลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขาของถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา โดยใช้ข้อมูลจาก GPS

1.2.2 เพื่อระบุพฤติกรรมการขับขี่ที่เสี่ยงอาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ และเสนอแนวทางการแก้ไข เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่

1.3 ขอบเขตการศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศแบบภูเขา ถนนสายนี้เป็นเส้นทางหลักที่ใช้สำหรับการเดินทางเข้าและออกจากมหาวิทยาลัยพะเยา โดยมีการสัญจรของทั้งนักศึกษา บุคลากรและประชาชนทั่วไปที่ใช้เส้นทางนี้เป็นประจำ

ลักษณะของถนนในพื้นที่ศึกษามีความลาดชันในบางช่วง และมีโค้งหลายจุด ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรม การขับขี่ของผู้ใช้รถใช้ถนน นอกจากนี้ สภาพอากาศในพื้นที่ยังส่งผลต่อทัศนวิสัย เช่น ในช่วงฤดูฝนหรือฤดูหนาว อาจมีหมอกลงหนาขึ้น ทำให้การขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ

จากลักษณะภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยาจึงเป็นเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาและ

รวบรวมข้อมูลพฤติกรรมการขับขี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เครื่องมือรับสัญญาณ GPS ในการตรวจสอบพฤติกรรมการใช้ความเร็ว ความเร่งหรือการเบรกกะทันหัน และรูปแบบการขับขี่ในสภาพถนนที่อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ที่ผ่านเส้นทางทั้งหมด 7 โค้ง รวมระยะทาง 1.8 กิโลเมตร ทั้ง 2 ทิศทาง โดยแยกศึกษาพฤติกรรมตามประเภทรถทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล และรถโดยสารประจำทางของมหาวิทยาลัย ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลจะเน้นช่วงเวลาที่มีการจราจรหนาแน่น เช่น ในเวลาช่วงเช้า 7.00-9.00 น. และช่วงเวลาที่มีการจราจรเบาบางก่อน 16.00 น. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาได้จากการสุ่มเลือกจากผู้เดินทางเข้าออกมหาวิทยาลัยพะเยา โดยไม่ได้จำกัดคุณลักษณะเฉพาะ เช่น เพศ อายุ หรือประเภทบุคคลว่าเป็นนักศึกษาหรือเป็นบุคลากร

ลักษณะของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ ประกอบด้วย พิกัดตำแหน่ง ความเร็ว ณ เวลานั้นๆ และการเปลี่ยนทิศทาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุ

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พฤติกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขา

การขับขี่บนเส้นทางภูเขามีสลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากการขับขี่บนถนนทางราบ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้ขับขี่ เช่น ความลาดชันของถนน โค้งหักศอก ทัศนวิสัยที่จำกัด และสภาพอากาศที่แปรปรวน ซึ่งพฤติกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขาสามารถแบ่งออกเป็น 7 หัวข้อหลัก ได้แก่

- 1.การควบคุมความเร็ว
- 2.การเข้าโค้งและการควบคุมพวงมาลัย
- 3.การเปลี่ยนช่องจราจรและการแซง
- 4.การใช้เบรกและเกียร์
- 5.ปัจจัยทางจิตวิทยาและพฤติกรรมการตัดสินใจ
- 6.ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศ
- 7.พฤติกรรมที่ส่งผลต่ออุบัติเหตุในเส้นทางภูเขา

2.1.2 เทคโนโลยี GPS ในการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ [2]

Global Positioning System (GPS) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ โดยเฉพาะในการติดตามและวิเคราะห์ลักษณะการขับขี่บนเส้นทางภูเขา เทคโนโลยีชนิดนี้ช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่และเวลาได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในประเมินพฤติกรรมของผู้ขับขี่ รวมถึงความปลอดภัยในการขับขี่

ระบบ GPS ใช้เครือข่ายดาวเทียมเพื่อตรวจจับตำแหน่งของยานพาหนะในรูปของพิกัดละติจูด (Latitude) และลองจิจูด (Longitude)



ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปประมวลผลเพื่อคำนวณพฤติกรรมการขับขี่ในหลายมิติ เช่น ความเร็ว ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลง และเส้นทางที่ใช้อุปกรณ์ GPS ที่ใช้ในการศึกษา

1. GPS Logger – อุปกรณ์บันทึกพิกัดตำแหน่งต่อเนื่องโดยไม่มีการเชื่อมต่อแบบเรียลไทม์
 2. GPS Tracker แบบเรียลไทม์ – ส่งข้อมูลตำแหน่งไปยังเซิร์ฟเวอร์แบบทันทีผ่านเครือข่ายมือถือ
 3. GPS Sensor ในยานพาหนะ (OBD-II หรือ CAN Bus) – ตรวจจบบันทึกข้อมูลจากระบบภายในของรถยนต์ เช่น ค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM) อัตราเร่ง และการเบรก
- GPS สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษากฎการจราจรบนท้องถนนในเส้นทางภูเขาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ GPS

ประเภทข้อมูล	รายละเอียด
ตำแหน่ง (Location)	ระบุพิกัดของรถยนต์บนแผนที่ตลอดเวลา
ความเร็ว (Speed)	ตรวจจบบันทึกความเร็วของรถยนต์ขณะขับขี่
อัตราเร่ง (Acceleration)	วิเคราะห์การเร่งความเร็วและการชะลอรถ
ทิศทางเคลื่อนที่ (Heading)	บอกทิศทางที่รถกำลังมุ่งไป
ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (Altitude)	ใช้ประเมินระดับความลาดชันของเส้นทาง
ระยะทางที่ขับขี่ (Distance Traveled)	วัดระยะทางที่ขับขี่ทั้งหมด
จุดที่มีการเปลี่ยนแปลง (Event Point)	เช่น การเบรกกะทันหัน การเร่งความเร็ว หรือการเข้าโค้ง

ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผู้ขับขี่ในเส้นทางภูเขา เช่น 1.การใช้ความเร็ว 2.การเบรกกะทันหันบนทางลาดชัน 3.พฤติกรรมการเร่งแซงในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง 4.รูปแบบการขับขี่ในสภาพถนนที่แตกต่างกัน เช่น ทางลาดชันกับทางราบ

2.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดอุบัติเหตุ [3]

1) ทฤษฎีโดมิโน (Domino Theory)

Heinrich (1931) เป็นผู้คิดทฤษฎีโดมิโน ซึ่งอธิบายว่าอุบัติเหตุเกิดขึ้นเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่คล้ายกับโดมิโนที่เรียงกัน 5 ตัว เมื่อตัวหนึ่งล้มย่อมมีผลทำให้ตัวโดมิโนตัวถัดไปล้มตามกันเป็นลูกโซ่ โดยมี 5 ปัจจัยหลักได้แก่

1. สภาพแวดล้อมหรือภูมิหลังของบุคคล (Social Environment of Background)
2. ความบกพร่องผิดปกติของบุคคล (Defects of Person)
3. การกระทำหรือสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัย (Unsafe Acts/Unsafe Conditions)

4. อุบัติเหตุ (Accident)

5. การบาดเจ็บหรือเสียหาย (Injury/Damages)

2) ทฤษฎีความเอนเอียงในการเกิดอุบัติเหตุ (Accident-Proneness Theory)

Thygeson (1979) [4] อธิบายทฤษฎีนี้ว่า ความแตกต่างระหว่างการเกิดอุบัติเหตุบ่อยครั้ง และความโน้มเอียงที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุซ้ำ ๆ คือการที่บุคคลบางคนประสบอุบัติเหตุมากกว่าคนอื่น ๆ หรือมีความไวต่อการเกิดอุบัติเหตุ ความโน้มเอียงที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ 2 ประเภท ได้แก่

1. ความโน้มเอียงที่จะเกิดอุบัติเหตุที่มีกำหนดเวลาในช่วงสั้นๆ โดยเกิดผลในระยะวิกฤต
2. ความโน้มเอียงที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุของแต่ละบุคคล

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษฎา อนันตกาลต์ (2559) [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลในเขตชุมชนเมืองกรุงเทพมหานคร โดยใช้เครื่องมือวัด GPS ควบคู่กับแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างผู้ขับขี่จำนวน 267 คน งานวิจัยนี้มีความเกี่ยวข้องในด้านการใช้เทคโนโลยี GPS เพื่อเก็บข้อมูลพฤติกรรมการขับขี่ เช่น ความเร็ว ระยะทาง และรูปแบบการขับขี่ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยฉบับนี้ที่ใช้ GPS เป็นเครื่องมือหลักในการเก็บข้อมูลพฤติกรรมของผู้ใช้ถนนบริเวณมหาวิทยาลัยพะเยา นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังพบว่าพฤติกรรมการขับขี่ที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยส่วนบุคคล โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ที่มีอายุน้อยหรือมีประสบการณ์น้อย มักขับรถด้วยความเร็วสูงและแสดงพฤติกรรมเสี่ยงมากกว่ากลุ่มอื่น

ชนิดา ไสสุขสอาด (2561) [6] ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติในพื้นที่ทางภูเขามอเตอร์เวย์ 118 (เชียงใหม่-เชียงใหม่) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีช่วยในการตรวจจับความเร็วสามารถลดพฤติกรรมเสี่ยงจากการใช้ความเร็วเกินกำหนดได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงมีความเกี่ยวข้องในแง่ของการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ในพื้นที่ที่มีความลาดชันและความเสี่ยงสูงและชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมการขับขี่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีปัจจัยกระตุ้น เช่น การติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติในพื้นที่เสี่ยง

กฤษณะ เจริญมี (2560) [7] ศึกษาพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงนอกเขตเมือง พบว่าผู้ขับขี่มีแนวโน้มใช้ความเร็วเกินกำหนด โดยเฉพาะในเวลากลางคืน และถนนที่มีช่องจราจรน้อย งานวิจัยนี้สะท้อนพฤติกรรมการขับขี่ในพื้นที่ที่ถนนมีลักษณะคล้ายกับถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา ทั้งในด้านลักษณะทางกายภาพของถนนที่มีช่องจราจรจำกัด สภาพแวดล้อมที่ไม่ปลอดภัย และช่วงเวลาการใช้งานถนนที่หลากหลาย ซึ่งอาจส่งผลต่อแนวโน้มการใช้ความเร็วที่มากเกินไปในบริเวณดังกล่าว

Karen M. Sentoff (2015) [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ของอาสาสมัครจำนวน 82 คนในสหรัฐอเมริกา โดยติดตั้งอุปกรณ์ GPS



และเครื่องบันทึก OBD เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการขับขี่จริงในชีวิตประจำวัน ข้อมูลจาก GPS ถูกใช้เพื่อวัดความเร็ว อัตราเร่ง การเบรก และเส้นทางที่ใช้ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุรูปแบบพฤติกรรมการขับขี่ของแต่ละบุคคลได้อย่างละเอียด เช่น การเบรกกระทันหันหรือการเร่งความเร็วอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่อาจนำไปสู่ความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของข้อมูล GPS ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่เชิงลึก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการส่งเสริมความปลอดภัยบนท้องถนน

Yahui Wang (2020) [9] ได้ศึกษาลักษณะภูเขาทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ของจีน โดยเชื่อมโยงกับพฤติกรรมของมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม แม้งานวิจัยนี้จะเน้นด้านสิ่งแวดล้อมมากกว่าการจราจรโดยตรง แต่สามารถเชื่อมโยงกับแนวทางการพิจารณาสภาพแวดล้อมของถนน ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่ในพื้นที่ภูเขา โดยเฉพาะลักษณะภูมิประเทศที่มีความชันและคดเคี้ยว อาจส่งผลให้ผู้ขับขี่ต้องลดความเร็วหรือเพิ่มความระมัดระวังในการขับขี่มากขึ้น นอกจากนี้ แนวทางของงานวิจัยยังชี้ให้เห็นว่า ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ความลาดเอียง ความเร็วและความเร่ง มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการขับขี่ ไม่ว่าจะเป็นมุมของการใช้พื้นที่หรือการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่นั้น หากนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาเส้นทางภูเขาในบริบทของการจราจร จะช่วยให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้นว่าทำไมผู้ขับขี่จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนพฤติกรรม เช่น การใช้ความเร็วต่ำลง หรือหลีกเลี่ยงการขับขี่ด้วยความประมาทในบริเวณที่มีลักษณะภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับเป้าหมายของการศึกษาค้นคว้า ที่เน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ขับขี่บนถนนทางข้ามมหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งตั้งอยู่ในลักษณะภูมิประเทศแบบภูเขา และมีลักษณะทางกายภาพที่อาจกระทบต่อพฤติกรรมการขับขี่

Barmounakis, E. N., & Geroliminis, N. (2020) [10] ศึกษาความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์พลวัตของการจราจรและการพยากรณ์เวลาเดินทางในเขตเมืองที่มีความซับซ้อน โดยใช้ข้อมูลจากยานพาหนะที่ติดตั้งระบบ GPS (probe vehicle data) การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความเร็วของรถ ความหนาแน่นของการจราจร และช่วงเวลาที่เกิดความแออัด โดยประเมินจากข้อมูลการขับขี่จริงที่บันทึกผ่านอุปกรณ์ GPS ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลจาก รถที่ติดตั้ง GPS สามารถใช้วิเคราะห์รูปแบบพฤติกรรมการขับขี่และการจราจรได้อย่างแม่นยำ แม้ในพื้นที่เมืองที่มีลักษณะซับซ้อน งานวิจัยนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่โดยใช้ระบบติดตามตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของงานวิจัยฉบับนี้ที่ศึกษาพฤติกรรมการขับขี่บนถนนหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยด้านลักษณะทางกายภาพของถนน พฤติกรรมของผู้ขับขี่ และการใช้เทคโนโลยีในการเก็บข้อมูล ล้วนมีบทบาทสำคัญต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ถนนขรุขระหรือภูเขา เช่น ถนนทางข้ามมหาวิทยาลัยพะเยา การศึกษาก่อนหน้านี้ได้ใช้เทคโนโลยี GPS และกล้องตรวจจับความเร็วเพื่อประเมินรูปแบบการใช้ความเร็ว อัตราเร่ง และพฤติกรรมเสี่ยงต่าง ๆ ทั้งนี้ ข้อมูลจากอุปกรณ์เหล่านี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่ได้อย่าง

แม่นยำและสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงบนท้องถนน อีกทั้งยังชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการพิจารณาสภาพภูมิประเทศและพฤติกรรมเฉพาะพื้นที่ เพื่อสนับสนุนการออกแบบมาตรการด้านความปลอดภัยที่เหมาะสม

3 วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษากิจกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขาโดยใช้ GPS มีขั้นตอนการดำเนินการในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการการศึกษาพฤติกรรมการขับขี่

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลจาก GPS

การเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการขับขี่บนเส้นทางภูเขา โดยมุ่งเน้นถนนทางข้ามมหาวิทยาลัยพะเยาซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศลาดชันและมีโค้งหลายจุด การเก็บข้อมูลจึงออกแบบให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของผู้ขับขี่ในสภาพแวดล้อมจริง โดยใช้เทคโนโลยี GPS เป็นเครื่องมือหลักในการติดตามและบันทึกข้อมูลการขับขี่

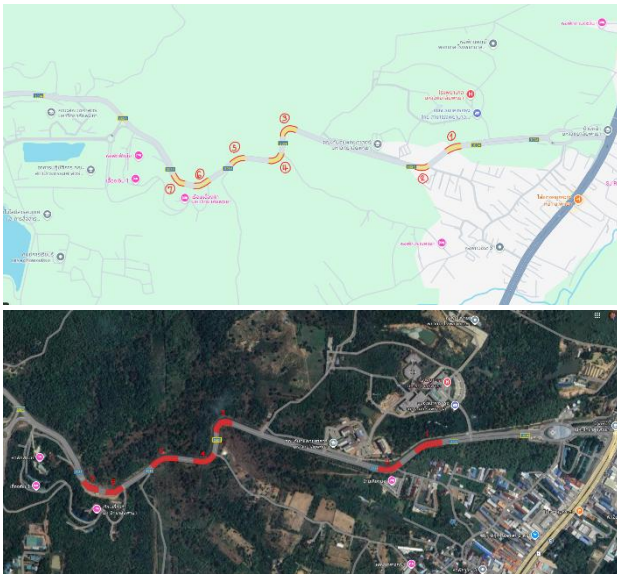
1. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลพฤติกรรมการขับขี่ใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS สามารถบันทึกข้อมูลได้ทั้งด้านพิกัดตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางการเคลื่อนที่ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุพฤติกรรมที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ เช่น การใช้ความเร็วเกินกำหนด การเบรกกระทันหัน การเร่งความเร็วในโค้ง หรือการเปลี่ยนช่องจราจรกระทันหันในพื้นที่ที่มีทัศนวิสัยจำกัด



2. ลักษณะของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือถนนทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา ระยะทางประมาณ 1.8 กิโลเมตร ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศแบบภูเขา และมีโค้งทั้งหมด 7 โค้ง ถนนสายนี้เป็นถนน 4 ช่องจราจร ที่มีการจราจรหนาแน่นในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าระหว่าง 07.00–09.00 น. และช่วงนอกเวลาเร่งด่วนก่อนเวลา 16.00 น. เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมรถขับขึ้นที่ครอบคลุมทุกช่วงเวลาดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พื้นที่ขอบเขตการศึกษา

3. กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลได้แก่ ผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลและรถโดยสารประจำทางที่เดินทางเข้า-ออกมหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งสุ่มจากผู้ใช้งานทั่วไปโดยไม่จำกัดเพศ อายุ หรือสถานะเป็นนักศึกษา/บุคลากร เพื่อให้สะท้อนพฤติกรรมรถขับขึ้นในภาพรวมของเส้นทาง

4. การควบคุมคุณภาพของข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลตำแหน่งพิกัดบริเวณทางเข้ามหาวิทยาลัยพะเยา ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม Garmin eTrex 10 ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบพกพาที่สามารถบันทึกข้อมูลตำแหน่งได้แบบ Real-time โดยมีความถี่ในการบันทึก 1 เฮิรตซ์ (1 Hz) หรือ 1 ครั้งต่อวินาที ทำให้สามารถเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ ทั้งนี้สัญญาณที่ใช้เป็นระบบ GPS (Global Positioning System) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งประมาณ 3–5 เมตรภายใต้สภาพท้องฟ้าเปิด ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมรถขับขึ้นในพื้นที่ภูเขาอย่างมีประสิทธิภาพ

ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ GPS และทำความสะอาดข้อมูลเบื้องต้น เช่น การลบข้อมูลซ้ำหรือค่าผิดปกติ รวมถึงการจับคู่ข้อมูลเชิงพิกัดกับลักษณะทางกายภาพของถนน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้เทคโนโลยี GPS ในครั้งนี้ ช่วยให้สามารถ

วิเคราะห์พฤติกรรมรถขับขึ้นเส้นทางภูเขาได้อย่างละเอียดและแม่นยำ สามารถนำไปวางแผนทางการป้องกันอุบัติเหตุและปรับปรุงความปลอดภัยในการใช้ถนนต่อไป

3.2 การวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลพฤติกรรมรถขับขึ้นที่ได้จาก GPS

การวิเคราะห์ข้อมูลพฤติกรรมรถขับขึ้นในเส้นทางภูเขาโดยอาศัยข้อมูลจาก GPS ถือเป็นวิธีที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในเชิงพื้นที่และเวลา ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ GPS จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อประเมินพฤติกรรมรถขับขึ้นในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วช่วงเข้าโค้ง เช่น ก่อนเข้าโค้ง จุดเข้าโค้ง และพ้นโค้ง ระดับความชัน ความเร่งแนวยาว และ ความเร่งด้านข้าง

ข้อมูลจาก GPS สามารถนำมาคำนวณความเร่งด้านข้างโดยนำค่าระยะห่างระหว่าง 2 จุด และค่าพิกัดมุมโค้งแบบเรเดียนมาคำนวณ เพื่อประเมินพฤติกรรมรถขับขึ้นของแต่ละโค้ง โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ [11] ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$r_{12} = |\vec{r}_{12}| = |([x_2 - x_1]\vec{i})^2 + ([y_2 - y_1]\vec{j})^2| \quad (1)$$

โดยที่ $\vec{R}_{12}$ = เวกเตอร์พิกัดฉากระหว่างตำแหน่งเริ่มต้น (x_1, y_1) กับ สิ้นสุด (x_2, y_2)

r_{12} = ขนาดของเวกเตอร์พิกัดฉากระหว่าง 2 ตำแหน่ง

$\vec{r}_{12}$ = เวกเตอร์ที่ชี้จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2

$\vec{i}$ และ $\vec{j}$ = เวกเตอร์หน่วยตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ

x และ y = ค่าพิกัดเชิงระนาบของแต่ละจุด โดยใช้ค่าพิกัดในระบบ UTM ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร

$$Lat. Acc = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \left(\frac{r_{12}}{t_2 - t_1} \right) \quad (2)$$

โดยที่ $Lat. Acc$ = ความเร่งด้านข้าง (m/sec²)

r_{12} = ขนาดของเวกเตอร์พิกัดฉากระหว่าง 2 ตำแหน่ง

θ_1 และ θ_2 = ทิศทางของรถที่หันตามมุมในหน่วยเรเดียนที่ตำแหน่งพิกัดเริ่มต้น (x_1, y_1) และ สิ้นสุด (x_2, y_2) ตามลำดับ

t_1 และ t_2 = เวลาที่บันทึกได้ที่ตำแหน่งพิกัดเริ่มต้น (x_1, y_1) และ

สิ้นสุด (x_2, y_2) ตามลำดับ

x และ y = ค่าพิกัดเชิงระนาบของแต่ละจุด โดยใช้ค่าพิกัดในระบบ UTM ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร

การหาความเร่งแนวยาว (Longitudinal Acceleration) คือ ความเร่งที่เกิดขึ้นตามแนวทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ (ไปข้างหน้าหรือถอยหลัง) สามารถคำนวณได้สมการที่ (3)

$$a_{long, acc} = \frac{v_t - v_{t-\Delta t}}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$

โดยที่ $a_{long, acc}$ = ความเร่งแนวยาว (Long Acc)(m/s²)

v_t = ความเร็ว ณ เวลา t (m/s)

$v_{t-\Delta t}$ = ความเร็ว ณ เวลาที่ผ่านมา (m/s)

Δt = ช่วงเวลาที่ต่างกัน(s)



ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับคาบ (frequency ,period) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

โดยที่ f = ความถี่ หรือ จำนวนรอบที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ใน 1 หน่วยเวลา (Hz)
 T = คาบ หรือ ช่วงเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ

3.3 การเสนอแนะแนวทางลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ [12]

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมรถที่ขับขึ้นเส้นทางภูเขา พบว่าปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ได้แก่ ความเร็วที่ไม่เหมาะสม การเบรกกะทันหัน และการเปลี่ยนช่องจราจรโดยไม่ชะลอความเร็ว ดังนั้นจึงสามารถเสนอแนวทางเพื่อลดความเสี่ยงได้ดังนี้

- รมรณรงค์การขับขี่ให้ปลอดภัย โดยเน้นเกี่ยวกับเส้นทางภูเขา เช่น การควบคุมความเร็วขณะเข้าโค้ง
- ติดตั้งป้ายแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนถึงโค้งอันตราย รวมถึงป้ายจำกัดความเร็วในแต่ละช่วงโค้ง
- ติดตั้งไฟส่องสว่างและเครื่องหมายสะท้อนแสงในจุดที่มีทัศนวิสัยจำกัด โดยเฉพาะในช่วงกลางคืนหรือหมอกลงจัด
- กำหนดมาตรการควบคุมความเร็วโดยใช้กล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติในบริเวณที่มีสถิติอุบัติเหตุสูง

การดำเนินการมาตรการเหล่านี้จะช่วยลดพฤติกรรมเสี่ยงในการขับขึ้นเส้นทางภูเขา เพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ถนน และลดความรุนแรงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

4 ผลการศึกษา

ผู้วิจัยได้แบ่งผลการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ ผลของพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นในแต่ละโค้งของรถแต่ละประเภท และ ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นในแต่ละช่วงเวลา

4.1 ผลของพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นในแต่ละโค้งของรถแต่ละประเภท

ตารางที่ 1 พฤติกรรมรถที่ขับขึ้นในแต่ละช่วงโค้งของรถส่วนบุคคล และรถบัสประจำทางของมหาวิทยาลัย ทั้ง 2 ทิศทาง

รถส่วนบุคคล												
โค้ง	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down
ความเร็วขณะเข้าโค้ง (km/h)	35	53	39	46	29	42	38	39	38	42	32	39
ความเร็วขณะออกจากโค้ง (km/h)	37	49	35	38	27	36	35	34	37	36	33	36
ความเร็วขณะเข้าโค้ง (km/h)	40	50	38	44	28	43	36	31	37	41	34	38
ความเร็วขณะออกจากโค้ง (km/h)	0.83	4.17	0.83	4.17	0.83	4.17	0.83	4.17	0.83	4.17	0.83	4.17
ความเร็วขณะเข้าโค้ง (km/h)	-0.52	-1.01	-0.03	0.39	-0.91	-1.38	0.80	1.14	-0.43	-0.76	0.56	1.03
ความเร็วขณะออกจากโค้ง (km/h)												

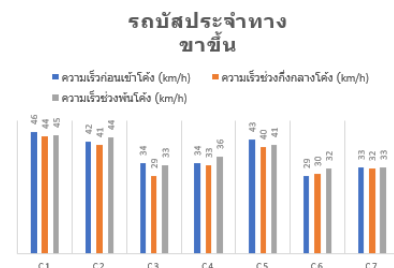
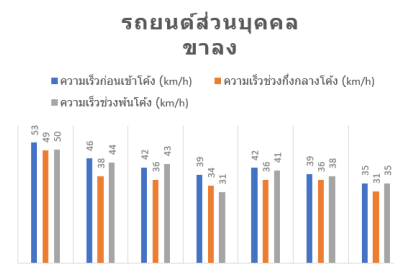
(หมายเหตุ C คือตำแหน่งในแต่ละช่วงโค้ง)

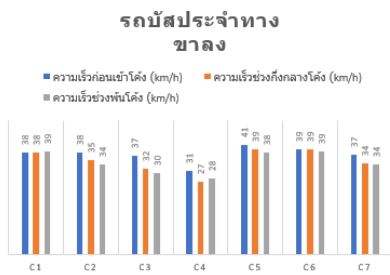
จากผลของพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าในแต่ละโค้งมีความแตกต่างกันระหว่างรถส่วนบุคคลและรถบัสโดยสารประจำทาง โดยในกรณีของรถส่วนบุคคล ความเร็วขณะเข้าและออกโค้งมี

ค่าที่สูงกว่าโค้งอื่นๆ โดยเฉพาะช่วงโค้ง C1 และ C2 ที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าช่วงโค้งอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร่งด้านข้าง (lateral acceleration) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยสะท้อนถึงลักษณะการควบคุมพวงมาลัยและการปรับสมดุลของผู้ขับขี่ ความเร่งแนวยาว (longitudinal acceleration) ของรถยนต์ส่วนบุคคลจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่เข้าโค้ง ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อออกจากโค้ง แสดงถึงการใช้เบรกและการเร่งเพื่อปรับความเร็วในแต่ละช่วง

สำหรับรถบัสโดยสารประจำทาง พบว่าพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นมีลักษณะที่มากกว่ารถส่วนบุคคล ความเร็วเฉลี่ยในการเข้าและออกโค้งมีค่าที่ต่ำกว่า เพื่อความปลอดภัยและความมั่นคงของรถที่มีขนาดใหญ่ ค่าความเร่งด้านข้างมีค่าที่น้อยกว่ารถส่วนบุคคล ขณะที่ค่าความเร่งแนวยาวมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับรถส่วนบุคคล แสดงให้เห็นว่าผู้ขับรถบัสโดยสารประจำทางเน้นความนุ่มนวลในการควบคุมและลดการเร่งหรือเบรกกะทันหัน จากผลข้อมูลในตารางที่ 1 สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างด้านพฤติกรรมรถที่ขับขึ้นตามประเภทของรถ โดยรถส่วนบุคคลเน้นความคล่องตัวและความเร็วในการขับขี่ ในขณะที่รถบัสโดยสารประจำทางเน้นความปลอดภัยและความมั่นคงในการเข้าโค้งแต่ละช่วง

ความเร็ว





รูปที่ 3 พฤติกรรมการใช้ความเร็วขณะขับขึ้นในแต่ละช่วงโค้งของรถยนต์ส่วนบุคคลและรถบัสโดยสารประจำทาง ทั้ง 2 ทิศทาง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 3 พบว่ารถยนต์ส่วนบุคคลและรถบัสโดยสารประจำทางมีพฤติกรรมการขับขึ้น โดยพิจารณาความเร็วเฉลี่ยทั้ง 3 ช่วง ได้แก่ ความเร็วก่อนเข้าโค้ง ความเร็วช่วงกึ่งกลางโค้ง และความเร็วช่วงพ้นโค้ง ผลการวิเคราะห์พบว่ารถยนต์ส่วนบุคคลและรถบัสโดยสารประจำทางมีรูปแบบการปรับความเร็วที่แตกต่างกัน ทั้งในเส้นทางขาขึ้นและขาลง

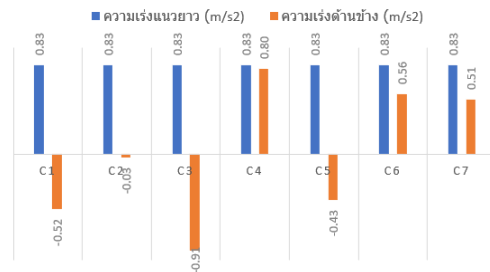
สำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลในช่วงขาขึ้น พบว่าความเร็วก่อนเข้าโค้งจะอยู่ในช่วงประมาณ 32–38 km/h และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงพ้นโค้ง โดยเฉพาะในโค้ง C1 และ C2 ที่ความเร็วช่วงพ้นโค้งสูงกว่าก่อนเข้าโค้งอย่างชัดเจน แสดงถึงพฤติกรรมการเร่งหลังผ่านโค้งเพื่อกลับเข้าสู่ความเร็วการเดินทางปกติ อย่างไรก็ตาม ในโค้งที่มีความชันหรือความโค้งเด่นชัด เช่น C3 พบว่าความเร็วจะลดลงมากในช่วงกลางโค้งและยังไม่สามารถเร่งกลับขึ้นได้เต็มที่ในช่วงพ้นโค้ง ในทางกลับกัน เส้นทางขาลงของรถยนต์ส่วนบุคคลมีค่าความเร็วสูงกว่าขาขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะโค้ง C1 ที่ความเร็วก่อนเข้าโค้งเฉลี่ยสูงถึง 52 km/h และยังคงรักษาความเร็วในระดับสูงตลอดช่วงของโค้ง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลต่อการเพิ่มความเร็วขณะขับขึ้นทางลาดชัน แต่ในโค้ง C2 และ C4 พบการลดความเร็วลงในช่วงกลางโค้งเพื่อควบคุมการเข้าโค้งอย่างปลอดภัย

สำหรับรถบัสโดยสารประจำทางในเส้นทางขาขึ้น มีรูปแบบการควบคุมความเร็วที่แตกต่างจากรถยนต์ส่วนบุคคล โดยมีการรักษาความเร็วได้ในระดับปานกลาง 33–45 km/h แต่ไม่เพิ่มความเร็วสูงมากในช่วงพ้นโค้ง ความเร็วที่ลดลงชัดเจนพบในโค้ง C3 และ C6 ซึ่งเป็นจุดที่ผู้ขับขี่ต้องชะลอรถมากกว่าปกติเนื่องจากข้อจำกัดของตัวรถที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ในขณะที่รถบัสโดยสารประจำทางในเส้นทางขาลงกลับแสดงลักษณะการรักษาความเร็วในระดับใกล้เคียงกันตลอดทั้งสามช่วงของโค้ง โดยส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 32–41 km/h ต่างจากรถยนต์ส่วนบุคคลที่มีการเร่งความเร็วสูงมากในบางโค้ง ลักษณะนี้สะท้อนถึงพฤติกรรมการขับที่เน้นความปลอดภัยและความมั่นคงของรถบัสโดยสารประจำทาง ซึ่งมีผลต่อผู้โดยสารและความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองประเภทของยานพาหนะ พบว่ารถยนต์ส่วนบุคคลมีแนวโน้มที่จะปรับความเร็วตามสภาพโค้งอย่างยืดหยุ่นมากกว่า โดยสามารถเร่งความเร็วสูงทั้งในช่วงพ้นโค้งขาขึ้นและตลอดช่วงโค้งขาลง ในขณะที่รถบัสโดยสารประจำทางมีข้อจำกัดทางด้านการเร่งและการควบคุม ทำให้ต้องรักษาความเร็วใน

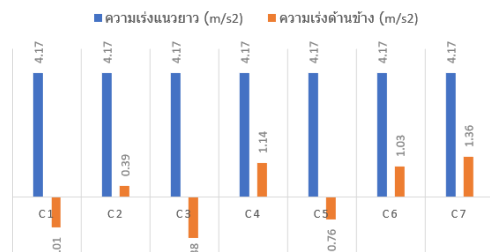
ระดับที่คงที่มากกว่า โดยเฉพาะในโค้งที่มีความชันหรือมีความเสี่ยงสูง พฤติกรรมดังกล่าว ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการขับขึ้นที่ตามประเภทของยานพาหนะ และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณามาตรการด้านความปลอดภัยทางถนนในอนาคตได้

ความเร็ว

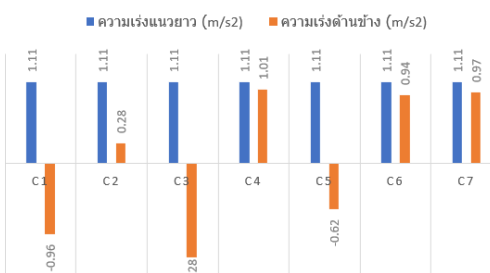
รถยนต์ส่วนบุคคล ขาขึ้น



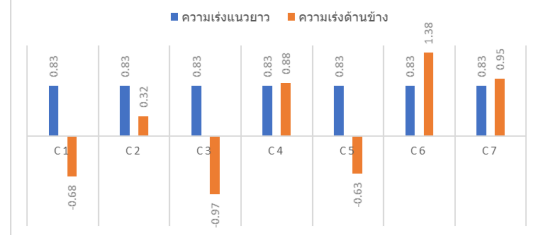
รถยนต์ส่วนบุคคล ขาลง



รถบัสประจำทาง ขาขึ้น



รถบัสประจำทาง ขาลง



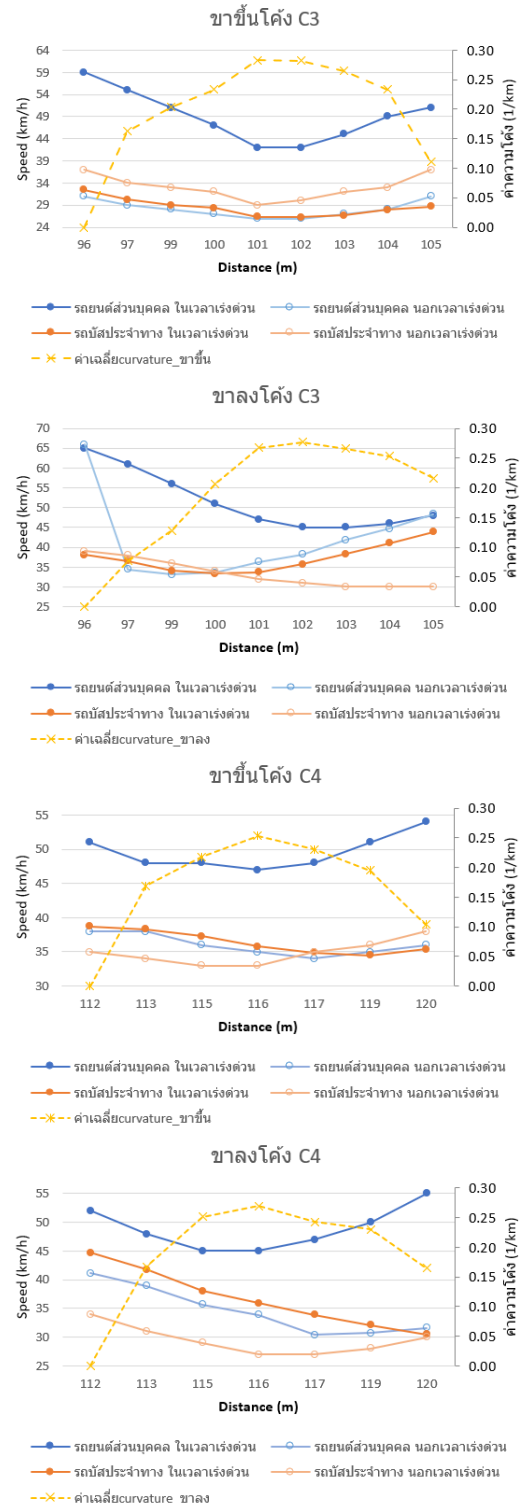
รูปที่ 4 ความเร่งแนวยาวและความเร่งด้านข้างของรถยนต์ส่วนบุคคลและรถบัสโดยสารประจำทางในแต่ละช่วงโค้ง ทั้ง 2 ทิศทาง



จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 4 พบว่ารถยนต์ส่วนบุคคลมีรูปแบบการขับขี่ที่แสดงถึงความคล่องตัวและการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือ ในช่วงขาขึ้น ค่าความเร่งแนวยาวมีความคงที่ที่ประมาณ 0.83 m/s^2 เกือบทุกโค้ง สะท้อนให้เห็นถึงการใช้กำลังเครื่องยนต์เพื่อรักษาความเร็วในเส้นทางลาดชัน อย่างไรก็ตาม ค่าความเร่งด้านข้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด ทั้งในทิศทางบวกและลบ เช่น โค้ง C3 มีค่า -0.91 m/s^2 และโค้ง C6 มีค่า 0.56 m/s^2 ซึ่งเป็นผลจากการใช้เบรกและการหักเลี้ยวเพื่อปรับทิศทางรถในขณะที่ยังคงพบว่ามีค่าความเร่งแนวยาวมีค่าคงที่ที่สูงขึ้นอย่างมาก โดยอยู่ที่ 4.17 m/s^2 ทุกโค้ง ซึ่งสะท้อนถึงการขับขี่ด้วยความเร็วสูงตามลักษณะของทางลาดชัน พร้อมกับมีค่าความเร่งด้านข้างที่แกว่งตัวสูง เช่น โค้ง C3 มีค่า -1.38 m/s^2 และโค้ง C7 มีค่า 1.36 m/s^2 แสดงถึงความจำเป็นในการควบคุมรถมากขึ้นเพื่อรักษาเสถียรภาพในการเข้าโค้ง สำหรับรถโดยสารประจำทาง พบว่ามีพฤติกรรมการขับขี่ที่เน้นความมั่นคงและความปลอดภัยเป็นหลัก โดยในช่วงขาขึ้น ค่าความเร่งแนวยาวมีความคงที่ที่ 1.11 m/s^2 ทุกโค้ง ขณะที่ค่าความเร่งด้านข้างแม้มีการเปลี่ยนแปลง แต่มีระดับที่ต่ำกว่ารถยนต์ส่วนบุคคลอย่างชัดเจน เช่น โค้ง C3 มีค่า -1.28 m/s^2 และโค้ง C7 มีค่า 0.97 m/s^2 ซึ่งแสดงถึงการควบคุมที่ราบรื่นและการลดแรงเหวี่ยงขณะเข้าโค้ง ในส่วนของช่วงขาลง พบว่าค่าความเร่งแนวยาวลดลงมาอยู่ที่ 0.83 m/s^2 ทุกโค้ง สอดคล้องกับพฤติกรรมการขับขี่ที่เน้นความระมัดระวัง ขณะที่ค่าความเร่งด้านข้างมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เช่น โค้ง C3 มีค่า -0.97 m/s^2 , โค้ง C6 มีค่า 1.38 m/s^2 และโค้ง C7 มีค่า 0.95 m/s^2 อย่างไรก็ตาม ค่าเหล่านี้ยังอยู่ในระดับต่ำกว่ารถยนต์ส่วนบุคคลในหลายจุด ซึ่งสะท้อนถึงการขับขี่ที่เน้นการรักษาสมดุลและความปลอดภัยของผู้โดยสารมากกว่าการตอบสนองเชิงความเร็ว ดังนั้นการเลือกโค้งที่ 3 และโค้งที่ 4 มาใช้ในการอธิบายผลการทดลองเชิงลึก มีเหตุผลเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยโค้งที่ 3 เป็นโค้งแคบซึ่งบังคับให้ผู้ขับขี่ต้องลดความเร็วและควบคุมพวงมาลัยอย่างรัดกุม ส่งผลให้ค่าความเร่งด้านข้างมีค่าสูง เช่น รถยนต์ส่วนบุคคลขาลงมีค่า -1.38 m/s^2 และรถโดยสารประจำทางขาขึ้นมีค่า -1.28 m/s^2 ซึ่งเป็นตัวแทนของแรงเหวี่ยงที่กระทบต่อเสถียรภาพของยานพาหนะ ในทางตรงกันข้าม โค้งที่ 4 เป็นโค้งกว้างซึ่งเอื้อให้ผู้ขับขี่สามารถรักษาความเร็วและเข้าโค้งได้อย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองสะท้อนถึงความแตกต่างดังกล่าวอย่างชัดเจน โดยรถยนต์ส่วนบุคคลมีค่าความเร่งด้านข้าง 1.14 m/s^2 (ขาลง) ขณะที่รถโดยสารประจำทางมีค่า 1.01 m/s^2 (ขาขึ้น) ซึ่งสะท้อนถึงการเข้าโค้งที่ราบรื่นและการควบคุมที่มั่นคงกว่าโค้งแคบ ดังนั้น การเลือกโค้งทั้ง 2 ลักษณะนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการอธิบายผลการทดลอง เนื่องจากช่วยเปรียบเทียบพฤติกรรมการขับขี่ของยานพาหนะสองประเภทภายใต้เงื่อนไขของโค้งที่มีความซับซ้อนแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน

4.2 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมรถขับขี่ในแต่ละช่วงเวลา

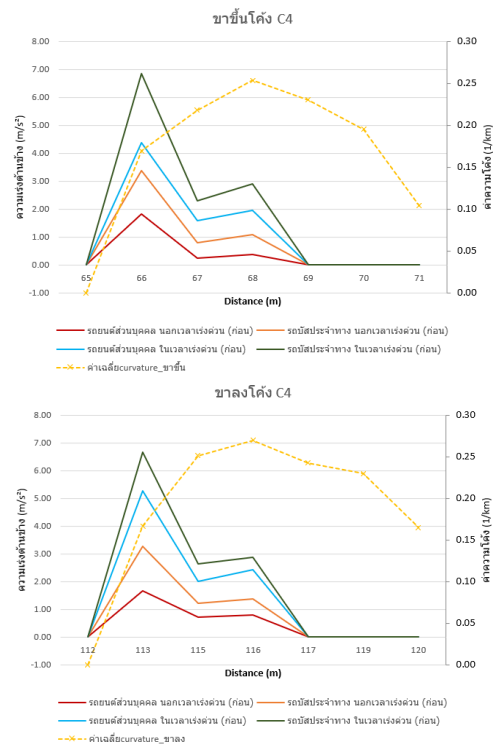
ความเร็ว



รูปที่ 5 พฤติกรรมการใช้ความเร็วรถแต่ละประเภทในแต่ละช่วงเวลา ในช่วงโค้งที่ 3 และช่วงโค้งที่ 4 ทั้ง 2 ทิศทาง

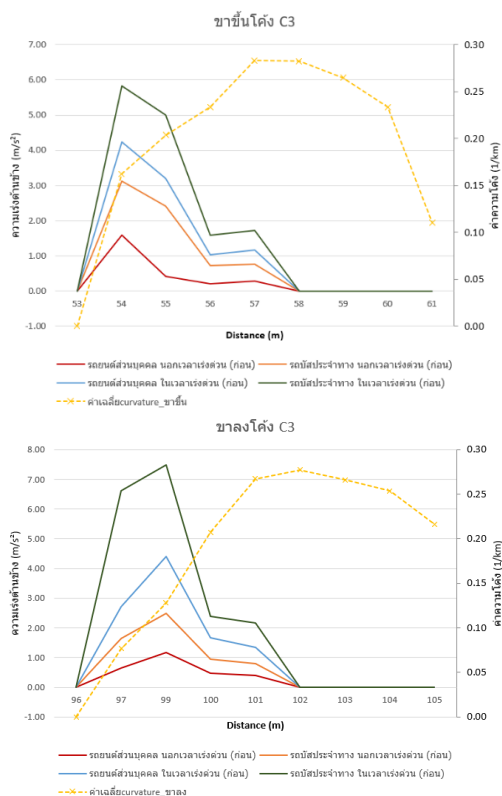


จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 พบว่าผู้ขับขี่ที่ทรงรถยนต์ส่วนบุคคล และรถโดยสารประจำทางมีแนวโน้มที่จะใช้ความเร็วเฉลี่ยที่สูงกว่าบน โค้ง C4 ที่มีรัศมีกว้างกว่า โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน ผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลจะใช้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 45-55 km/h ตลอดเส้นทาง ซึ่งบ่งชี้ถึงความมั่นใจในการเข้าโค้งที่กว้างกว่า และมีความจำเป็นในการลดความเร็วน้อยกว่าในทางกลับกัน เมื่อขับขึ้นโค้ง C3 ที่มีลักษณะเป็นโค้งแคบ ผู้ขับขี่จะลดความเร็วลงอย่างเห็นได้ชัดเพื่อความปลอดภัย โดยเฉพาะในช่วงกลางโค้งที่ความโค้งสูงสุด เช่น ผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลในเวลาเร่งด่วนจะลดความเร็วจากประมาณ 65 km/h ลดเหลือประมาณ 45 km/h ที่กลางโค้ง พฤติกรรมนี้สะท้อนให้เห็นว่าผู้ขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังมากขึ้นเพื่อรับมือกับรัศมีโค้งที่แคบ เหตุผลที่เลือกโค้ง C3 และ C4 เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีเหตุผลสำคัญคือเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการขับขี่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โค้ง C3 ที่เป็นโค้งแคบ เป็นตัวแทนของเส้นทางที่ผู้ขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังสูงและมีการปรับเปลี่ยนความเร็วอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาสมดุลของรถ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการขับขี่ที่มีความระมัดระวังสูง ในทางตรงกันข้ามโค้ง C4 ที่เป็นโค้งกว้าง ทำให้ผู้ขับขี่สามารถรักษาระดับความเร็วที่สูงและสม่ำเสมอได้มากขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการขับขี่ที่ผ่อนคลายและมั่นใจกว่า การเปรียบเทียบข้อมูลจากสองโค้งนี้จึงช่วยให้การวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่ครอบคลุมและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



รูปที่ 6 พฤติกรรมการขับขี่ที่ใช้ความเร็วด้านข้างของรถยนต์ส่วนบุคคล และรถโดยสารประจำทางในช่วงโค้งที่ 3 และช่วงโค้งที่ 4 ทั้ง 2 ทิศทาง

ความเร่งด้านข้าง

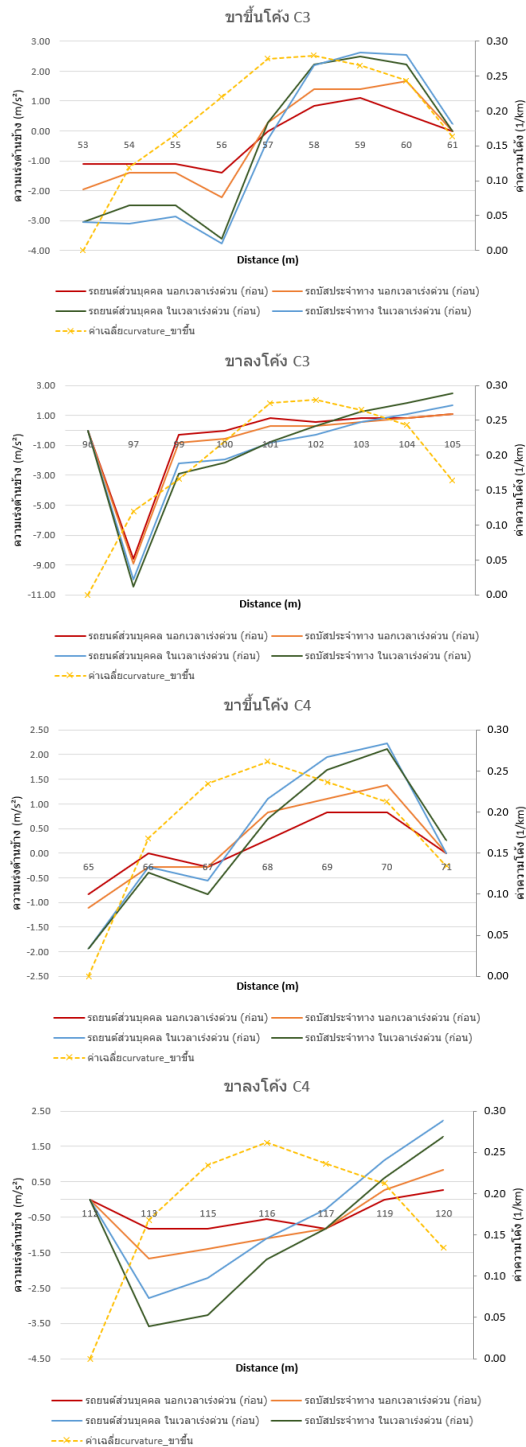


จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 6 พบว่าการเลือกโค้ง C3 และ C4 มาใช้ในการวิเคราะห์มีเหตุผลสำคัญ เนื่องจากโค้ง C3 จัดเป็นโค้งแคบที่มีค่าความโค้งสูง ส่งผลให้ยานพาหนะต้องเผชิญแรงด้านข้างที่รุนแรงขึ้นและสะท้อนพฤติกรรมการขับขี่ที่ต้องใช้ทักษะในการควบคุมมากกว่า ขณะที่โค้ง C4 เป็นโค้งกว้างที่มีค่าความโค้งต่ำกว่า จึงแสดงให้เห็นพฤติกรรมการขับขี่ที่แตกต่างออกไป โดยเฉพาะการใช้ความเร็วที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโค้งแคบ ทั้งนี้ การวิเคราะห์โค้งทั้งสองรูปแบบช่วยให้สามารถเปรียบเทียบและอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเรขาคณิตของถนนกับพฤติกรรมการขับขี่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และยังชี้ให้เห็นถึงจุดเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของการเดินทาง ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางมาตรการป้องกันอุบัติเหตุในพื้นที่ถนนภูเขาที่มีความซับซ้อนของแนวเส้นทาง

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างโค้ง C3 และ C4 พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร่งด้านข้างที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ทั้ง 2 โค้งแสดงค่าความเร่งด้านข้างสูงกว่าชัดเจนในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยเฉพาะรถโดยสารประจำทางที่มีค่าอยู่ระหว่าง 6.8–7.4 m/s² ขณะที่รถยนต์ส่วนบุคคลมีค่าอยู่ในช่วง 4.2–5.2 m/s² ส่วนในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน ค่าดังกล่าวลดลงเหลือเพียง 1.5–3.2 m/s² เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเร่งด้านข้างในทิศทางขาลงมีแนวโน้มสูงกว่าขาขึ้นทุกกรณี เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงและความลาดชันของเส้นทาง ซึ่งส่งผลให้ความเสี่ยงต่อการสูญเสียการควบคุมยานพาหนะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มรถโดยสารประจำทางที่มีมวลมาก



ความเร่งตามแนวยาว



รูปที่ 7 พฤติกรรมการขับขี่ที่ใช้ความเร่งแนวยาวของรถยนต์ส่วนบุคคล และรถบัสโดยสารประจำทางในช่วงโค้งที่ 3 และช่วงโค้งที่ 4 ทั้ง 2 ทิศทาง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 7 พบว่าผู้ขับขี่ทั้งรถยนต์ส่วนบุคคล และรถบัสโดยสารประจำทางมีแนวโน้มที่จะใช้ความเร่งแนวยาวในระดับที่สูงกว่าเมื่อขับขึ้น โค้ง C3 ซึ่งเป็นโค้งที่มีรัศมีแคบกว่า โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลใช้ความเร่งแนวยาวสูงสุด

ประมาณ 2.50 m/s² ขณะที่รถบัสโดยสารประจำทางใช้ความเร่งสูงสุดที่ 2.70 m/s² ซึ่งค่าเหล่านี้สูงกว่าการขับขึ้นบน โค้ง C4 อย่างเห็นได้ชัด พฤติกรรมนี้สะท้อนให้เห็นว่าผู้ขับขี่ต้องใช้ความเร่งเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็วและลดผลกระทบจากแรงเหวี่ยงบนศูนย์กลางขณะเข้าโค้งแคบ ในทางกลับกัน เมื่อขับขึ้นบน โค้ง C4 ที่มีรัศมีกว้างกว่า ผู้ขับขี่สามารถใช้ความเร็วที่สูงกว่าและมีความจำเป็นในการใช้ความเร่งแนวยาน้อยลง โดยผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลใช้ความเร่งสูงสุดประมาณ 2.20 m/s² และรถบัสโดยสารประจำทางใช้ความเร่งสูงสุดที่ 2.30 m/s² แม้จะอยู่ในช่วงเวลาเร่งด่วน แต่ก็ยังต่ำกว่าค่าที่ใช้บนโค้ง C3 พฤติกรรมนี้ชี้ให้เห็นว่าโค้งที่มีรัศมีกว้างกว่าช่วยให้การขับที่ราบรื่นและต้องใช้ความพยายามในการควบคุมรถน้อยลง เหตุผลที่เลือกโค้ง C3 และ C4 ในงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการขับขึ้นในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโค้ง C3 ซึ่งเป็นโค้งแคบ เป็นตัวแทนของเส้นทางที่ผู้ขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังและมีการปรับเปลี่ยนความเร็วอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาสถิติของรถ ส่วนโค้ง C4 เป็นโค้งกว้างกว่า ซึ่งเป็นตัวแทนของเส้นทางที่ผู้ขับขี่สามารถขับขึ้นได้อย่างสะดวกและมั่นคงกว่าการเปรียบเทียบระหว่างโค้งทั้งสองนี้จึงทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของถนนและพฤติกรรมการขับขึ้นได้อย่างครอบคลุมและชัดเจนที่ต้องระมัดระวังความปลอดภัยในการขับขึ้นเป็นอย่างมาก

4.3 ข้อเสนอแนะแนวทางลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขึ้นเส้นทางภูเขาพบว่าปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญ ได้แก่ การใช้ความเร็วเกินกำหนด การเบรกกะทันหัน และการควบคุมรถในโค้งแคบ เพื่อลดความเสี่ยงก่อนที่จะเกิดอุบัติเหตุ โดยการติดตั้งป้ายแจ้งเตือนและป้ายจำกัดความเร็วในบริเวณโค้งอันตราย การใช้กล้องตรวจจับความเร็วในจุดที่มีความเสี่ยงสูง การติดตั้งไฟส่องสว่างและเครื่องหมายสะท้อนแสงในพื้นที่ที่มีทัศนวิสัยจำกัด ตลอดจนการรณรงค์ส่งเสริมวินัยการขับขึ้นอย่างปลอดภัย มาตรการดังกล่าวจะช่วยยกระดับความปลอดภัยบนถนนในพื้นที่ภูเขาและลดความรุนแรงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้

5 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่ารถยนต์ส่วนบุคคลมีความเร็วเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 32–55 km/h โดยมีค่าความเร่งแนวยาวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.83–4.17 m/s² และค่าความเร่งด้านข้างเฉลี่ยอยู่ระหว่าง -1.38 ถึง 1.36 m/s² ซึ่งแสดงถึงลักษณะการขับขึ้นที่มีความคล่องตัวและการปรับความเร็วที่สูงตามลักษณะความโค้งของถนน โดยเฉพาะในช่วงขาขึ้นที่มีความเร็วมากกว่าขาขึ้นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงพฤติกรรมการขับขึ้นที่มุ่งเน้นความเร็วและความต่อเนื่องของการเดินทาง แต่ก็มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียการควบคุมในโค้งแคบที่ต้องใช้ทักษะในการบังคับรถที่สูงขึ้น

สำหรับรถบัสโดยสารประจำทางพบว่ามีความเร็วเฉลี่ยต่ำอยู่ระหว่าง 32–45 km/h โดยใช้ค่าความเร่งแนวยาวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.83–1.11 m/s² และค่าความเร่งด้านข้างเฉลี่ยอยู่ระหว่าง -1.28 ถึง 0.97 m/s²



สะท้อนถึงพฤติกรรมที่ช่วยให้มีความสำคัญกับความปลอดภัยและความมั่นคงของรถมากกว่าความเร็ว ผลดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงกับแนวทางการลดความเสี่ยงที่ได้เสนอไว้ ได้แก่ การควบคุมความเร็วในโค้งแคบ การติดตั้งป้ายเตือนและไฟส่องสว่าง รวมถึงการใช้มาตรการบังคับด้านความเร็ว ซึ่งจะช่วยลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุและส่งเสริมความปลอดภัยในการเดินทางบนเส้นทางภูเขาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าความเร่งด้านข้างที่เป็นลบเกิดได้จากการเลี้ยวไปในทิศทางตรงข้ามกับค่าบวกที่กำหนดให้การเลี้ยวขวาเป็นค่าบวก การเลี้ยวซ้ายจะให้ค่าลบ ซึ่งค่าความเร่งด้านข้างนี้สะท้อนถึงแรงที่กระทำต่อรถขณะเข้าโค้ง ยิ่งค่าเป็นลบมาก แสดงว่ารถเลี้ยวด้วยความเร็วสูงหรือเข้าโค้งแคบ ทำให้แรงเฉื่อยที่กระทำต่อรถและผู้โดยสารมากขึ้น

เนื่องจากสภาพอากาศมีผลต่อพฤติกรรมการขับขี่อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงฝนตกหรือหมอกหนาที่อาจลดทัศนวิสัยและทำให้ผู้ขับขี่ต้องลดความเร็วหรือเบรกบ่อยขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าความเร่งที่บันทึกด้วยเครื่องรับสัญญาณGPS ขณะเดียวกัน การรับสัญญาณGPS ในพื้นที่ภูเขาอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของพิกัดจากภูมิประเทศ ทำให้ค่าความเร่งและระยะทางที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จึงควรพิจารณาปรับปรุงการเก็บข้อมูลและตรวจสอบสภาพแวดล้อมควบคู่กันในการศึกษาครั้งต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษากิตติกรรมการขับขี่ในเส้นทางภูเขาของถนน 4 ช่องจราจร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณGPS สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ อาจารย์ ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ มาโดยตลอดผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวเนื่องในการศึกษาที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในกลุ่มที่ช่วยกันค้นคว้า และจัดทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง, (2567), "ข่าวประชาสัมพันธ์จากกรมทางหลวง" (กุมภาพันธ์-ตุลาคม 2567), สืบค้นเมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2568 จาก <https://www.doh.go.th/content/page/news/301327>
<https://www.doh.go.th/content/page/news/335302>
<https://www.doh.go.th/content/page/news/340453>
<https://www.doh.go.th/content/page/news/346900>
- [2] กิตติศักดิ์ จันทวิทย์, (2560), "การประยุกต์ใช้ระบบติดตามGPSเพื่อประเมินความปลอดภัยของผู้ขับขี่รถบรรทุกบนเส้นทางภูเขา", การประชุมวิชาการวิศวกรรมขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- [3] Heinrich, H. W. (1931), "การป้องกันอุบัติเหตุในอุตสาหกรรม", นิวยอร์ก: แมกกรอว์ฮิลล์.
- [4] Thygeson, A. L. (1979), "Safety: Principles, instruction", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [5] ฤทธิญา อนันตกาลต์, (2559), "การศึกษาพฤติกรรมการขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลในเขตชุมชนเมืองกรุงเทพมหานคร โดยใช้เครื่องมือวัดGPS ควบคู่กับแบบสอบถาม", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] ชนิตา ไสสุขสอาด, (2561), "การประเมินประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติในพื้นที่ทางภูเขาบนถนนสาย 118 (เชียงราย-เชียงใหม่)", รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [7] ฤทธิญา เจริญมี, (2560), "การศึกษาพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะบนทางหลวงนอกเขตเมือง", วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [8] Sentoff, K. M. (2015), "Driving behavior analysis using GPS and OBD data", [Doctoral dissertation/Research report], University of Vermont.
- [9] Wang, X., Guo, Q., & Tarko, A. P. (2020), "Modeling speed profiles on mountainous freeways using high-resolution data", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 117, 102679.
- [10] Barmounakis, E. N., & Geroliminis, N. (2020), "On the reliability of traffic dynamics and travel time estimation using probe vehicle data", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 111, 108–125.
- [11] จิตติภูมิ นันทิภากรณ์, (ม.ป.ป.), หนังสือพิเศษ พิธีสารและ การเคลื่อนที่, [หนังสือ], กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- [12] Hallmark, S. (2015), "Evaluation of Dynamic Speed Feedback Signs On Curves", Federal Highway Administration, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/14020/14020.pdf>.



การประยุกต์ใช้มาตรฐานการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งสาธารณะ สำหรับการพัฒนาสถานีรถไฟ ในพื้นที่จังหวัดพะเยา บนเส้นทางรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงของ Applying Transit-Oriented Development standard for selected Phayao railway stations on Denchai-Chiang Khong railway project

ศุภกิจ ทองบ่อ¹ ชลธิชา คำลอย² ธวัชชัย พิมมาศ³ และ มนัญญา มหารรรณ^{4*}

^{1,2,3,4} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102341@up.ac.th

บทคัดย่อ

ประเทศไทยดำเนินนโยบายส่งเสริมการพัฒนาหัวเมืองหลักในแต่ละภูมิภาคให้เติบโตควบคู่กับเศรษฐกิจ โดยเน้นการลงทุนในระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งสาธารณะ เพื่อเชื่อมโยงกับการใช้พื้นที่สาธารณะอย่างมีประสิทธิภาพและสนับสนุนการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืน งานวิจัยฉบับนี้ได้นำมาตราฐาน Transit-Oriented Development (TOD) มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และกำหนดตัวชี้วัด เพื่อประเมินความเหมาะสมในการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ในเขตจังหวัดพะเยา โดยทำการเก็บข้อมูลครอบคลุมรัศมีจากสถานี 500 เมตร จากสถานีพะเยาและสถานีมหาวิทยาลัยพะเยา แล้วนำมาประเมินคะแนนตามเกณฑ์ TOD Standard ผลการศึกษพบว่า ทั้งสองสถานีมีคะแนนรวมต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากสถานีทั้งสองยังอยู่ในขั้นตอนการก่อสร้าง ทำให้การเก็บข้อมูลบางส่วนต้องอาศัยการประมาณการและการคาดการณ์จากแผนผังโครงการที่มีอยู่ นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้มาตรฐาน TOD ซึ่งส่วนใหญ่พัฒนาจากบริบทเมืองขนาดใหญ่ อาจต้องมีการปรับให้เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ชนบทและเมืองขนาดเล็กในจังหวัด

คำสำคัญ:

การพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานี, การใช้พื้นที่, สถานีรถไฟ, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

Thailand is pursuing a policy to promote the development of key regional cities to grow alongside the economy, focusing on investment in public transportation infrastructure systems to effectively link with the utilization of public spaces and support sustainable urban development. This research utilizes the Transit-Oriented Development (TOD) Standard as an analytical tool and a set of metrics to assess the suitability for developing

the area surrounding Denchai-Chiang Rai-Chiang Khong double-track railway stations in Phayao Province. Data collection covered a 500-meter radius from Phayao Station and University of Phayao Station. The data was then evaluated using the TOD Standard criteria. The study results found that the total scores for both stations were below the set standard. This is because both stations are still in construction phase, meaning some data collection had to rely on estimations and predictions from the existing project plans. Furthermore, the application of the TOD Standard, which was mostly developed from the context of large cities, may need to be adapted to suit the context of rural and small urban areas in the province.

Keywords:

Transit-oriented development, TOD, Land use, Train station, Geographic information system

1. บทนำ

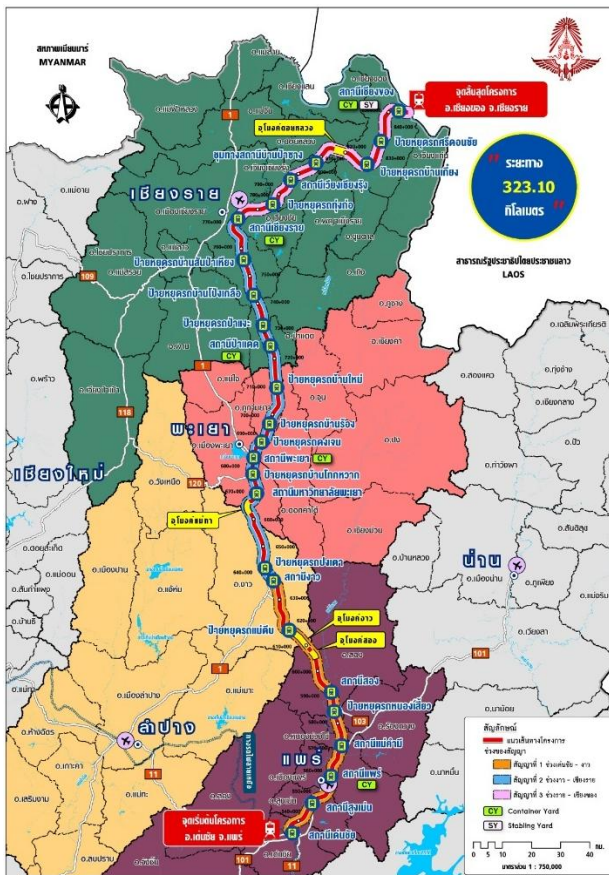
1.1 ที่มาและความสำคัญ

การขนส่งระบบรางเป็นกลไกส่วนหนึ่งของระบบโลจิสติกส์ซึ่งเป็นการเพิ่มความสะดวกให้กับการค้าและการเคลื่อนย้ายสินค้าระหว่างประเทศและในประเทศ การขนส่งทางรถไฟจึงเป็นหนึ่งในวิธีการขนส่งที่สำคัญที่สุดในเรื่องของเวลาและความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้การขนส่งทางรางเป็นวิธีที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

เนื่องจากประเทศไทยไม่มีเส้นทางรถไฟครอบคลุมทุกจังหวัด ทำให้หลายพื้นที่โดยเฉพาะพื้นที่ชนบทหรือจังหวัดห่างไกล จึงเป็นข้อเสียที่ทำให้การขนส่งทางรางไม่สามารถเข้าถึงได้ทั่วถึงทุกพื้นที่ โครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงของ จึงเริ่มขึ้นจากแนวคิดที่จะเพิ่มศักยภาพและเสนอแนวทางการพัฒนาระบบขนส่งทางราง ลดต้นทุนด้านโลจิสติกส์ และกระจายการพัฒนาเศรษฐกิจไปยังภูมิภาคต่าง ๆ โครงการนี้เป็นส่วนขยาย



ของทางรถไฟสายเหนือ มีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการเดินทางและขนส่งสินค้าภาคเหนือ รวมถึงรองรับศูนย์เปลี่ยนถ่ายสินค้าเชิงของที่กำลังก่อสร้างจะเชื่อมการค้าระเบียงเศรษฐกิจแนวเหนือ-ใต้จากไทยไปลาว จีน และเขตเศรษฐกิจตามนโยบายของรัฐบาล ประกอบด้วย 26 สถานี 4 อุโมงค์ 40 ถนนยกข้าม และ 102 ถนนลอดใต้ทางรถไฟ โดยต้องเวนคืนที่ดินประมาณ 9,661 ไร่ (การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2565) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวเส้นทางรถไฟเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ
(การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2565)

การลงทุนขนส่งมวลชนของภาครัฐมีความสำคัญต่อการพัฒนาบ้านเมือง ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและไม่เป็นภาระทางการเงินในระยะยาว โดยมีแนวทางแก้ไข เช่น ศึกษาความเป็นไปได้และพฤติกรรมของผู้โดยสารให้รอบคอบก่อนลงทุน และสนับสนุนการพัฒนาเมืองให้อัตโนมัติระบบขนส่งมวลชน เช่น การพัฒนาโซนที่อยู่อาศัยและธุรกิจรอบสถานี

การพัฒนาสถานีรถไฟในพื้นที่จังหวัดพะเยาจึงมีที่มาจากความต้องการที่จะยกระดับโครงสร้างพื้นฐานทางด้านขนส่งของจังหวัดพะเยา อย่างไรก็ตาม การสร้างสถานีรถไฟเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการดึงดูดผู้ใช้บริการ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีให้เกิดความกระชับ ส่งเสริมการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานเพื่อผลักดันให้มีผู้ใช้บริการระบบขนส่งทางรางมากขึ้นและลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำมาตรฐาน TOD มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินศักยภาพพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟพะเยาและสถานีรถไฟมหาวิทยาลัยพะเยา
2. เสนอแนวทางการพัฒนาพื้นที่บริเวณโดยรอบสถานีรถไฟในพื้นที่จังหวัดพะเยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษานี้แบ่งเป็นพื้นที่โดยรอบสถานีขนาดใหญ่ (สถานีพะเยา) สถานีขนาดกลาง (สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา) ซึ่งทั้ง 2 สถานีมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีอยู่ในระยะ 1,000 เมตร (รัศมี 500 เมตร) ซึ่งถือเป็นระยะที่สามารถเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะได้ด้วยการเดินเท้า โดยทำการศึกษาเก็บข้อมูลด้านกายภาพ เพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลอ้างอิงตามมาตรฐาน TOD

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบศักยภาพของพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟในจังหวัดพะเยาตามเกณฑ์มาตรฐาน TOD
2. ได้แนวทางการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟในจังหวัดพะเยาเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาพื้นที่อย่างเหมาะสม

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากสถานีรถไฟในโครงการสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ยังอยู่ในขั้นตอนการก่อสร้าง ทำให้การเก็บข้อมูลบางส่วนต้องอาศัยการประมาณการและการคาดการณ์จากแผนผังโครงการที่มีอยู่ นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้มาตรฐาน TOD ซึ่งส่วนใหญ่พัฒนาจากบริบทเมืองขนาดใหญ่ อาจต้องมีการปรับให้เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ชนบทและเมืองขนาดเล็กในจังหวัดพะเยา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาเมืองในปัจจุบันเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น การขยายตัวของเมือง (urban sprawl) อย่างไม่มีแบบแผนการใช้ที่ดินที่ไม่มีประสิทธิภาพ ปัญหาการจราจรติดขัดที่ทวีความรุนแรงขึ้นและมลภาวะที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากยานพาหนะส่วนตัว การวางแผนเมืองที่ขาดแนวทางที่ยั่งยืนส่งผลให้การเดินทางต้องพึ่งพารถยนต์มากขึ้น ทำให้เมืองไม่มีความสามารถในการรองรับประชากรที่เพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แนวคิดการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งสาธารณะ (Transit-Oriented Development, TOD) จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาข้างต้น โดยเป็นแนวทางการพัฒนาเมืองที่มุ่งเน้นให้พื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนสามารถใช้ที่ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดระยะทางในการเดินทาง ส่งเสริม



การใช้ระบบขนส่งสาธารณะและสร้างเมืองที่เป็นมิตรกับคนเดินเท้า (walkable city) TOD ได้รับการยอมรับในหลายประเทศทั่วโลก เช่น ญี่ปุ่น สิงคโปร์ และสหรัฐอเมริกา (โครงการศึกษาพัฒนาเมืองกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง, 2562) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวคิดนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงและส่งผลกระทบบวกต่อระบบขนส่งและการพัฒนาเมือง

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวคิดเกี่ยวกับ TOD โดยครอบคลุมถึงหลักการพื้นฐาน แนวทางการพัฒนา และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการศึกษาวิจัยที่สำคัญทั้งในระดับสากลและในประเทศไทย เพื่อแสดงให้เห็นถึงบทบาทและประโยชน์ของ TOD ในการพัฒนาเมืองที่ยั่งยืน

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 แนวคิด Transit-Oriented Development (TOD)

TOD เป็นแนวทางการวางผังเมืองที่มุ่งเน้นการใช้สถานีขนส่งสาธารณะเป็นศูนย์กลางการพัฒนา โดยมีลักษณะสำคัญคือการพัฒนาพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูงและการใช้ที่ดินแบบผสมผสาน (mixed-use development) เพื่อรองรับการดำเนินชีวิตที่หลากหลายของประชาชน ทั้งที่อยู่อาศัย การทำงาน และการใช้บริการสาธารณะต่าง ๆ อีกทั้งยังคำนึงถึงการออกแบบพื้นที่เพื่ออำนวยความสะดวกในการเดินทางด้วยระบบขนส่งมวลชนเป็นหลัก (Cervero, 2007)

แนวคิดนี้มีรากฐานมาจากแนวคิดการพัฒนาเมืองแบบกระชับ (compact city) ที่มีเป้าหมายในการลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พื้นที่เมืองอย่างสูงสุด ภายใต้แนวทางดังกล่าว การพัฒนา TOD จึงเน้นการใช้สถานีขนส่งมวลชนเป็นแกนกลางของการเปลี่ยนแปลงการสัญจร เชื่อมโยงเครือข่ายคมนาคมในระดับต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยอาศัยศักยภาพในการเข้าถึงของสถานีที่มีประสิทธิภาพสูงมาเป็นปัจจัยสนับสนุนในการยกระดับให้พื้นที่รอบสถานีกลายเป็นศูนย์กลางสำคัญของย่านหรือเมือง ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการใช้ระบบขนส่งสาธารณะและก่อให้เกิดรูปแบบการพัฒนาเมืองที่ยั่งยืนในระยะยาว

แนวทางการวางผังและพัฒนาเมืองโดยรอบสถานีขนส่งมวลชน (TOD) ที่มุ่งเน้นให้เกิดการใช้ประโยชน์ที่ดินอย่างผสมผสานและมีความหนาแน่นสูงโดยจัดวางกิจกรรมที่อยู่อาศัยพาณิชยกรรมและบริการสาธารณะให้อยู่ในระยะที่สามารถเข้าถึงระบบขนส่งมวลชนได้สะดวกและปลอดภัย ทั้งนี้เพื่อลดการพึ่งพาการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคล และส่งเสริมการเดินทางที่ไม่ใช้เครื่องยนต์ (Non-Motorized Transit, NMT) เช่น การเดินเท้า และใช้จักรยาน มีองค์ประกอบหลัก 4 ประการ ดังนี้

1. การพัฒนาที่มีความหนาแน่นสูง (high-density development) TOD สนับสนุนให้มีอาคารสูงและที่อยู่อาศัยหนาแน่นใกล้สถานีขนส่ง
2. การใช้พื้นที่แบบผสมผสาน (mixed-use development) รวมที่อยู่อาศัยพาณิชยกรรมและสำนักงานในพื้นที่เดียวกัน
3. การออกแบบเพื่อคนเดินเท้า (walkability) เพิ่มสิ่งอำนวยความสะดวกและปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานให้เหมาะกับการเดินและการใช้จักรยาน

4. การลดการพึ่งพารถยนต์ (car dependency reduction) ลดที่จอดรถและเพิ่มแรงจูงใจให้ประชาชนใช้ระบบขนส่งสาธารณะ

การศึกษาโดย Cervero and Kockelman (1997) พบว่าพื้นที่ที่พัฒนาเป็น TOD สามารถเพิ่มอัตราการใช้ขนส่งมวลชน ลดการใช้รถยนต์ส่วนตัว และส่งเสริมพฤติกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.2 หลักเกณฑ์และมาตรฐานการประเมิน TOD

Suzuki et al. (2013) กล่าวว่า การพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีให้มีความหนาแน่นสูง ต้องมีกิจกรรมที่หลากหลาย และส่งเสริมการเดินทางเพื่อลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล ทำให้ประชาชนเข้าถึงโอกาสต่าง ๆ ผ่านระบบขนส่งสาธารณะได้สะดวกขึ้น ช่วยลดการจราจรที่เป็นมลพิษและสร้างความยั่งยืนให้กับเมือง โดยมีองค์ประกอบดังนี้ (แสดงในรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แนวคิดหลักของการพัฒนา TOD โดยรอบสถานีขนส่งมวลชน (ที่มา : ผลการวิเคราะห์โครงการศึกษาพัฒนาเมืองกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง สนข., 2564)

การพัฒนา TOD อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์และมาตรฐานการประเมินที่ชัดเจน เพื่อให้แน่ใจว่าการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนสามารถตอบสนองต่อเป้าหมายด้านการเดินทางที่ยั่งยืน ลดการใช้รถยนต์ และเพิ่มคุณภาพชีวิตของประชาชน เนื่องจากจังหวัดพะเยานี้ยังไม่มีการพัฒนาตามหลักการ TOD ที่เกิดขึ้นจริง จึงมุ่งหวังเพียงการวางผังพัฒนาให้สำเร็จตามหลักการ TOD ในเบื้องต้นก่อน โดยใช้หลักการและประเด็นทางกายภาพเช่นเดียวกับแนวทางการออกแบบเพื่อควบคุมทางกายภาพ (design guidelines) ที่มี 8 ประเด็นสำคัญ ซึ่งมาจากมาตรฐาน TOD ของสถาบันนโยบายการขนส่งและการพัฒนา (Institute for Transportation and Development Policy, ITDP) โดยได้ปรับเปลี่ยนรายละเอียดให้สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทย เพื่อให้ได้มาตรฐานการประเมินเดียวกัน ดังนั้น ผลการประเมินการวางผังของประเทศไทยดังกล่าวจึงแตกต่างจากผลการประเมินหลังการพัฒนาจริงตามมาตรฐาน TOD ของ ITDP (2010)

การเลือกใช้เกณฑ์ ITDP เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประเมินศักยภาพของพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟในจังหวัดพะเยา ซึ่งมีทั้งเขตเมืองและพื้นที่กึ่งชนบท เพราะเกณฑ์ดังกล่าวมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับใช้ให้เข้ากับบริบทของพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม และช่วยให้การประเมินมีความครอบคลุม โปร่งใส เมื่อเทียบกับเกณฑ์อื่นๆที่มุ่งเน้นเฉพาะทางกายภาพ



หรือเชิงผังเมืองเท่านั้น TOD เวอร์ชัน 3.0 จะช่วยให้การประเมินมีความครอบคลุม ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเมืองที่ยั่งยืนและสนับสนุนการเดินทางด้วยระบบรางในอนาคต

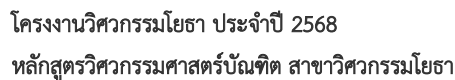
ดัชนีชี้วัดมาตรฐาน TOD

จากการปรับปรุงมาตรฐาน TOD ให้สอดคล้องกับประเทศไทย ได้กำหนดวิธีการประเมินคุณภาพของแผนการพัฒนา TOD และพื้นที่รอบสถานีโดยใช้ “บัตรสรุปสถิติ” ซึ่งเป็นเครื่องมือในการให้คะแนนตามระดับ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน TOD เวอร์ชัน 3.0 โดยให้มาตรฐานตามคะแนนรวมทั้งหมด 100 คะแนน หากการพัฒนาพื้นที่นั้นได้คะแนน 86 - 100 จะได้ Gold standard ส่วนคะแนนตั้งแต่ 71 - 85 ได้ Silver standard และคะแนน 56 - 70 ได้ Bronze standard โดยแต่ละหัวข้อจะมีตัวชี้วัดและเกณฑ์การให้คะแนนที่กำหนดแตกต่างกันไปตามแต่ละวัตถุประสงค์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างหลักการทั้ง 8 เมตริก และวัตถุประสงค์

เนื้อหา	วิธีการประเมิน	MAX POINTS
WALK วัตถุประสงค์ A เขตทางเท้ามีความปลอดภัย สมบูรณ์ และเข้าถึงได้ทุกคน		
A.1 ทางเดิน ร้อยละของส่วนทางเดินที่มีทางเดินที่ปลอดภัยและเข้าถึงได้ทั้งหมด	=ระยะทางเดินเท้าที่สมบูรณ์ หาร ระยะทางเดินทั้งหมด 100% เท่ากับ 3 คะแนน 90-99% เท่ากับ 2 คะแนน 80-89% เท่ากับ 1 คะแนน น้อยกว่า 80% เท่ากับ 0 คะแนน	3
A.2 ทางม้าลาย ร้อยละของทางแยกที่มีทางม้าลายที่ปลอดภัยและเข้าถึงได้ทั้งหมดในทุกทิศทาง	=จำนวนทางแยกที่มีทางข้ามที่สมบูรณ์ หาร จำนวนทางแยกที่ต้องการทางข้ามที่สมบูรณ์ 100% เท่ากับ 3 คะแนน น้อยกว่า100% เท่ากับ 0 คะแนน	3
วัตถุประสงค์ B เขตทางเท้ากระชับและมีชีวิตชีวา		
B.1 พื้นที่ด้านหน้าอาคารที่มองเห็นกิจกรรมได้ ร้อยละของส่วนทางเดินที่เปิดการมองเห็นเชื่อมต่อกับกิจกรรมภายในอาคาร	=จำนวนส่วนทางเดินที่ติดกับผนังอาคารที่สามารถมองเห็นกิจกรรมภายใน ภายนอกอาคารได้ หาร จำนวนส่วนทางเดินเท้าทั้งหมด มากกว่า90% เท่ากับ 6 คะแนน 80-89% เท่ากับ 5 คะแนน 70-79% เท่ากับ 4 คะแนน 60-69% เท่ากับ 3 คะแนน 50-59% เท่ากับ 2 คะแนน น้อยกว่า50% เท่ากับ 0 คะแนน	6

B.2 พื้นที่ด้านหน้าอาคารที่ยอมให้ผ่านเข้าไปได้ จำนวนร้านค้า ทางเข้าอาคาร และทางเข้าอื่น ๆ โดยเฉลี่ยต่อ 100 เมตรของหน้าบล็อก	=จำนวนทางเข้าอาคารตลอดความยาวทางเดินเท้า หาร (ความยาวของรอบอาคารที่ติดกับทางเดินเท้า/100 ม.) มากกว่า5 เท่ากับ 2 คะแนน 3-4 เท่ากับ 1 คะแนน น้อยกว่า3 เท่ากับ 0 คะแนน	2
วัตถุประสงค์ C เขตทางเท้าสะดวกสบาย นำใช้ C.1 ร่มเงาและที่กำบัง ร้อยละของส่วนของทางเดินที่มีร่มเงาหรือองค์ประกอบที่พิกังเพียงพอ	=จำนวนส่วนทางเดินในย่าน NMT ที่มีร่มเงากันแดดกันฝน หาร จำนวนส่วนทางเดินในย่าน NMT ทั้งหมด มากกว่า75% เท่ากับ 1 คะแนน น้อยกว่า75% เท่ากับ 0 คะแนน	1
WALK SCORE:		15
CYCLE วัตถุประสงค์ A. เครือข่ายจักรยานมีความปลอดภัยและครอบคลุม A.1 เครือข่ายจักรยานเข้าถึงเครือข่ายถนนและเส้นทางจักรยานที่ปลอดภัย	=ความยาวของทางสัญจรที่มีทางจักรยานที่ปลอดภัย หาร ความยาวของทางสัญจรทั้งหมด 100% ทางสัญจรที่มีทางจักรยานที่ปลอดภัย เท่ากับ 2 คะแนน50-99% ทางสัญจรที่มีทางจักรยานที่ปลอดภัย เท่ากับ 1 คะแนนน้อยกว่า50% ทางสัญจรที่มีทางจักรยานที่ปลอดภัยเท่ากับ 0 คะแนน	2
วัตถุประสงค์ B. ที่จอดรถจักรยานและที่เก็บของมีเพียงพอและปลอดภัย B.1 ที่จอดจักรยานที่สถานีขนส่ง มีที่จอดรถสำหรับรถจักรยาน ที่กว้างขวางและปลอดภัยที่สถานีขนส่งทุกแห่ง	มี ที่จอดจักรยานที่ปลอดภัยในรัศมี 100 ม. จากทางเข้า-ออกสถานีระบบขนส่งสาธารณะ เท่ากับ 1 คะแนน ไม่มี ที่จอดจักรยานที่ปลอดภัยในรัศมี 100 ม. จากทางเข้า-ออกสถานีระบบขนส่งสาธารณะ เท่ากับ 0 คะแนน	1
B.2 ที่จอดจักรยานในอาคาร ร้อยละของอาคารที่มีที่จอดรถจักรยานกว้างขวางและปลอดภัย	=จำนวนอาคารที่ผ่านเกณฑ์ หาร จำนวนอาคารที่อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องจัดให้มีที่จอดจักรยาน มากกว่า25% เท่ากับ 1 คะแนน น้อยกว่า25% เท่ากับ 0 คะแนน	1
B.3 การใช้จักรยานในอาคาร อนุญาตให้จักรยานเข้ามาและจัดเก็บภายในอาคารตรงพื้นที่ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้ในอาคาร	มี เท่ากับ 1 ไม่มี เท่ากับ 0	1
CYCLE SCORE:		5
CONNECT		

5



A.2 ความหนาแน่นของอาคารที่อยู่อาศัย	น้อยกว่านอกพื้นที่ TOD และที่อยู่ใน TOD Core มี FAR น้อยกว่าพื้นที่นอก TOD Core เท่ากับ 0 คะแนน -อาคารประเภทที่อยู่อาศัยที่อยู่ในพื้นที่ TOD มี FAR สูงกว่าพื้นที่นอก TOD และที่อยู่ใน TOD Core มี FAR สูงกว่าพื้นที่นอก TOD Core เท่ากับ 8 คะแนน -อาคารประเภทที่อยู่อาศัยที่อยู่ในพื้นที่ TOD มี FAR ไม่ต่ำกว่าพื้นที่นอกพื้นที่ TOD และที่อยู่ใน TOD Core มี FAR สูงกว่าพื้นที่นอก TOD Core เท่ากับ 6 คะแนน -อาคารประเภทที่อยู่อาศัยที่อยู่ในพื้นที่ TOD มี FAR ไม่ต่ำกว่าพื้นที่นอกพื้นที่ TOD และที่อยู่ใน TOD Core มี FAR ไม่ต่ำกว่าพื้นที่นอก TOD Core เท่ากับ 4 คะแนน -อาคารประเภทที่อยู่อาศัยที่อยู่ในพื้นที่ TOD มี FAR น้อยกว่าพื้นที่นอก TOD และที่อยู่ใน TOD Core มี FAR น้อยกว่าพื้นที่นอก TOD Core เท่ากับ 0 คะแนน	8
DENSIFY SCORE:		15
COMPACT วัตถุประสงค์ A การพัฒนา อยู่ในหรือถัดจากเขตเมืองที่มีอยู่	A.1 พื้นที่เมือง จำนวนด้านของพื้นที่พัฒนาที่อยู่ติดกับพื้นที่ดินที่ถูกพัฒนาแล้ว 4 ด้าน เท่ากับ 8 คะแนน 3 ด้าน เท่ากับ 6 คะแนน 2 ด้าน เท่ากับ 4 คะแนน 1 ด้าน เท่ากับ 2 คะแนน 0 ด้าน เท่ากับ 0 คะแนน	8
วัตถุประสงค์ B เดินทางเข้าเมือง	B.1 ตัวเลือกการขนส่ง มีระบบขนส่งมวลชนรองคุณภาพสูง เท่ากับ 2 คะแนน มีระบบจักรยานสาธารณะ เท่ากับ 2 คะแนน มีระบบขนส่งมวลชนรอง เท่ากับ 1 คะแนน	2
COMPACT SCORE:		10
SHIFT วัตถุประสงค์ A ลดขนาดที่ดินสำหรับยานยนต์ให้เหลือน้อยที่สุด	A.1 พื้นที่จอดรถนอกถนน =พื้นที่จอดรถนอกถนน หาด พื้นที่ทั้งหมด 0-10 ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 8คะแนน 11-15%ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 7คะแนน 16-20%ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 6คะแนน 21-25%ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 5คะแนน 26-30%ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 4คะแนน มากกว่า 31% ของพื้นที่ทั้งหมด เท่ากับ 2คะแนน	8
		1

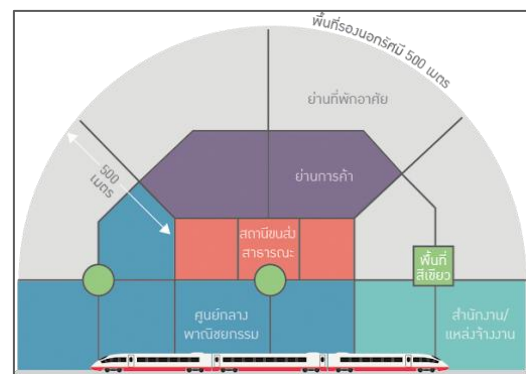
A.2 จำกัดทางเข้า-ออก รถยนต์จากถนน	=จำนวนทางเข้า-ออกรถยนต์เฉลี่ย จากถนนต่อความยาวถนน 100 ม. ไม่เกิน 2 จุด ต่อความยาวถนน 100 ม. เท่ากับ 1 คะแนน เกิน 2 จุด ต่อความยาวถนน 100 ม. เท่ากับ 0 คะแนน	6
A.3 พื้นผิวจราจร	=พื้นที่ผิวจราจร หาด พื้นที่ทั้งหมดน้อยกว่า 15% เท่ากับ 6 คะแนน 15-19% เท่ากับ 3 คะแนน มากกว่า 20% เท่ากับ 0 คะแนน	15
SHIFT SCORE:		
TOTAL POINTS:		100

2.1.3 วัตถุประสงค์ของ TOD Standard

แนวคิด TOD เกิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการขยายตัวของเมืองและลดการใช้รถยนต์ส่วนตัวทำให้เกิดจราจรมลพิษ และใช้ทรัพยากรที่ดินเปลืองแนวคิด TOD จึงมุ่งเน้นพัฒนาเมืองโดยมีระบบขนส่งสาธารณะ เชื่อมโยงกับพื้นที่ที่อยู่อาศัย และพื้นที่สาธารณะ เพื่อสร้างเมืองที่สะดวก เดินได้ ปั่นจักรยานได้ และลดการใช้รถยนต์ส่วนตัว ดังรูปที่ 2.2

มาตรฐาน TOD ที่ถูกพัฒนาโดย ITDP เพื่อเป็นกรอบมาตรฐานสากลในการออกแบบเมืองที่ยั่งยืน ได้กำหนดวัตถุประสงค์ เพื่อ

1. ส่งเสริมการเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะ
2. เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ที่ดินและทรัพยากร
3. ยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนทุกกลุ่ม
4. สร้างเมืองที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีความเท่าเทียม



รูปที่ 2.2 ภาพแผนผัง TOD
(thailandtod.com, 2562)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษา TOD ในระดับนานาชาติ

แนวคิด TOD ได้รับความสนใจในหลายประเทศ โดยเฉพาะในเมืองที่มีระบบขนส่งมวลชนเข้มแข็ง งานวิจัยระดับนานาชาติเหล่านี้ได้เน้นศึกษาถึง



ผลกระทบของ TOD ต่อการพัฒนาเมือง การใช้ที่ดิน และพฤติกรรมของประชากร

Peng et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ TOD ในประเทศจีน โดยพัฒนาแบบจำลองสำหรับการลงทุนใน TOD ผลการศึกษาพบว่า การพัฒนา TOD ช่วยเพิ่มมูลค่าที่ดินในเขตเมืองและกระตุ้นการใช้ขนส่งมวลชนลดความแออัดของเมืองและปรับปรุงคุณภาพชีวิตของประชาชนที่อยู่อาศัยในเขตดังกล่าว

Ewing et al. (2017) ได้ศึกษาผลกระทบของ TOD ใน 5 เมืองของสหรัฐอเมริกา ได้แก่ เดนเวอร์ ลอสแอนเจลิส ซานฟรานซิสโก ซีแอตเทิล และวอชิงตัน ดี.ซี. ผลการศึกษาชี้ว่า TOD สามารถลดปริมาณการใช้รถยนต์ลงได้ถึง 50% และลดความต้องการพื้นที่จอดรถลงกว่า 60% ในขณะที่อัตราการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะเพิ่มขึ้นอย่าง

สหรัฐอเมริกาเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการพัฒนา TOD อย่างแพร่หลาย มีตัวอย่างที่ประสบความสำเร็จหลายแห่ง โดยเน้นไปที่การออกแบบเมืองให้มีการเดินทางสะดวกและส่งเสริมการใช้ขนส่งมวลชน โดยมีมาตรฐานและแนวทางการออกแบบที่แตกต่างกันไปในแต่ละเมือง องค์การสำคัญที่กำหนดมาตรฐาน TOD ในสหรัฐฯ ได้แก่

1. มาตรฐาน LEED for Neighborhood Development (LEED-ND) ระบบการประเมินของ US Green Building Council ซึ่งใช้เกณฑ์ด้านความยั่งยืน สิ่งแวดล้อม และโครงสร้างพื้นฐานในการพัฒนา TOD (Ewing et al, 2017)
2. มาตรฐาน NACTO Transit Street Design Guide เป็นแนวทางของ National Association of City Transportation Officials (NACTO) ที่มุ่งเน้นการออกแบบถนนรอบสถานีขนส่งมวลชนให้เหมาะสมกับ TOD (NACTO, 2016)
3. มาตรฐาน EPA Smart Growth Criteria ซึ่งเป็นกรอบแนวทางของ U.S. Environmental Protection Agency (EPA) เป็นการส่งเสริมการใช้ที่ดินอย่างมีประสิทธิภาพ ลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและเพิ่มการใช้ขนส่งสาธารณะ โดยรวมการพัฒนาและอนุรักษ์ ซึ่งสามารถช่วยปกป้องสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ พร้อมทั้งส่งเสริมให้ชุมชนมีความน่าอยู่ มีความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจ (EPA, 2017)

Fruitvale Village ในโอ๊คแลนด์ รัฐแคลิฟอร์เนีย ได้รับการยอมรับว่าเป็น TOD แบบอย่างระดับชาติของการพัฒนาพื้นที่ที่เน้นการเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะอย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสบความสำเร็จในด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อมและความเป็นธรรมทางสังคม โครงการนี้เกิดขึ้นจากความร่วมมืออย่างใกล้ชิดกับชุมชนท้องถิ่น เพื่อให้มั่นใจว่าการพัฒนาจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้อยู่อาศัย และป้องกันการแทนที่ชุมชนดั้งเดิม ทั้งยังออกแบบให้เหมาะสำหรับการเดินเท้าและการใช้ระบบขนส่งสาธารณะ ซึ่งช่วยลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนบุคคล ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยในพื้นที่อย่างยั่งยืน การศึกษาพบว่าผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ TOD นี้ใช้ขนส่งสาธารณะเพิ่มขึ้นถึง 40% ที่มีการประยุกต์ใช้แนวคิด TOD ผ่านการบูรณาการออกแบบพื้นที่การวางผังเมือง และการมี

ส่วนร่วมของชุมชนที่ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางของคนในพื้นที่ไปสู่การเดินทางโดยใช้ระบบขนส่งสาธารณะ (Goggin, 2018)

เมืองพอร์ตแลนด์ รัฐโอเรกอน ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวอย่าง TOD ที่ประสบความสำเร็จ โดยเน้นการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ MAX Light Rail ช่วยลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนบุคคล โดยส่งเสริมให้ประชาชนหันมาใช้ระบบขนส่งสาธารณะ การเดินเท้าและการปั่นจักรยานมากขึ้น ทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการฟื้นฟูพื้นที่เมืองเดิมที่เคยเป็นอุตสาหกรรมหรือถูกทิ้งร้าง ให้กลับมามีชีวิตชีวาในรูปแบบของย่านที่อยู่อาศัยและพาณิชย์กรรมที่หลากหลาย พร้อมทั้งสนับสนุนการเติบโตของเมืองอย่างยั่งยืน ผ่านการใช้ที่ดินอย่างมีประสิทธิภาพและการเชื่อมโยงกับโครงข่ายขนส่งสาธารณะที่ครอบคลุม (Ewing et al, 2017)

เมืองอาร์ลิงตัน รัฐเวอร์จิเนีย มีการออกแบบ TOD รอบสถานีรถไฟฟ้ามetro ด้วยการส่งเสริมอาคารแบบผสมผสาน มุ่งเน้นการสร้างสภาพแวดล้อมที่เป็นมิตรกับคนเดินเท้าและจักรยาน โดยเฉพาะในย่าน Clarendon, Courthouse และ Ballston ที่มีทางเดินกว้าง พื้นที่สีเขียว และการเชื่อมต่อที่สะดวกกับระบบขนส่งสาธารณะ ส่งผลให้ประชาชนกว่า 39% ในย่าน Rosslyn-Ballston Corridor เลือกใช้ระบบขนส่งสาธารณะในการเดินทางไปทำงาน อีกทั้งผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ TOD มีแนวโน้มที่จะลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล และหันมาเดินทางด้วยการเดินเท้า จักรยานหรือระบบขนส่งสาธารณะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (Ewing et al, 2017)

ประเทศจีนได้พัฒนา TOD ควบคู่กับระบบขนส่งมวลชนความเร็วสูง (High-Speed Rail, HSR) เพื่อเพิ่มศักยภาพของเมืองใหญ่ เช่น เซี่ยงไฮ้ ปักกิ่ง และกว่างโจว และรถไฟใต้ดิน (Metro) หลักเกณฑ์สำคัญในการออกแบบ TOD ในจีนมีลักษณะเฉพาะที่เน้นการพัฒนาเมืองในลักษณะ Transit Metropolis ซึ่งได้รับการสนับสนุนโดยรัฐบาลกลาง

Transit Metropolis Program เป็นนโยบายระดับประเทศของจีนที่กำหนดโดยกระทรวงคมนาคมแห่งชาติของจีน (Ministry of Transport) มีเป้าหมายให้เมืองใหญ่พัฒนา TOD ควบคู่กับการขยายระบบขนส่งมวลชน โดยเน้นการออกแบบพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนให้เป็นศูนย์กลางการใช้ที่ดินแบบผสมผสานพร้อมเพิ่มประสิทธิภาพระบบขนส่งสาธารณะเมืองต่างๆ เช่น ปักกิ่ง หางโจว เซินเจิ้น ถูกใช้เป็นเมืองนำร่องในการดำเนินนโยบายและได้รับผลลัพธ์เชิงบวก เช่น การใช้ระบบขนส่งเพิ่มขึ้น ลดการใช้รถยนต์ส่วนตัวในเมือง (Ewing et al, 2017)

National TOD Guidelines (2020) เป็นมาตรฐานการพัฒนา TOD ที่ออกโดย China Academy of Urban Planning and Design (CAUPD) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาโครงสร้างเมืองที่หนาแน่น การใช้ที่ดินแบบผสมผสาน และการเพิ่มพื้นที่สาธารณะ โดยมีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมระบบขนส่งมวลชน ลดการใช้รถยนต์ส่วนตัว และการกระตุ้นเศรษฐกิจในเขตเมืองใหม่ แนวทางนี้ถูกนำไปใช้เป็นต้นแบบในเมืองสำคัญ เช่น ปักกิ่ง เซี่ยงไฮ้ และเซินเจิ้น ถือเป็นแม่แบบ TOD สำหรับการพัฒนาเมืองทั้งในและนอกประเทศ (Ewing et al, 2017)



Shenzhen North Railway Station เป็นตัวอย่างของการพัฒนาแบบผสมผสาน (Mixed-use) ที่ประสบความสำเร็จ มีทั้งที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน และศูนย์การค้าในรัศมีเดินถึงจากสถานีรถไฟความเร็วสูง โครงการนี้ได้รับการวางแผนเป็นระบบภายใต้แนวคิดของ TOD โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางธุรกิจและทางสรรพสินค้าที่พัฒนาโดยรอบสถานีรถไฟความเร็วสูง เชื่อมโยงระบบรถไฟใต้ดินกับพื้นที่พาณิชย์กรรม ที่พักอาศัย และสำนักงาน การพัฒนาดังกล่าวช่วยลดความแออัดของเมืองหลักและเพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจในพื้นที่รอบข้าง (Ewing et al, 2017)

Shanghai Hongqiao TOD ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวอย่างโครงการ TOD ที่มีขนาดใหญ่และประสบความสำเร็จมากที่สุดในจีน เป็นโครงการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีรถไฟความเร็วสูงของเฉียวให้กลายเป็นศูนย์กลางธุรกิจระดับนานาชาติ โดยแนวคิด TOD ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระบบขนส่งมวลชนระยะไกล (รถไฟความเร็วสูง สนามบิน) กับ ระบบขนส่งภายในเมือง (รถไฟใต้ดิน รถบัส) พร้อมกับการพัฒนาเมืองแบบผสมผสาน (Ewing et al, 2017)

2.2.2 การศึกษา TOD ในประเทศไทย

ในประเทศไทย แนวคิด TOD ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายโครงการ โดยเฉพาะพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชน เช่น BTS และ MRT ในกรุงเทพมหานคร รวมถึงโครงการรถไฟฟ้าที่กำลังพัฒนาในเมืองต่าง ๆ การศึกษาการพัฒนา TOD ในจังหวัดพะเยาพบว่า การพัฒนา TOD ช่วยเพิ่มมูลค่าที่ดิน และเชื่อมโยงระบบขนส่งกับศักยภาพด้านเศรษฐกิจและการท่องเที่ยวของจังหวัด การพัฒนาดังกล่าวช่วยกระจายสินค้าทางเศรษฐกิจ และลดปริมาณการใช้รถยนต์ส่วนตัวได้

งานวิจัยของ นนทวัฒน์ ไสสอาด (2565) มุ่งศึกษาศักยภาพการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีจุดเปลี่ยนถ่ายระบบรางในกรุงเทพฯ โดยใช้กรอบแนวคิด Green Transit-Oriented Development (Green TOD) ซึ่งมุ่งเน้นความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ประเมินศักยภาพด้านกายภาพของพื้นที่รอบ 6 สถานี (เตาปูน, บางซื่อ, พญาไท, มักกะสัน, กรุงเทพมหานคร, ท่าพระ) ในรัศมี 1,000 เมตร โดยใช้โปรแกรม GIS วิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่นของประชากร ความหลากหลายของกิจกรรม การเข้าถึง และการออกแบบสิ่งแวดล้อม จากนั้นคำนวณค่า Z-Score และแปลงเป็นคะแนน Normalization เพื่อจัดลำดับศักยภาพ ผลการวิเคราะห์นำไปสู่การเสนอแนะแนวทางการวางแผนเชิงกายภาพ โดยมุ่งเน้นพื้นที่รอบสถานีพญาไท ให้มีการออกแบบที่ส่งเสริมการเดินเท้า เพิ่มพื้นที่สีเขียว และปรับปรุงการเชื่อมต่อ เพื่อให้พื้นที่โดยรอบสถานีสามารถพัฒนาเป็นต้นแบบเมืองที่ยั่งยืนตามแนวคิด TOD ได้

งานวิจัยของ อภิญา ผาดอน และภาวิณี เอี่ยมตระกูล (2564) ศึกษาความสามารถในการเดินเท้ารอบสถานีขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร โดยประยุกต์แนวคิด การพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชน (TOD) ในการวิเคราะห์พื้นที่บางส่วนของเมือง การประเมินใช้ทั้งปัจจัยทางกายภาพ เช่น ความต่อเนื่องและความปลอดภัยของทางเท้า ความสะดวกในการเข้าถึง

อาคาร และบรรยากาศโดยรอบ รวมถึงข้อมูลจากแบบสอบถามเชิงความรู้สึ ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีอยู่ใกล้สถานีขนส่งมวลชน แต่ยังไม่เอื้อต่อการเดินเท้า เนื่องจากทางเท้าแคบ ไม่ต่อเนื่อง มีสิ่งกีดขวางและขาดสิ่งอำนวยความสะดวกที่เพียงพอ พื้นที่ตัวอย่างได้แก่สถานีสวนจตุจักร สถานีพหลโยธิน สถานีศูนย์วัฒนธรรม และสถานีสยาม ซึ่งแต่ละพื้นที่มีแนวทางปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานและสิ่งอำนวยความสะดวกแตกต่างกัน ทั้งนี้ พื้นที่ที่ได้รับการพัฒนาอย่างสอดคล้องกับแนวคิด TOD อย่างเป็นระบบ พบว่ามีการเดินเท้าเพิ่มขึ้นและมีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการอยู่อาศัยและการใช้ชีวิตของประชาชนมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยของ ฤกษ์ญา แสนสมบูรณ์ และธนาพันธ์ ทับทิมหิน (2566) ศึกษาการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีรถไฟฟ้ามหานคร 2 สาย ได้แก่ สายเฉลิมรัชมงคล (สีน้ำเงิน) และสายฉลองรัชธรรม (สีม่วง) รวม 53 สถานี ในเขตกรุงเทพมหานครและจังหวัดนนทบุรี โดยวิเคราะห์ตามแนวคิด TOD ผ่าน 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความหนาแน่น (Density), ความหลากหลาย (Diversity), การออกแบบและระยะทาง (Design and Distance) และจุดหมายปลายทางและการเชื่อมต่อ (Destination and Connectivity) พร้อมกำหนดน้ำหนักของตัวแปรด้วยวิธี Information Entropy Weight Method (IEW) เพื่อคำนวณคะแนนการพัฒนาพื้นที่ ผลการวิจัยพบว่าสถานีในสายสีม่วงมีค่าคะแนนเฉลี่ยสูงกว่าสายสีน้ำเงิน โดยสถานีที่มีคะแนนสูงสุดของสายสีน้ำเงินคือ สถานีท่าพระ เนื่องจากการเชื่อมต่อของระบบขนส่งและสายรถประจำทางจำนวนมาก ส่วนสายสีม่วงคือ สถานีไทรม้า ที่มีจุดสนใจและกิจกรรมรอบสถานีมากที่สุด ขณะที่สถานีที่มีคะแนนต่ำสุดคือ สถานีบางซื่อ (สายสีน้ำเงิน) และ สถานีบางรักน้อยท้ายอิฐ (สายสีม่วง) เนื่องจากขาดแหล่งพักอาศัยและสถานศึกษาโดยรอบ ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นจุดแข็งและจุดอ่อนของแต่ละสถานี ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนในอนาคต โดยนำสถานีที่มีคะแนนสูงมาเป็นต้นแบบการพัฒนา

งานวิจัยของ บุญเชิด หนูอ้อม (2562) ศึกษาการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีรถไฟความเร็วสูงชลบุรี ภายใต้แนวคิด การพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งมวลชน (TOD) โดยมุ่งวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน ศักยภาพด้านกายภาพและการลงทุน รวมถึงหาแนวทางการพัฒนาที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่โดยรอบสถานียังคงเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและว่างเปล่า มีความหนาแน่นต่ำ ไม่สอดคล้องกับแนวคิด TOD ที่เน้นการใช้ที่ดินแบบผสมผสานและหนาแน่นสูง แม้ผังเมืองรวมจังหวัดชลบุรีปี 2553 จะกำหนดให้พื้นที่ดังกล่าวเป็นที่อยู่อาศัย แต่การพัฒนาในลักษณะเดียวไม่ตอบโจทย์ TOD ที่ต้องการผสมผสานกิจกรรมเมืองหลายรูปแบบ ด้านศักยภาพกายภาพและการลงทุนพบว่าอยู่ในระดับปานกลาง พื้นที่ที่มีโอกาสพัฒนาแต่ยังจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐาน การเข้าถึง และระบบสาธารณูปโภค การพัฒนาในอนาคตจึงควรได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐและเอกชนร่วมกัน แนวทางพัฒนาที่เสนอ ได้แก่ การจัดตั้งโรงพยาบาลสวนสาธารณะ สถานศึกษา และการออกแบบพื้นที่ให้ส่งเสริมการเดินเท้าและใช้จักรยาน เพื่อสร้างเมืองน่าอยู่อย่างยั่งยืน เมื่อเปรียบเทียบกับแนวคิดของ Zottis (2015) พบว่าพื้นที่รอบสถานียังขาดความหนาแน่นและการ



เชื่อมโยงของโครงข่ายคมนาคมกับกิจกรรมเมือง อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังมีศักยภาพในการพัฒนาให้สอดคล้องกับแนวคิด TOD หากมีการวางแผนและกำหนดนโยบายด้านการใช้ที่ดินและระบบสาธารณะอย่างเป็นระบบ

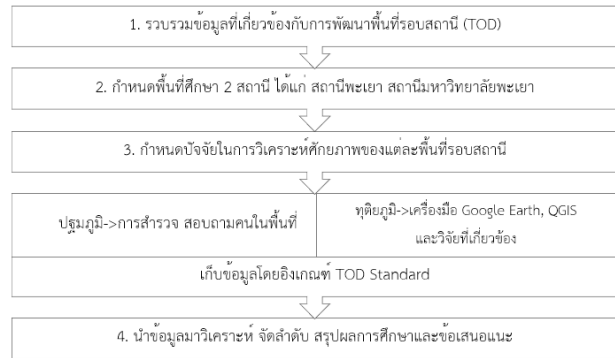
2.2.3 ปัจจัยความสำเร็จของ TOD

การพัฒนาแนวคิด TOD ให้เกิดประสิทธิผลจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญหลายประการ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณภาพระบบขนส่งสาธารณะ (quality of public transit) ระบบขนส่งสาธารณะที่มีคุณภาพและมีจำนวนเพียงพอ จะช่วยดึงดูดให้ประชาชนเลือกใช้บริการมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความคุ้มค่าและความยั่งยืนของระบบ
2. การเดินทางแบบพึ่งตนเอง (active transport) การส่งเสริมการเดินทางด้วยการเดินเท้าและการใช้จักรยาน ถือเป็นส่วนสำคัญในการเชื่อมต่อการเดินทางสู่ระบบขนส่งมวลชน และช่วยลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนบุคคล
3. การจัดการการใช้รถยนต์ (car use management) มาตรการควบคุมและลดการใช้รถยนต์ เช่น การจำกัดพื้นที่จอดรถ หรือการกำหนดค่าธรรมเนียมในการใช้รถยนต์ในบางพื้นที่ จะช่วยกระตุ้นให้ประชาชนหันมาใช้ขนส่งสาธารณะมากขึ้น
4. การใช้ที่ดินแบบผสมผสาน (mixed uses) การวางผังที่ดินให้มีความหลากหลายทั้งด้านที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และบริการสาธารณะ เป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการพัฒนาเมืองให้มีความสมดุล และลดความจำเป็นในการเดินทางระยะไกล
5. ประสบการณ์ในการเดินเท้า (pedestrian experience) การออกแบบพื้นที่ให้เอื้อต่อการเดินเท้า เช่น ทางเดินที่ปลอดภัย ร่มรื่น และเข้าถึงได้สะดวก จะช่วยสร้างบรรยากาศเมืองที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้ และกระตุ้นให้คนเลือกเดินมากขึ้น
6. พื้นที่สาธารณะ (public spaces) การจัดให้มีพื้นที่สาธารณะที่เพียงพอ เข้าถึงง่าย ใช้งานได้จริง และดูแลรักษาได้สะดวก จะช่วยส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชนทุกกลุ่ม และสร้างความเท่าเทียมในการใช้พื้นที่เมือง
7. การมีส่วนร่วมของชุมชน (participation) การเปิดโอกาสให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในกระบวนการคิด วางแผน และดำเนินการพัฒนา TOD จะช่วยสร้างความรู้สึกเป็นเจ้าของ และนำไปสู่การพัฒนาที่ตอบสนองต่อความต้องการของชุมชนอย่างแท้จริง

3. วิธีการดำเนินการ

การศึกษาวិเคราะห์ปัจจัยความเหมาะสมของที่ตั้งซึ่งมีการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีที่ได้นำมาตรฐาน TOD Standard มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพื้นที่รอบสถานี (TOD)

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องถึงวิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกที่ตั้งสำหรับพัฒนาพื้นที่รอบสถานีที่เคยปรากฏในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยการนำมาตรฐาน TOD มาใช้ในการศึกษา ซึ่งคาดหวังข้อดีที่ได้จากมาตรฐาน TOD จะสามารถช่วยให้นักพัฒนาและนักออกแบบสามารถใช้ระบบการให้คะแนน TOD Standard ในขั้นตอนการวางแผนหรือการออกแบบโครงการ เพื่อระบุข้อว่างและโอกาสในการปรับปรุง TOD หรือเพื่อประเมินเงื่อนไขที่มีอยู่หรือข้อเสนอการพัฒนาโครงการ

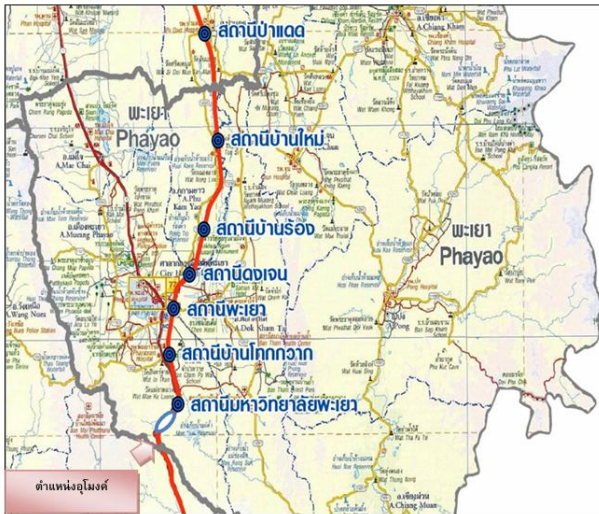
3.2 กำหนดพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาคือ แนวเส้นทางรถไฟผ่านจังหวัดพะเยา (โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ) มีระยะทางประมาณ 53.10 กิโลเมตร จำนวน 6 สถานี คือ มหาวิทยาลัยพะเยา, บ้านโศกหลวง, พะเยา, ดงเจน, บ้านร่อง และบ้านใหม่ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษา 2 สถานี คือ สถานีพะเยาและสถานีมหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งมีแนวเส้นทางโครงการ แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

1. ทางวิ่งใต้ดิน จากปากอุโมงค์ที่จาว วังยาวไปจนถึงปากอุโมงค์แม่กา ซึ่งจุดนี้ทางรถไฟจะเปลี่ยนเป็นทางวิ่งระดับดิน
2. ทางวิ่งระดับดินเป็นระบบขนส่งทางรางประเภทระบบรางคู่ ซึ่งเป็นระบบที่รถไฟสามารถวิ่งสวนกันได้ตลอดเส้นทางโดยไม่ต้องรอลูกหัวรถไฟ แนวเส้นทางของรถไฟทางคู่สาย เด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (อุโมงค์แม่กา-สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา) วิ่งตามแนวเหนือใต้ โดยวิ่งจากอุโมงค์แม่กา (ตามเส้นคลองแม่กาหลวง) จนถึงหอพักวรรณรัตน์จะวิ่งข้ามถนนซอยอ่างเก็บน้ำแม่ต้า ไปจนถึงสถานีรถไฟมหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งจากจุดนี้ทางรถไฟจะเปลี่ยนเป็นทางวิ่งยกระดับ
3. ทางวิ่งยกระดับ จากสถานีมหาวิทยาลัยพะเยาจะเปลี่ยนเป็นทางวิ่งยกระดับไปจนถึงป้ายหยุดรถบ้านโศกหลวง ซึ่งหลังจากจุดนี้ทางรถไฟจะเปลี่ยนเป็นทางวิ่งระดับดิน
4. ทางวิ่งระดับดิน จากป้ายหยุดรถบ้านโศกหลวงจะเปลี่ยนเป็นทางวิ่งระดับดินไปจนถึงถนนพระอุบลี (ทางหลวงหมายเลข 1042) แล้ววิ่งตัดผ่านถนนไปจนถึงบ้านแม่ต้า แล้วตัดผ่านถนน (ทางหลวงหมายเลข 1021) จึงจะถึงสถานีรถไฟพะเยา



แนวเส้นทางโครงการทั้งหมดอยู่ในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีรูปแบบแนวเส้นทางโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (ผ่านจังหวัดพะเยา) ช่วงทางวิ่งรูปแบบแนวเส้นทางสรุปดังตาราง 3.1



รูปที่ 3.2 แนวเส้นทางโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ (แนวเส้นทางรถไฟผ่านจังหวัดพะเยา)
(ที่มา: เอกสารรายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2555)

ตารางที่ 3.1 สรุปรูปแบบแนวเส้นทางผ่านจังหวัดพะเยา ช่วงทางวิ่ง รูปแบบแนวเส้นทาง จากเอกสารรายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร การรถไฟแห่งประเทศไทย (2565)

ช่วงทางวิ่ง	รูปแบบแนวเส้นทาง
ช่วงที่ 1 อุโมงค์จังหวัดพะเยา กม.663+400 ถึง 666+225 ระยะทางประมาณ 2.8 กม.	ทางวิ่งใต้ดิน
ช่วงที่ 2 ขนาบทางเลียบบางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1 กม.670+000 -ช่วงแยกหน้าร้านส้มตำมววิ	ทางวิ่งระดับดินตามคลองระบายน้ำ
ช่วงที่ 3 ทางวิ่งในด.แม่กม.670+000 -บ้านโทกหวาก กม.680+000	ทางวิ่งยกระดับตามแนวเขตที่ดินเวนคืน
ช่วงที่ 4 ทางวิ่งบ้านโทกหวาก กม.680+000 - ถนนพระอุบลี (ทางหลวงหมายเลข 1042) - ถนนก่อนถึงแยกแม่ต้า (ทางหลวงหมายเลข 1021)	ทางวิ่งระดับดินตามแนวเขตที่ดินเวนคืน

3.3 การสำรวจข้อมูล

3.3.1. การเก็บข้อมูลเบื้องต้นของ 2 สถานี มีดังนี้

1. แบบปฐมภูมิ การสำรวจ สอบถามเจ้าหน้าที่ควบคุมงานก่อสร้างของการรถไฟแห่งประเทศไทย เพื่อให้ได้รายละเอียดของข้อมูล
2. แบบทุติยภูมิ ใช้ประโยชน์จากเครื่องมือ Google Earth โปรแกรม QGIS หรือเว็บไซต์ข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย และข้อมูลพระราชกฤษฎีกาเขตที่ดิน เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ

3.3.2 การเก็บข้อมูลโดยอิงจากเกณฑ์ TOD Standard

ระบุองค์ประกอบที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของพื้นที่โดยรอบสถานี โดยอิงจากเกณฑ์ TOD Standard และทำการเก็บข้อมูลจะแบ่งเป็นปัจจัยตามมาตรฐาน TOD Standard

ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

1. สำรวจตำแหน่งสถานีและพื้นที่โดยรอบ - จากตำแหน่งสถานีรถไฟ โดยกำหนดรัศมีสำรวจ 500-1,000 เมตร ถ่ายภาพสภาพพื้นที่ปัจจุบัน และบันทึกการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบ (เกษตรกรรม ที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม พื้นที่โล่ง)
2. สำรวจเส้นทางและการเข้าถึง - บันทึกถนนหลัก ถนนรอง ทางเดินเท้า ทางเข้าออกพื้นที่ และวัดระยะเวลาเดินทางจากสถานีไปยังจุดสำคัญต่าง ๆ ในรัศมีศึกษา
3. สำรวจชุมชนและสิ่งอำนวยความสะดวก - ระบุตำแหน่งชุมชน บ้านเรือนร้านค้า สถานศึกษา และสถานที่สำคัญโดยรอบ
4. สัมภาษณ์คนในพื้นที่ - พูดคุยกับผู้นำชุมชนและประชาชนในพื้นที่เกี่ยวกับความเข้าใจต่อโครงการ ความคาดหวัง และความต้องการในการพัฒนาพื้นที่รอบสถานี
5. ระบุศักยภาพและข้อจำกัด - บันทึกพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการพัฒนาตามหลัก TOD และระบุอุปสรรคทางกายภาพที่อาจส่งผลกระทบต่อการพัฒนา

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาและอภิปรายผลที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยมุ่งเน้นการประเมินศักยภาพพื้นที่ศึกษาและการประยุกต์ใช้แนวคิดการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งมวลชน (TOD)

4.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพื้นที่รอบสถานี

พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาคือ เส้นทางโครงการก่อสร้างเส้นทางรถไฟในโครงการสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ ที่จะสร้างขึ้นในจังหวัดพะเยา โดยคาดหวังว่าโครงการนี้จะก่อให้เกิดความสะดวก และเกิดประโยชน์ ดังนี้

1. เพิ่มความสะดวก การเข้าถึงในการเดินทางของประชาชนในพื้นที่นักศึกษา และนักท่องเที่ยวในจังหวัดพะเยา
2. สร้างทางเลือกในการเดินทางที่ประหยัด มีมาตรฐาน และมีประสิทธิภาพ
3. ลดต้นทุนในการเดินทางจากเดิมที่ใช้รถจักรยานยนต์ และรถยนต์เป็นหลัก
4. ลดระยะเวลาการเดินทาง และลดการเกิดมลพิษทางอากาศจากการใช้เชื้อเพลิง



ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีมีดังนี้

4.1.1 รูปแบบโครงการ

1. ระบบรถไฟได้รับการออกแบบเป็นทางคู่ (double-track) เพื่อรองรับทั้งการให้บริการขนส่งผู้โดยสารและการขนส่งสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเดินรถทั้งในทางวิ่งใต้ดิน ทางวิ่งระดับพื้นดิน และทางวิ่งยกระดับ สำหรับขนาดของรถไฟ มีความกว้างของรถไฟขนาด 2.8 เมตร ยาว 20.3 เมตร
2. รูปแบบของทางวิ่ง แนวเขตทางวิ่งของโครงการมีความกว้างประมาณ 60 เมตร โดยมีรูปแบบทางวิ่งดังนี้
 - ทางวิ่งระดับดิน บริเวณแนวเส้นทางเลียบทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1 ที่กิโลเมตร 670+000 - ช่วงบริเวณแยกหน้าร้านส้มตำชมวิว และทางวิ่งบ้านโทกหวาก ที่กิโลเมตร 680+000 - ช่วงบริเวณถนนพระอุบลี (ทางหลวงหมายเลข 1042) - ถนนก่อนถึงแยกแม่ต้า (ทางหลวงหมายเลข 1021) ดังแสดงในรูปที่ 4.1
 - ทางวิ่งใต้ดิน อุโมงค์จังหวัดพะเยา ที่กิโลเมตร 663+400 ถึง 666+225 ระยะทางประมาณ 2.8 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รูปแบบของทางวิ่งระดับดิน

(ที่มา: โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย, 2568)



รูปที่ 4.2 รูปแบบของทางวิ่งใต้ดิน

(ที่มา: โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย, 2568)

4.1.2. สถานี

สถานีรถไฟของโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของมีจำนวน 26 สถานี โดยแบ่งเป็น 4 สถานีขนาดใหญ่ 9 สถานีขนาดเล็ก และ 13 ป้ายหยุดรถไฟ ประกอบด้วย สถานีเด่นชัย สถานีสูงเม่น สถานีแพร่ สถานีแม่คำมี ป้ายหยุดรถหนองเสือ สถานีสอง ป้ายหยุดรถแม่ตึบ สถานีจาว ป้ายหยุดรถปางเตา สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา ป้ายหยุดรถบ้านโทกหวาก สถานีพะเยา ป้ายหยุดรถดงเจน ป้ายหยุดรถบ้านร้อง ป้ายหยุดรถบ้านใหม่ สถานีป่าแดด ป้ายหยุดรถป่าแงะ ป้ายหยุดรถบ้านโป่งเกลือ ป้ายหยุดรถสันป่าเหียง สถานีเชียงราย ป้ายหยุดรถทุ่งก่อ สถานีเวียงเชียงรุ้ง สถานีชุมทางบ้านป่าซาง ป้ายหยุดรถบ้านเกียง ป้ายหยุดรถศรีดอนชัย และสถานีเชียงของ

สถานีรถไฟของโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ สัญญาช่วงที่ 2 ผ่านจังหวัดพะเยา มีจำนวน 6 สถานี ประกอบด้วย สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา ป้ายหยุดรถบ้านโทกหวาก สถานีพะเยา ป้ายหยุดรถดงเจน ป้ายหยุดรถบ้านร้อง และป้ายหยุดรถบ้านใหม่ ทั้งนี้ในกรณีศึกษา มี 2 สถานี คือ สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา และสถานีพะเยา โดยมีตัวอย่างรูปแบบของสถานีขนาดใหญ่ แสดงในรูปที่ 4.3 และตัวอย่างรูปแบบของสถานีขนาดเล็ก แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 สถานีขนาดใหญ่ (สถานีพะเยา)

(ที่มา: เอกสารรายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2555)



รูปที่ 4.4 สถานีขนาดเล็ก (สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา)

(ที่มา: เอกสารรายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2555)

4.2 การกำหนดพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่เก็บข้อมูล 2 สถานีบนเส้นทาง โดยมีตำแหน่งและรายละเอียดของสถานีที่ทำการศึกษา 2 สถานี ดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 สรุปตำแหน่งและรายละเอียดของสถานี 2 สถานี

ที่	สถานี	ที่ตั้ง
1	สถานีพะเยา	ระดับดิน
2	สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	ระดับดิน

4.3 ผลการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของแต่ละพื้นที่รอบสถานี

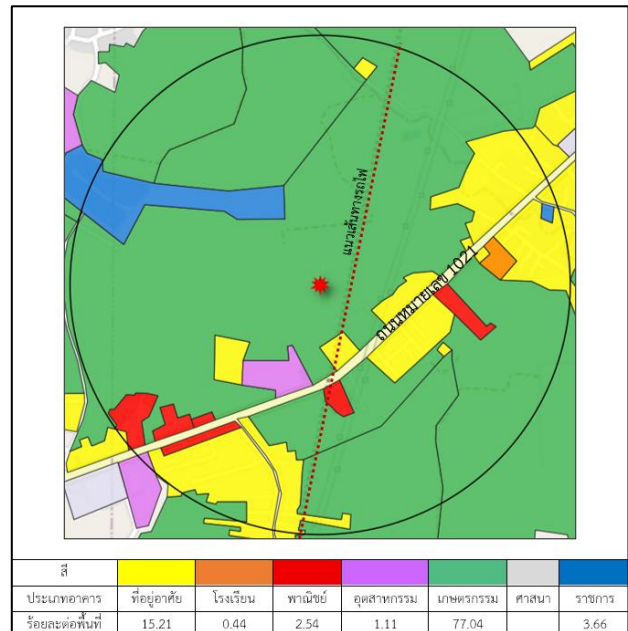
จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของพื้นที่รอบสถานี 2 สถานี ทั้ง 2 รูปแบบ คือ แบบปฐมภูมิ โดยการสำรวจลักษณะของชุมชนในพื้นที่ และเก็บข้อมูลแบบทุติยภูมิโดยใช้ประโยชน์จากเครื่องมือ Google Earth โปรแกรม QGIS เว็บไซต์ข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย และข้อมูลพระราชกฤษฎีกาเขตที่ดิน ได้ข้อมูลเบื้องต้นทั้ง 2 สถานี ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเบื้องต้นแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิของพื้นที่รอบสถานี 2 สถานี

สถานี	แบบปฐมภูมิ	แบบทุติยภูมิ
1. สถานีพะเยา	สภาพและแนวเส้นทาง	ร้อยละของพื้นที่ต่าง ๆ การใช้ที่ดิน ภาพเส้นทางสัญจร และการใช้งานอาคารที่ติดถนน จำนวนที่จอดรถและจักรยานบริเวณโดยรอบสถานี
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	สภาพและแนวเส้นทาง	ร้อยละของพื้นที่ต่าง ๆ การใช้ที่ดิน ภาพเส้นทางสัญจร และการใช้งานอาคารที่ติดถนน จำนวนที่จอดรถและจักรยานบริเวณโดยรอบสถานี

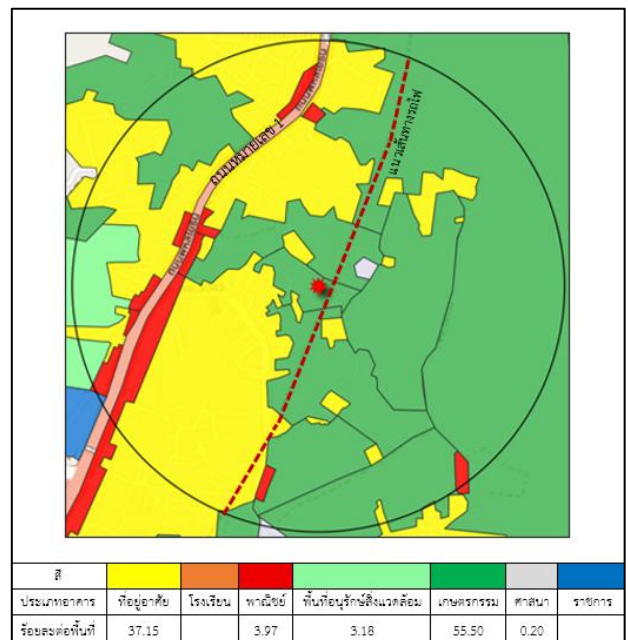
ในการเก็บรวบรวมข้อมูลทางกายภาพเบื้องต้นของพื้นที่ทั้ง 2 สถานี จากการศึกษา ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาประมวลผลเพื่อจัดทำเป็นแผนภาพแสดงการใช้ประโยชน์ที่ดิน พร้อมทั้งสัดส่วนเชิงร้อยละของพื้นที่ต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในพื้นที่ศึกษา โดยผังแสดงผลดังกล่าวได้กำหนดขอบเขตการเก็บข้อมูลภายในรัศมีที่กำหนดรอบพื้นที่สถานี เพื่อให้สามารถสะท้อนลักษณะการใช้ที่ดินและรูปแบบการพัฒนาอาคารโดยรอบได้อย่างเป็นระบบและชัดเจน ซึ่งแสดงขอบเขตการเก็บข้อมูลที่ระยะรัศมี 1000 เมตร จากกึ่งกลางสถานีขนส่งของแต่ละสถานี ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.6

1. สถานีพะเยา



รูปที่ 4.5 แสดงข้อมูลการใช้ที่ดิน และพื้นที่โดยรอบของสถานีพะเยา

2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา



รูปที่ 4.6 แสดงข้อมูลการใช้ที่ดิน และพื้นที่โดยรอบของสถานีมหาวิทยาลัยพะเยา

4.3.2 การเก็บข้อมูลโดยอิงจากเกณฑ์ TOD Standard

จากการกำหนดปัจจัยในการวิเคราะห์ศักยภาพของแต่ละพื้นที่รอบสถานี โดยอิงจากเกณฑ์ TOD Standard ตามการให้คะแนนในตารางที่ 2.1 สามารถให้คะแนนข้อมูลแต่ละเมตริก ดังตารางที่ 4.3-4.10



ตารางที่ 4.3 ค่าคะแนนเมตริก WALK ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

WALK						
สถานี	วัตถุประสงค์ A เขตทางเท้ามีความปลอดภัย สมบูรณ์ และเข้าถึงได้ทุกคน		วัตถุประสงค์ B. เขตทางเท้า กระชับ และมีชีวิตชีวา		วัตถุประสงค์ C. เขตทางเท้า สะดวกสบาย น่าใช้	รวม
	A1	A2	B1	B2	C1	15
1. สถานีพะเยา	-	3	-	-	0	3
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	-	0	-	-	0	0

จากผลการศึกษาพบว่า สถานีพะเยาคะแนนรวมคือ 3 คะแนน แสดงให้เห็นว่าพื้นที่โดยรอบสถานีมีทางข้ามที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม สถานียังขาดคุณลักษณะในด้านความปลอดภัย ความสมบูรณ์ของทางเท้า และความสะดวกสบายในการใช้งาน สถานีมหาวิทยาลัยพะเยาได้คะแนนรวม 0 คะแนน สะท้อนให้เห็นว่า ทั้งสองสถานียังไม่มีมาตรฐานด้านความปลอดภัยและความสะดวกสบายของทางเท้า

ตารางที่ 4.4 ค่าคะแนนเมตริก CYCLE ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

CYCLE						
สถานี	วัตถุประสงค์ A. เครือข่ายจักรยานมีความปลอดภัยและครอบคลุม		วัตถุประสงค์ B. ที่จอดจักรยานและที่เก็บของมีเพียงพอและปลอดภัย			รวม
	A1		B1	B2	B3	5
1. สถานีพะเยา	0		1	0	0	1
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	0		1	0	0	1

จากการศึกษาพบว่า ทั้งสถานีพะเยาและสถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีคะแนนต่ำมากเมื่อเทียบกับศักยภาพที่ควรมีในการส่งเสริมการใช้จักรยาน เนื่องจากขาดโครงข่ายจักรยานที่ปลอดภัยและครอบคลุม และสภาพแวดล้อมไม่เอื้อต่อการปั่นจักรยาน เนื่องจากผู้คนในพื้นที่มีการใช้รถจักรยานยนต์และรถยนต์ส่วนตัวในการเดินทางเพราะสะดวกและรวดเร็ว ทำให้จักรยานยังไม่ถูกมองว่าเป็นตัวเลือกที่ปลอดภัยและสะดวกสบายสำหรับการเชื่อมต่อกับระบบขนส่งมวลชน

ตารางที่ 4.5 ค่าคะแนนเมตริก CONNECT ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

CONNECT			
สถานี	วัตถุประสงค์ A เส้นทางเดินและปั่นจักรยานนั้นสั้น ตรง และหลากหลาย	วัตถุประสงค์ B เส้นทางเดินและปั่นจักรยานนั้นสั้นกว่าเส้นทางรถยนต์	รวม
	A1	B1	15
1. สถานีพะเยา	0	0	0
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	0	0	0

การมีเครือข่ายการเดินทางเส้นทางยานยนต์และเส้นทางไม่ใช้เครื่องยนต์ที่หลากหลายและหนาแน่นเพื่อให้เส้นทางเดินและปั่นจักรยานสั้น กระชับ ตรง และหลากหลาย การออกแบบเมืองให้คนเดินเท้าและนักปั่นจักรยานสามารถสัญจรได้ดีกว่ารถยนต์จะส่งเสริมบริการขนส่งสาธารณะ นอกจากนี้ยังมีผลประโยชน์ที่เกี่ยวข้องอย่างรายรับเพื่อสนับสนุนบริการขนส่งและส่งเสริมรายได้ร่วมกันทั้งร้านค้า บริการและขนส่งในท้องถิ่น จากผลการศึกษาพบว่า ทั้ง 2 สถานีนั้นยังขาดโครงสร้างพื้นฐานที่เอื้อต่อการเดินเท้าและการใช้จักรยาน ทั้งในด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมการเดินทางเท้า พบว่ายังไม่มีการรองรับผู้เดินเท้าอย่างเหมาะสม ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ทางเท้าถูกจำกัดและไม่เอื้อต่อการเดินทางเท้า

ตารางที่ 4.6 ค่าคะแนนเมตริก MIX ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

MIX							
สถานี	วัตถุประสงค์ A โอกาสและบริการอยู่ในระยะที่สามารถเดินได้จากที่อยู่อาศัยและที่ทำงาน และพื้นที่สาธารณะเปิดใช้งานเกินชั่วโมงทำงาน			วัตถุประสงค์ B ประชากรในท้องถิ่นซึ่งมีช่วงรายได้ที่หลากหลายอาศัยรวมกัน			รวม
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	25
1. สถานีพะเยา	0	2	0	-	3	2	7
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	0	2	0	-	3	2	7

จากผลการศึกษาพบว่า สถานีพะเยาและสถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีค่าคะแนนเท่ากับ 7 คะแนนจากคะแนนเต็ม 25 คะแนน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่โดยรอบทั้งสองสถานียังมีระดับการพัฒนาในด้านการผสมผสานการใช้ที่ดินอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งหมายความว่าพื้นที่โดยรอบทั้งสองสถานียังไม่



สามารถสะท้อนลักษณะของการพัฒนาแบบใช้ที่ดินผสมผสานได้อย่างชัดเจนโดยยังขาดองค์ประกอบหลักของการพัฒนาเมืองแบบ TOD เช่น การจัดสรรพื้นที่เพื่อที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และบริการสาธารณะในระยะเดินถึงรวมทั้งการสร้างกิจกรรมที่เอื้อต่อการใช้พื้นที่อย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน

ตารางที่ 4.7 ค่าคะแนนเมตริก DENSIFY ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

DENSIFY			
สถานี	วัตถุประสงค์ A ที่อยู่อาศัยและความหนาแน่นของงานสูง สนับสนุนการขนส่งที่มีคุณภาพสูง มีบริการในท้องถิ่น และกิจกรรมในพื้นที่สาธารณะ		รวม
	A1	A2	
1. สถานีพะเยา	0	4	4
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	3	4	7

จากการศึกษาพบว่า สถานีพะเยาและสถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีคะแนนรวมต่ำมากเมื่อเทียบกับคะแนนเต็ม (15 คะแนน) โดยสถานีมหาวิทยาลัยพะเยาได้ 7 คะแนน และสถานีพะเยาได้ 4 คะแนน สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่โดยรอบสถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีความหนาแน่นของการใช้ประโยชน์ที่ดิน อาคาร และกิจกรรมในลักษณะผสมผสานที่เอื้อต่อการพัฒนาการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะมากพอสมควร สอดคล้องกับเป็นพื้นที่ที่เป็นที่ตั้งของมหาวิทยาลัย ที่มีการขยายตัวของหอพัก ร้านค้า และบริการที่เอื้อต่อบุคลากรในพื้นที่ ในขณะที่สถานีพะเยามีความหนาแน่นของกิจกรรมที่ต่ำกว่า เนื่องจากบริเวณรอบสถานีเป็นย่านชุมชนที่มีรูปแบบการใช้งานที่ดินแบบกระจาย และกิจกรรมการใช้ที่ดินไม่หลากหลาย จึงได้คะแนนด้านความหนาแน่นและกิจกรรมเชิงพาณิชย์ต่ำ

ตารางที่ 4.8 ค่าคะแนนเมตริก COMPACT ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

COMPACT			
สถานี	วัตถุประสงค์ A การพัฒนาอยู่ในหรือถัดจากเขตเมืองที่มีอยู่	วัตถุประสงค์ B เดินทางเข้าเมือง	รวม
	A1	B1	
1. สถานีพะเยา	4	1	5
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	6	1	7

จากผลการศึกษานี้พบว่า สถานีพะเยามีค่าคะแนนเท่ากับ 5 คะแนน และสถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีค่าคะแนนเท่ากับ 7 คะแนน จากคะแนนเต็ม 10 คะแนน โดยทั้งสองสถานีถือว่าเป็นเขตเมืองที่หนาแน่นและมีการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานอยู่บ้าง เนื่องจากที่ตั้งของทั้งสองสถานีอยู่บริเวณที่สามารถเดินทางเข้าไปในเขตเมืองซึ่งเป็นเขตที่อยู่อาศัยที่มีความหนาแน่นสูงได้ใกล้ที่สุด จึงมีคะแนนในส่วนการเดินทางเข้าเมืองสะดวกสูงพอสมควร

ตารางที่ 4.9 ค่าคะแนนเมตริก SHIFT ของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

SHIFT				
สถานี	วัตถุประสงค์ A ลดขนาดที่ดินสำหรับยานยนต์ให้เหลือน้อยที่สุด			รวม
	A1	A2	A3	
1. สถานีพะเยา	8	1	6	15
2. สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา	5	1	6	12

ในการใช้ชีวิตแบบปลอดรถยนต์สามารถทำได้โดยใช้การขนส่งที่หลากหลาย และยานพาหนะที่ได้รับการเลือกใช้ตามความจำเป็น การเดิน ปั่นจักรยาน และการใช้ระบบขนส่งสาธารณะคุณภาพสูงนั้นง่ายปลอดภัยและสะดวกสบาย สามารถลดการใช้ยานยนต์ส่วนบุคคล และลดผลกระทบด้านลบต่าง ๆ ของยานพาหนะได้ จากผลการศึกษานี้พบว่า สถานีพะเยาให้ค่าคะแนนเท่ากับ 15 เป็นคะแนนที่มากที่สุด ดังนั้น สถานีนี้จึงจัดเป็นสถานีที่มีศักยภาพเหมาะสมในการปรับเปลี่ยนแบบเชิงรุกเพื่อนำไปสู่การเปลี่ยนแปลง โดยการลดถนนและพื้นที่จอดรถในพื้นที่เขตเมืองอย่างค่อยเป็นค่อยไป ในโหมดการขนส่งจากยานยนต์ส่วนตัวเป็นโหมดที่ยั่งยืนและเท่าเทียมกันมากขึ้น ด้วยการจับคู่การเดินทาง การปั่นจักรยาน การขนส่งสาธารณะ และยานพาหนะ

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ในทุกเมตริกของพื้นที่รอบสถานีทั้ง 2 สถานี

TOD STANDARD		สถานี	
	คะแนน	สถานีพะเยา	สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา
WALK	15	3	0
CYCLE	5	1	1
CONNET	15	0	0
TRANSIT	/	ไม่ตรง	ไม่ตรง
MIX	25	7	7



DENSIFY	15	4	7
COMPACT	10	5	7
SHIFT	15	15	12
รวม	100	32	34

จากการรวมคะแนน คะแนนในภาพรวมมากที่สุดคือ สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา 34 คะแนน ซึ่งคะแนนที่ได้นั้นยังไม่ผ่านมาตรฐาน TOD เนื่องจากสถานียังอยู่ระหว่างก่อสร้างและยังไม่ได้เปิดการใช้งาน จึงทำให้ยังไม่มีรถเข้าถึงของสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ การได้คะแนน 34 ไม่ได้หมายความว่าโครงการล้มเหลว แต่สะท้อนว่าสถานียังไม่เปิดใช้งานเต็มรูปแบบ จึงทำให้ Walk, Cycle, Connect, Transit และ Mix ยังไม่พัฒนา คะแนนนี้ควรถูกใช้เป็นคะแนนก่อนสถานีเปิด เพื่อเปรียบเทียบกับหลังสถานีสร้างเสร็จ และเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการพัฒนา TOD รอบสถานีล่วงหน้า

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการประยุกต์ใช้มาตรฐานการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งสาธารณะ (TOD) บริเวณสถานีรถไฟจังหวัดพะเยา โดยเลือกพื้นที่ศึกษา 2 แห่ง ได้แก่ สถานีพะเยา และ สถานีมหาวิทยาลัยพะเยา พบว่าแนวคิด TOD มีศักยภาพในการยกระดับคุณภาพพื้นที่รอบสถานีให้สอดคล้องกับการพัฒนาเมืองสมัยใหม่และการใช้ระบบขนส่งมวลชนอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโครงการเป็นประเภท TOD แบบศูนย์เมืองใหม่ และยังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง การประเมินจึงอาศัยข้อมูลจากแบบแปลนและการคาดการณ์เชิงกายภาพ ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์มีข้อจำกัดบางประการโดยผลการวิเคราะห์ตามเกณฑ์มาตรฐาน TOD ชี้ให้เห็นว่า สถานีมหาวิทยาลัยพะเยามีแนวโน้มที่จะมีศักยภาพสูงกว่าสถานีพะเยาในด้านการเข้าถึงและความหนาแน่นของกิจกรรม เนื่องจากพื้นที่โดยรอบเป็นศูนย์กลางทางการศึกษาและชุมชนขนาดใหญ่ ทั้งสองสถานียังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในด้านโครงข่ายจักรยาน (Cycle) และ การเชื่อมต่อเส้นทาง (Connect) ซึ่งยังไม่มีโครงสร้างพื้นฐานที่สมบูรณ์รองรับ การพัฒนาโดยใช้แนวคิด TOD จะช่วยเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการเดินทางของประชาชน นักศึกษา และนักท่องเที่ยว ลดการพึ่งพารถยนต์ส่วนบุคคล ลดต้นทุนและเวลาในการเดินทาง ตลอดจนช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟจังหวัดพะเยาควรดำเนินการตามแนวคิด TOD อย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการวางแผนล่วงหน้า เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการเปิดใช้งานสถานี ทั้งสถานีพะเยาและสถานี

มหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งจะช่วยให้การพัฒนาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ควรนำผลการประเมินคะแนนเบื้องต้นที่ได้ในระดับ 32-34 คะแนนมาใช้เป็นค่ามาตรฐานก่อนการเปิดใช้งาน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินหลังจากสถานีสร้างเสร็จสมบูรณ์ อันจะเป็นตัวชี้วัดที่ช่วยกำหนดมาตรการปรับปรุงและพัฒนาให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต

3. เนื่องจากรวบรวมข้อมูลทางกายภาพของอาคารบางหลังที่คาดการณ์จาก Google Earth อาจมีข้อจำกัดการเข้าถึงพื้นที่ทรัพย์สินส่วนตัว ทำให้มีการคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย

4. การเพิ่มคะแนนการประเมินตามมาตรฐาน TOD สามารถทำได้โดยปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานให้เอื้อต่อการเดินเท้าและการใช้จักรยาน เช่น ทางเท้าที่ปลอดภัย มีร่มเงาและทางเชื่อมต่อกับสวนสาธารณะ พร้อมทั้งพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะให้เชื่อมโยงกับชุมชนโดยรอบอย่างมีประสิทธิภาพควบคู่กับการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบผสมผสานเพื่อให้มีพื้นที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และพื้นที่สาธารณะภายในระยะเดินถึง ส่งเสริมการเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่ในระดับที่เหมาะสมและจัดให้มีพื้นที่สีเขียวเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน รวมถึงการจำกัดการใช้รถยนต์ส่วนตัวและส่งเสริมระบบขนส่งสาธารณะ ทั้งนี้ควรบูรณาการความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และชุมชน เพื่อให้การพัฒนาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสามารถยกระดับคะแนน TOD ได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

การประยุกต์ใช้มาตรฐานการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งสาธารณะ สำหรับการพัฒนาสถานีรถไฟในพื้นที่จังหวัดพะเยา บนเส้นทางรถไฟทางคู่สายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ สำเร็จลุล่วงลงได้ความกรุณาอย่างยิ่งจาก ดร.ปาลินี สุมิตสวรรค์, ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์, อาจารย์ชัยวัฒน์ แสงศรีจันทร์ และ ดร.สุรเชษ ศรีนารา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาคำแนะนำ เสนอแนวคิด ให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ และช่วยตรวจสอบรายละเอียดขั้นตอนต่าง ๆ ตรวจสอบแก้ไขความบกพร่อง เพื่อให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น พร้อมทั้งช่วยพัฒนาการทำงานของจัดทำให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผู้จัดทำได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือทุกอย่างด้วยดีเสมอมา คุณค่าที่เกิดขึ้นจากการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ขอบอกคุณค่านั้นแต่บิดา มารดา ตลอดจนสมาชิกในครอบครัวทุกคน ที่ให้การสนับสนุนให้ความช่วยเหลือความห่วงใยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา หากมีสิ่งใดบกพร่องผู้วิจัยขออภัยไว้และขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการศึกษาพัฒนาเมืองกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง. รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร. แผนแม่บทการพัฒนาเมืองกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง. พฤษภาคม 2564.



- [2] Cervero, R. (2007). *Transit-Oriented Development's Ridership Bonus: A Product of Selection and Public Policies*. Environment and Planning A, 39(9), 2068–2085.
- [3] Cervero, R., and Kockelman, K. (1997). *Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2(3), 199–219.
- [4] Suzuki, H., Cervero, R., and Iuchi, K. (2013). *Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development*. Washington, DC: World Bank.
- [5] โครงการศึกษาพัฒนาเมืองกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่ง. *การสัมมนาเปิดตัวโครงการในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. วันศุกร์ ที่ 5 เมษายน 2562.
- [6] Institute for Transportation and Development Policy. (2010). *Our Cities Ourselves: Principles of Transport in Urban Life*. New York, New York : ITDP.
- [7] Peng, Y., Zhang, L., and Li, X. (2017). Transit-oriented development in an urban rail transportation corridor. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, 269–290.
- [8] Ewing, R., Tian, G., Lyons, T., and Terzano, K., (2017). *Trip and parking generation at transit-oriented developments: Five US case studies*. *Landscape and Urban Planning*, 160, 69–78.
- [9] China Academy of Urban Planning and Design. (2021). CAUPD releases the Annual Report 2020 of Global Cities in the vision of the Belt and Road Initiative.
- [10] Goggin, B. (2018). *CP 213 Case study: Evaluating Fruitvale TOD's impacts on transit ridership*. Department of City and Regional Planning, University of California, Berkeley.
- [11] National Association of City Transportation Officials. (2016). *Transit Street Design Guide*. Island Press.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *Smart Growth Criteria*. U.S. Environmental Protection Agency.
- [13] นนทวัฒน์ ไสสอาด. (2565) *การประเมินศักยภาพการพัฒนาและการวางแผนเชิงกายภาพพื้นที่โดยรอบสถานีจุดเปลี่ยนถ่ายการสัญจรขนส่งมวลชนทางราง*. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [14] อภิญา ผาดอน และ ภาวินี เอี่ยมตระกูล (2564). การวิเคราะห์ความสามารถในการเดินเท้าด้วยแนวคิด การพัฒนาพื้นที่รอบสถานีขนส่งมวลชนระบบราง. *ภาควิชาการผังเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. (JARS) Vol.19(2).2022.
- [15] กฤษฎา แสนสมบูรณ์ และ ธนาพันธ์ ทับทิมหิน (2566). การวิเคราะห์ศักยภาพการพัฒนาพื้นที่รอบสถานีรถไฟฟ้าในเมืองกรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล: กรณีศึกษา สายเฉลิมรัชมงคล และ สายฉลองรัชธรรม. *Eng. & Technol. Horiz.*, vol. 40, no. 3, 2023, Art. no. 400310.
- [16] บุญเชิด หนูอ้อม (2562). การศึกษาพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีรถไฟฟ้าความเร็วสูง กรณีศึกษาสถานีชลบุรี. *วารสารศิลปศาสตร์ปริทัศน์*, ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน, หน้า 79-91.
- [17] Calthorpe, P. (1993). *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream*. Princeton Architectural Press.
- [18] Zottis, L. (2015). 7 Principles for Transit-Oriented Development. TheCityFix Brasil. This article presents the seven key principles of Transit-Oriented Development (TOD), which serve as guidelines for designing cities that effectively support public transportation. The aim is to create urban environments that are walkable, compact, and sustainable.
- [19] กระทรวงคมนาคม. การรถไฟแห่งประเทศไทย. ปี 2568 โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ



การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความเร่งเชิงสเปกตรัมกับต้นทุน เหล็กเสริมกรณีศึกษาอาคารเรียน 4 ชั้น (สพฐ.)

Application of Building Information Modeling for Analyzing the Correlation Between Spectral Acceleration and Steel Reinforcement Cost: A Case Study of a Four-Story Building

ยศพล แสนซึ้ง^{1*} ณัฐชนน นาคะ¹ วุฒิพงษ์ หงษ์สุวรรณ¹ กรวิชญ์ แซ่ลี¹ และ อภิชาติ บัวกล้า²

¹ นิสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102396@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณวัสดุและต้นทุนโครงสร้างของอาคารในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ซึ่งมีระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองอาคารเรียน สพฐ. สูง 4 ชั้น เป็นกรณีศึกษา จำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis เพื่อประเมินพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ จากนั้นนำผลการออกแบบมาคำนวณปริมาณงานก่อสร้างและต้นทุน เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของการออกแบบโครงสร้างในพื้นที่ที่มีระดับความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าแรงแผ่นดินไหวมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุและต้นทุนของโครงสร้างโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูง เช่น จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีค่าความเร่งสูงสุดเมื่อเทียบกับจังหวัดในภูมิภาคอื่นส่งผลให้ปริมาณและต้นทุนของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากผลการศึกษาพบว่าเมื่อนำอำเภอที่มีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงที่สุดในแต่ละจังหวัดมาเปรียบเทียบกับพบว่าจังหวัดเชียงใหม่มีต้นทุนเหล็กเสริมสูงกว่าจังหวัดกาญจนบุรีร้อยละ 4.49 จังหวัดกาญจนบุรีสูงกว่าจังหวัดระนองร้อยละ 1.77 และจังหวัดระนองสูงกว่าจังหวัดเลยร้อยละ 1.83 แสดงให้เห็นว่าแรงแผ่นดินไหวที่มีค่าสูงก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กเสริมและต้นทุนโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบอาคารให้มีความปลอดภัยและเหมาะสมตามระดับความเสี่ยงแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ ตลอดจนช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนงบประมาณและบริหารจัดการต้นทุนโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, แรงแผ่นดินไหว, ความเร่งเชิงสเปกตรัม, ต้นทุนเหล็กเสริม, การวิเคราะห์โครงสร้าง, ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis

Abstract

This study aims to analyze the impact of earthquake forces on the variation of structural material and construction costs of buildings located in different regions of Thailand, which are characterized by varying levels of seismic intensity. A standard four-story OBEC school building model was selected as the case study and analyzed using Autodesk Robot Structural Analysis to evaluate the structural behavior underloads corresponding to each region. The design results were then used to calculate construction quantities and costs to compare the economic impacts of structural design across areas with different levels of seismic risk. The results reveal that earthquake forces directly affect the increase in structural material quantities and costs, particularly in areas with higher spectral acceleration values. Chiang Mai Province, located in the northern region, exhibited the highest spectral acceleration when compared to other provinces, leading to a noticeable increase in reinforcement steel quantities and costs. When comparing the districts with the highest spectral acceleration in each province, it was found that the reinforcement steel cost in Chiang Mai was 4.49% higher than in Kanchanaburi, Kanchanaburi was 1.77% higher than Ranong, and Ranong was 1.83% higher than Loei. These findings indicate that higher spectral acceleration due to seismic activity significantly increases the amount of reinforcement steel and overall structural costs. The outcomes of this study can serve as a fundamental reference for designing safe and cost-effective buildings according to the seismic risk level of each area. Furthermore, the findings provide valuable guidance for relevant agencies in budget planning and structural cost management to enhance the efficiency and safety of building design in earthquake-prone regions.

Keyword : Building information Modeling, Earthquake Force, Spectral Acceleration, Reinforcement Steel Cost, Structural Analysis, Software Autodesk Robot Structural Analysis



1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แบบก่อสร้างของหน่วยงานราชการส่วนใหญ่เป็นแบบก่อสร้างมาตรฐานทั่วไป โดยในอดีตอาคารเรียนของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) ถูกออกแบบโดยไม่ได้นิ่งถึงแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากในขณะนั้นไม่มีข้อกำหนดทางกฎหมายหรือมาตรฐานการออกแบบด้านทานแผ่นดินไหวที่ชัดเจน ทั้งการคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวยังถูกมองว่าเป็นปัจจัยที่ไม่จำเป็นเมื่อเทียบกับงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้แบบก่อสร้างไม่ได้รับรองรับต่อความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวอย่างเพียงพอ โดยปัจจุบันมีแนวโน้มการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงและถี่ขึ้น สร้างความเสียหายต่ออาคารหลายแห่งและอาจกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร ทำให้เห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาแบบก่อสร้างให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ หากมีการปรับแบบอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น ให้ด้านทานแผ่นดินไหวส่งผลให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้านการออกแบบโครงสร้าง เช่น การเพิ่มขนาดคานและเสา การเพิ่มความหนาของพื้น และการเสริมรายละเอียดเหล็กเสริมมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณวัสดุก่อสร้างและเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น ทำให้ต้นทุนก่อสร้างสูงขึ้น ช่วยเพิ่มความมั่นคง แข็งแรง และความปลอดภัย

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling; BIM) สามารถจำลององค์ประกอบของอาคารในรูปแบบสามมิติ ควบคู่กับข้อมูลด้านวัสดุ และพฤติกรรมโครงสร้างได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis ที่สามารถวิเคราะห์แรงกระทำภายนอก เช่น แรงจาก แผ่นดินไหว แรงลม และน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบ ลดข้อผิดพลาดในการ คำนวณ และถอดปริมาณงาน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคาร และเปรียบเทียบปริมาณ ต้นทุนเหล็กเสริมของอาคารได้ของอาคารเรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาต้นทุนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อาจจะเพิ่มขึ้นของอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น โดยทำการออกแบบอาคารเรียนด้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวไปตาม มยผ.1301/1302-61 และกฎกระทรวง พ.ศ.2566 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis เพื่อเปรียบเทียบด้านงบประมาณที่เปลี่ยนแปลงและปริมาณงานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมโครงสร้างอาคารเรียน โดยพิจารณาอาคารตั้งอยู่ในแต่ละภูมิภาคของประเทศ ได้แก่ เชียงใหม่ กาญจนบุรี เลย และระนอง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการออกแบบอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น ให้ด้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของต้นทุนเหล็กเสริมคอนกรีตจากค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 แบบอาคาร

- อาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น

1.3.2 สถานที่

- จังหวัดเชียงใหม่
- จังหวัดกาญจนบุรี
- จังหวัดเลย
- จังหวัดระนอง

1.3.3 ซอฟต์แวร์

- Autodesk Robot Structural Analysis (Education License)

1.4 ประโยชน์

1.4.1 ทราบถึงความแตกต่างด้านต้นทุนของโครงสร้างเหล็กเสริมที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละพื้นที่ในการออกแบบให้ด้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

1.4.2 ทราบถึงความสามารถในการวิเคราะห์โครงสร้างและขอบเขตความสำคัญของซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis

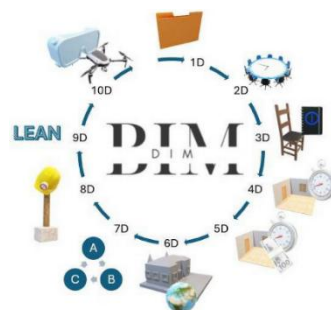
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ต้นทุน

ต้นทุนการก่อสร้างอาคารเรียนประกอบด้วยค่าใช้จ่ายหลักในการดำเนินงานก่อสร้าง โดยแบ่งเป็นต้นทุนทางตรงและต้นทุนทางอ้อมโดยวิเคราะห์ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออาคารต้องออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวเป็นหลัก ต้นทุนเหล็กเสริมค่าวัสดุเหล็กเสริม เป็นต้นทุนหลักที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออาคารต้องออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว การเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กเสริมส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการก่อสร้าง โดยเฉพาะในองค์ประกอบโครงสร้างหลัก ได้แก่ เสา คาน และผนังรับแรงเฉือน

2.2 BIM Dimension

BIM Dimension คือ ระดับของข้อมูลที่แตกต่างกันซึ่งถูกรวมเข้าไว้ในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling) โดยมีพื้นฐานคือ 3 มิติ (3D) ซึ่งเป็นแบบจำลองเรขาคณิตและความสูง ความกว้าง และความลึก

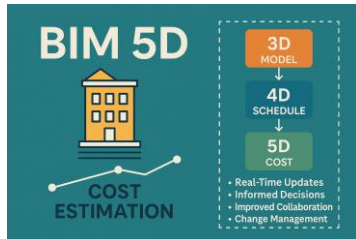


รูปที่ 1 BIM Dimension

(ที่มา : <https://www.researchgate.net/Dimensions-BIM>)



2.2.1 BIM 5D (Building Information Modeling ,5D) เป็นการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารที่ผนวกมิติด้านต้นทุนเข้ากับมิติ 3D และ 4D เพื่อช่วยวิเคราะห์ปริมาณวัสดุและต้นทุนได้อย่างแม่นยำ โดยครอบคลุมทั้งการออกแบบโครงสร้างอาคาร ให้แข็งแรงและปลอดภัย และการประมาณต้นทุน ที่เชื่อมโยงกับโมเดลโดยตรง ทำให้ปรับเปลี่ยนข้อมูลได้อัตโนมัติ ลดข้อผิดพลาด และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารโครงการ

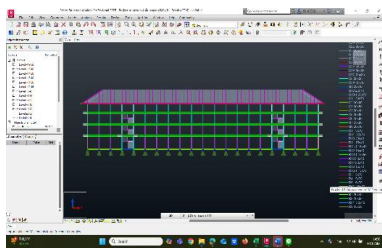


รูปที่ 2 BIM 5D

(ที่มา: <https://res.cloudinary.com/image>)

2.3 ซอฟต์แวร์

Autodesk Robot Structural Analysis ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่สามารถรองรับแรงกระทำต่าง ๆ เช่น แรงน้ำหนักใช้งาน แรงลม และแรงแผ่นดินไหวได้อย่างแม่นยำในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ นอกจากนี้โปรแกรมยังช่วยสร้างแบบจำลองโครงสร้าง พร้อมวิเคราะห์แรงภายใน เช่น โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการโก่งตัวของโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้ถอดปริมาณเหล็กเสริมและเปรียบเทียบงบประมาณการก่อสร้างระหว่างแบบอาคารได้อย่างชัดเจน



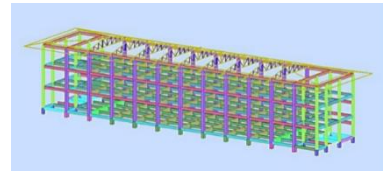
รูปที่ 3 โปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis

2.4 ทุจขภูเฒ่ผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน เนื่องจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่และความรุนแรงของแผ่นดินไหวส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารอย่างมากโดยเฉพาะในแง่ของ “แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Forces)” ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างเสียหายหรือพังถล่มได้หากไม่ได้ออกแบบมาให้รองรับแรงเหล่านั้นอย่างเพียงพอ

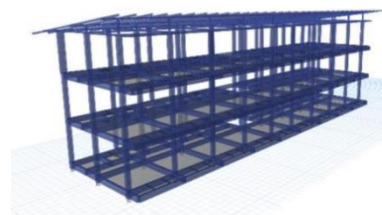
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุนิตา นุสน และคณะ (2565) ได้ศึกษาโดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis วิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมและแผ่นดินไหวต่ออาคารเรียนต้นแบบในแต่ละภูมิภาคของไทย โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมคอนกรีตกับราคากลางงานก่อสร้าง



รูปที่ 4 ผลงานวิจัย

ภูวดล กลพิมาย และคณะ (2565) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ราคาก่อสร้างอาคารที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 พบว่าอาคาร คสล. 2 ชั้น มีมูลค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น 8% และอาคาร คสล. 3 ชั้น เพิ่มขึ้น 10% เมื่อเทียบกับงานก่อสร้างปกติ สาเหตุหลักมาจากปริมาณเหล็กเสริมและเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้นตามข้อกำหนดด้านความเหนียวของอาคาร ทั้งนี้ หากเปลี่ยนกำลังของวัสดุ ผลการประมาณราคาก่อสร้างก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 5 ผลงานวิจัย

Ari Syaiful Rahman Arifin และ Jonrinaldi (2024) ได้วิเคราะห์การประมาณต้นทุนก่อสร้างบ้านขนาดเล็กที่ทนต่อแผ่นดินไหว ผลการศึกษาพบว่าบ้านต้านแผ่นดินไหวมีต้นทุนก่อสร้างสูงกว่าบ้านทั่วไป 3.37% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มต้นทุนเพียงเล็กน้อยสามารถยกระดับความปลอดภัยของบ้านและอาคารในชุมชนได้

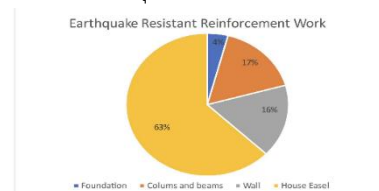


Figure 4: Earthquake Resistant Strengthening Job Detail

รูปที่ 6 ผลงานวิจัย

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ทบทวนวรรณกรรม

ศึกษาซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural ทำการติดตั้ง ตั้งค่าพื้นฐาน และทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์เพื่อให้พร้อมสำหรับการสร้างแบบจำลองอาคารและวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับอาคารเสริมมาตรฐานต้านแผ่นดินไหวทั้ง 4 พื้นที่ของประเทศไทย โดยศึกษาจาก มยผ. 1301/1302-61 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1) มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2564

3.2 พื้นที่ตั้งของอาคารและแบบอาคารที่ใช้ในการศึกษา

ทำการศึกษามาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 โดยเลือกแต่ละอำเภอในจังหวัดที่มีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมากที่สุดในแต่ละภูมิภาค เพื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของ



แผ่นดินไหวที่รุนแรงสูงสุดที่เลือกพิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1)



รูปที่ 7 มยผ.1301/1302-61

(ที่มา : <https://www.yotathai.com/>)

ตารางที่ 3.2.1 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแต่ละอำเภอใน “จังหวัดเชียงใหม่”

อำเภอ	S_s	S_1
เวียงป่าเป้า	0.855	0.195
จอมทอง	0.893	0.243
เชียงดาว	1.019	0.266
ไชยปราการ	1.018	0.265
ดอยเต่า	0.834	0.237
ดอยสะเก็ด	0.91	0.225
ดอยหล่อ	0.926	0.248
ฝาง	1.038	0.282
พร้าว	0.953	0.238
เมืองเชียงใหม่	0.963	0.248
แม่แจ่ม	0.891	0.242
แม่แตง	0.992	0.26
แม่ริม	0.984	0.254
แม่ว้าง	0.936	0.248
แม่อาว	1.08	0.317
แม่อน	0.867	0.187
เวียงแหง	1.032	0.274
สะเมิง	0.967	0.258
สันกำแพง	0.926	0.23
สันทราย	0.973	0.251
สันป่าตอง	0.938	0.244
สารภี	0.927	0.236
หางดง	0.931	0.243
อมก๋อย	0.857	0.244
ฮอด	0.849	0.237

ตารางที่ 3.2.2 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแต่ละอำเภอใน “จังหวัดกาญจนบุรี”

อำเภอ	S_s	S_1
ด่านมะขามเตี้ย	0.863	0.316
ทองผาภูมิ	0.728	0.2
ท่าม่วง	0.802	0.275
ท่ามะกา	0.481	0.154
ไทรโยค	0.747	0.21
ปอพลอย	0.659	0.197
พนมทวน	0.452	0.136
เมืองกาญจนบุรี	0.642	0.241
เลาขวัญ	0.487	0.138
ศรีสวัสดิ์	0.752	0.208
สังขละบุรี	0.84	0.234
หนองปรือ	0.674	0.199
ห้วยกระเจา	0.52	0.155

ตารางที่ 3.2.3 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแต่ละอำเภอใน “จังหวัดเลย”

อำเภอ	S_s	S_1
เชียงคาน	0.265	0.066
ด่านซ้าย	0.287	0.068
ท่าลี่	0.283	0.069
นาด้วง	0.172	0.047
นาแห้ว	0.39	0.087
ปากชม	0.202	0.053
ผาขาว	0.152	0.043
ภูกระดึง	0.148	0.042
ภูเรือ	0.279	0.066
ภูหลวง	0.239	0.055
เมืองเลย	0.215	0.054
วังสะพุง	0.222	0.053
หนองหิน	0.193	0.049
เอราวัณ	0.177	0.047

ตารางที่ 3.2.4 แสดงค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแต่ละอำเภอใน “จังหวัดระนอง”

อำเภอ	S_s	S_1
กระบุรี	0.184	0.089
กะเปอร์	0.352	0.105
เมืองระนอง	0.31	0.098
ละอุ่น	0.249	0.092
สุขสำราญ	0.355	0.112



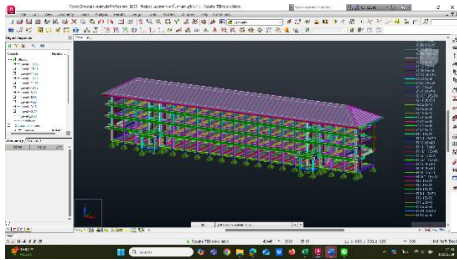
อาคารที่ใช้ทำการศึกษาเป็นอาคารเรียนของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) 4 ชั้น จำนวน 1 อาคาร ดังนี้



รูปที่ 8 รูปอาคารเรียน 324ล./55-ก (นอกเขตแผ่นดินไหว)
(ที่มา : <https://www.facebook.com/5648623>)

3.3 สร้างแบบจำลองอาคาร

สร้างแบบจำลองอาคารมิติที่ 5 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis ผนวกด้วยมิติด้านต้นทุน (Cost Dimension) เข้ากับแบบจำลองสามมิติ (3D) และมิติด้านเวลา (4D) ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณวัสดุ และต้นทุนของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละอำเภอในภูมิภาคต่อไปได้แก่ เชียงใหม่ เลย กาญจนบุรีและระนอง



รูปที่ 9 รูปแบบจำลองอาคารเรียน 3 มิติ

3.4 เพิ่มแรงแผ่นดินไหว

การออกแบบและคำนวณส่วนต่างๆ ของอาคารตามวิธีวิศวกรรมความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก ให้ใช้ค่าของแรงสูงสุดที่คำนวณจากชุดตัวคูลน้ำหนักบรรทุก แล้วแต่กรณี ดังต่อไปนี้

1. ส่วนของอาคารที่คิดจะเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกจร

$$W_u = 1.4DL + 1.7LL \quad (1)$$

2. ส่วนของอาคารที่คิดแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

$$W_u = 0.75(1.4DL + 1.7LL) + 1.0EQ \quad (2)$$

โดยที่ DL คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่

LL คือ น้ำหนักบรรทุกจร

EQ คือ แรงแผ่นดินไหว

กำหนดกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน $f'_c = 240$ กก./ตร.ซม. เหล็กเสริมหลักของโครงสร้างใช้เกรด SD40 ($f_y = 4,000$ กก./ตร.ซม.) และเสริมรองใช้เกรด SR24 ($f_y = 2,400$ กก./ตร.ซม.) และการกำหนดน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างตามกฎกระทรวง พ.ศ.2566

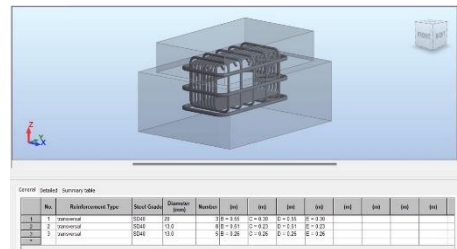
3.5 ผลการทดสอบ

จากการสร้างแบบจำลองอาคารและกำหนดแรงกระทำต่างๆ รวมถึงแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis เพื่อหาค่าแรงเฉือน (Shear Force) และโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ที่

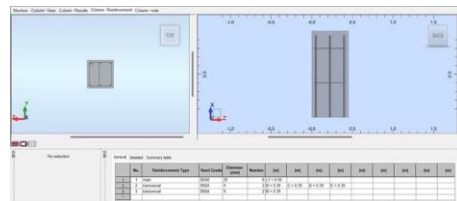
เกิดขึ้นในโครงสร้างอาคารภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค ข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใช้ในการออกแบบขนาดหน้าตัดของคานและเสา การกำหนดปริมาณเหล็กเสริม และการถอดปริมาณวัสดุเพื่อประมาณการต้นทุน

3.6 หาปริมาณเหล็กเสริมคอนกรีตที่ได้จากการออกแบบ

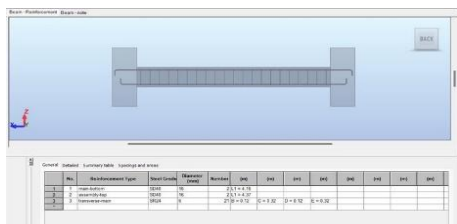
จากการวิเคราะห์แรงกระทำและพฤติกรรมของโครงสร้างในแต่ละพื้นที่เสร็จสิ้นแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบของอาคารต่างๆ ให้มีขนาดและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมสำหรับการรับแรง จากนั้นจึงดำเนินการถอดปริมาณงานโดยใช้ความสามารถของซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis ในการคำนวณปริมาณวัสดุครอบคลุมองค์ประกอบโครงสร้างหลักทั้งหมด ได้แก่ ฐานราก เสา คาน พื้น โดยที่ได้จะแสดงเป็น กิโลกรัมสำหรับเหล็กเสริม



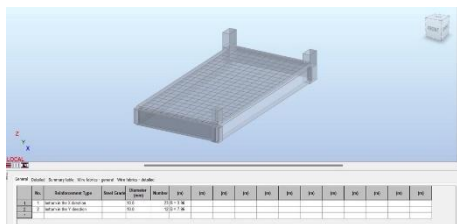
รูปที่ 10 ผลการออกแบบฐานราก



รูปที่ 11 ผลการออกแบบเสา



รูปที่ 12 ผลการออกแบบคาน



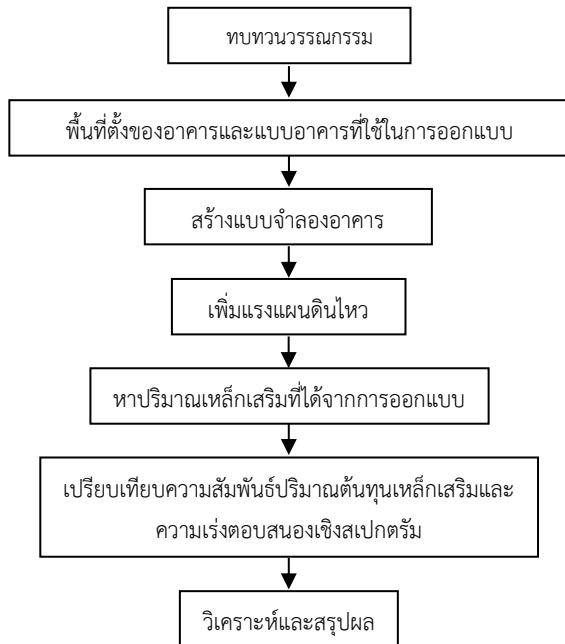
รูปที่ 13 ผลการออกแบบพื้น

3.7 วิเคราะห์และสรุปผล

ศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุนของอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้นและเปรียบเทียบค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวกับต้นทุนเหล็กเสริมคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป ของแต่ละอำเภอของ 4 พื้นที่ใน



ภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ กาญจนบุรี เลย และ หนอง



รูปที่ 14 Flowchart วิธีดำเนินการ

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 5 ในการออกแบบอาคารเรียน

การประยุกต์ใช้ แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 5 ในการออกแบบอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis เพื่อวิเคราะห์แรงภายนอกที่กระทำ เช่น แรงลม น้ำหนักบรรทุก และแรงแผ่นดินไหวโดยกำหนดขนาดหน้าตัดขององค์อาคาร เช่น คาน เสา พื้น และฐานราก ได้ตรงตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 และกฎกระทรวง พ.ศ. 2566 โดยการเพิ่มขนาดหรือเสริมกำลังวัสดุช่วยให้อาคารสามารถต้านทานแรงด้านข้าง (Lateral Forces) ที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย และยังช่วยให้ผู้วางแผนโครงการและผู้ตัดสินใจสามารถคาดการณ์งบประมาณได้อย่างแม่นยำ

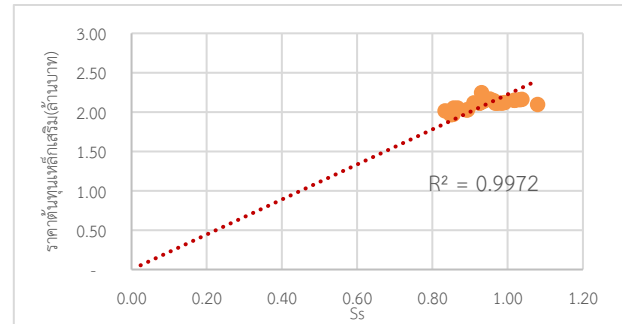
4.2 การเปรียบเทียบผลการออกแบบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น ในแต่ละพื้นที่ พบว่าผลของแรงแผ่นดินไหวมีผลต่อค่าแรงเฉือน โมเมนต์ดัด และการแอ่นตัวของอาคารแตกต่างกันเล็กน้อย โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis สามารถนำไปใช้ในการกำหนดขนาดหน้าตัดขององค์อาคารและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่จากการศึกษาพบว่าปริมาณคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารเรียน สพฐ. 4 ชั้น ในทุกพื้นที่ มีค่าเท่ากันทั้งหมดที่ 715.30 ลูกบาศก์เมตร โดยไม่มีความแตกต่าง เนื่องจากแบบอาคารมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาเหมือนกันทุกพื้นที่ ส่งผลให้ปริมาณคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลง

ผลที่ได้จากการออกแบบเมื่อนำปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และที่คาบ 1 วินาที

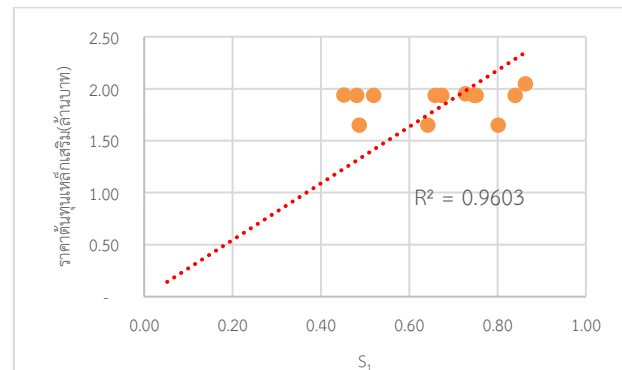
(S_1) ของแผ่นดินไหวมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองกับงบประมาณต้นทุนเหล็กเสริมจะมีความสัมพันธ์ดังกราฟ

กราฟที่ 1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) ของจังหวัดเชียงใหม่



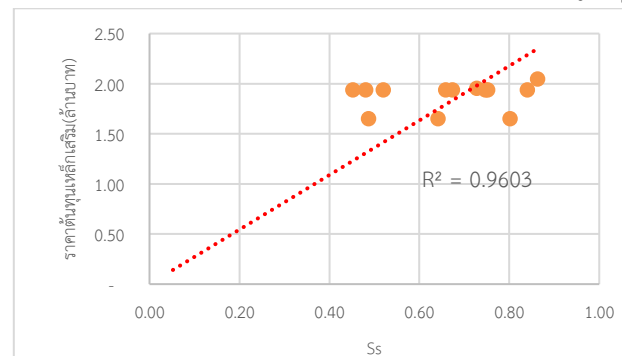
จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์พบว่าปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมแต่ละอำเภอในเชียงใหม่มีราคาต้นทุนเหล็กเสริมใกล้เคียงกันเนื่องจากค่า S_s นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กราฟที่ 2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของจังหวัดเชียงใหม่



จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์พบว่าปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมมีราคาต้นทุนเหล็กเสริมใกล้เคียงกันเนื่องจากค่า S_1 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าแนวโน้มใกล้เคียงกราฟที่ 1

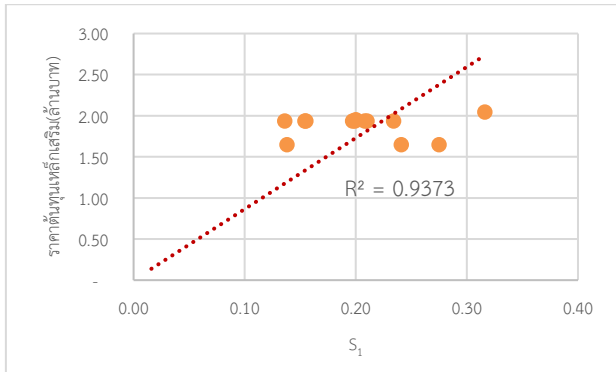
กราฟที่ 3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) ของจังหวัดกาญจนบุรี



กราฟความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนเหล็กเสริมและค่า S_s ของจังหวัดกาญจนบุรีมีแนวโน้มใกล้เคียงกับจังหวัดเชียงใหม่แต่มีราคาต้นทุนเหล็กเสริมน้อยกว่าเนื่องจากมีค่า S_s น้อยกว่าจังหวัดเชียงใหม่

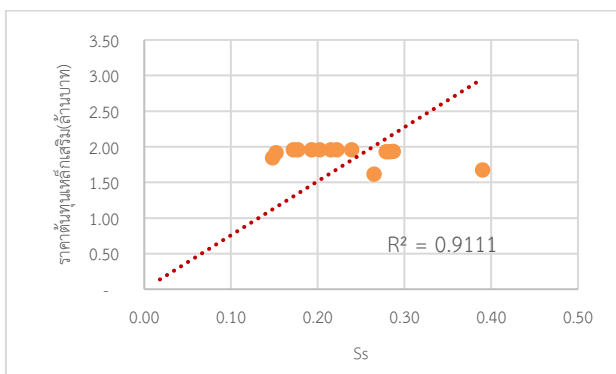


กราฟที่ 4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของจังหวัดกาญจนบุรี



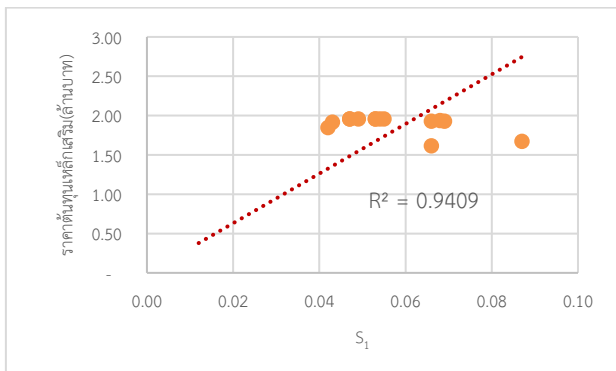
จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์พบว่าปริมาณต้นทุนหลักเสริมมีราคาต้นทุนหลักเสริมแตกต่างกันเนื่องจากค่า S_1 ของจังหวัดกาญจนบุรีมีค่าแตกต่างกันมาก

กราฟที่ 5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) ของจังหวัดเลย



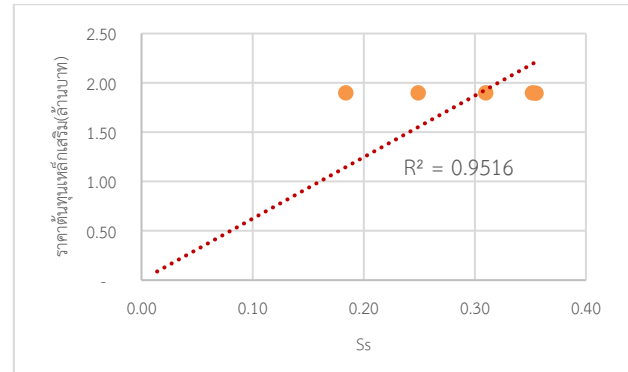
จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าปริมาณต้นทุนหลักเสริมแต่ละอำเภอในเลยนั้นมีราคาต้นทุนหลักเสริมแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับค่า S_s ในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งบางพื้นที่แสดงให้เห็นว่าค่า S_s ไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลให้ปริมาณต้นทุนหลักเสริมเพิ่มขึ้น

กราฟที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของจังหวัดเลย



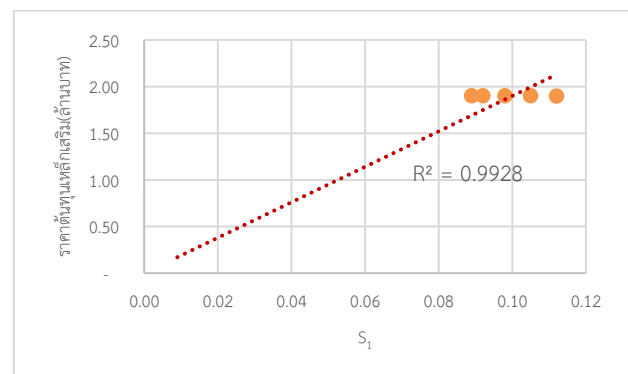
ปริมาณต้นทุนหลักเสริมของจังหวัดเลยกับค่า S_1 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้เส้นแนวโน้มแม้จะมีบางค่าคลาดเคลื่อนต่ำกว่าแนวโน้มเล็กน้อยหมายความว่าในบางกรณีราคาก่อสร้างจริงต่ำกว่าที่แบบจำลองคาดการณ์ไว้เล็กน้อย

กราฟที่ 7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) ของจังหวัดระนอง



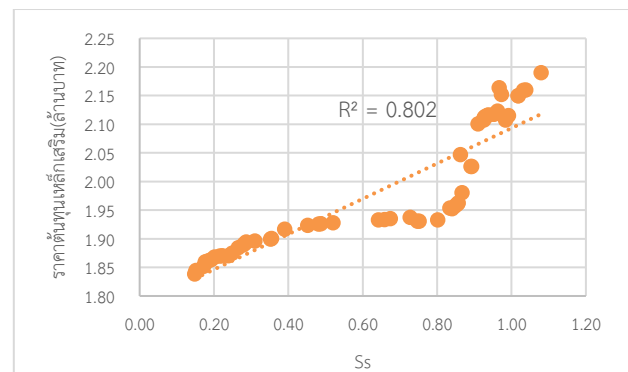
จากกราฟความสัมพันธ์ของจังหวัดระนองแสดงให้เห็นว่าค่า S_s ที่แตกต่างกันของอำเภอในจังหวัดระนองไม่ส่งผลให้ปริมาณต้นทุนหลักเสริมแตกต่างกัน

กราฟที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของจังหวัดระนอง



จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและค่า S_1 พบว่าค่า S_1 ของจังหวัดระนองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 5 อำเภอซึ่งทั้ง 5 อำเภอมีปริมาณต้นทุนหลักเสริมใกล้เคียงกัน

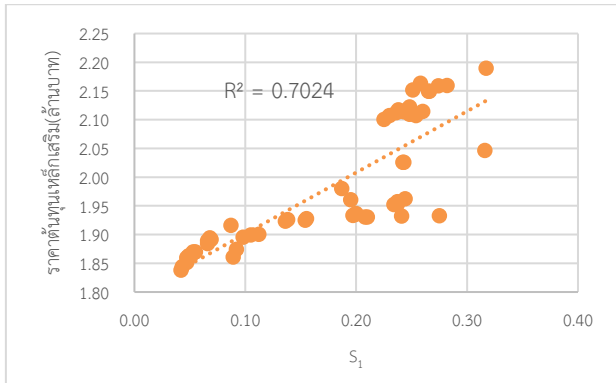
กราฟที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) ของจังหวัดทั้ง 4 ภาค



จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ของพื้นที่ส่วนใหญ่พบว่าปริมาณต้นทุนหลักเสริมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า S_s ของพื้นที่นั้นๆ



กราฟที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณต้นทุนหลักเสริมและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของจังหวัดทั้ง 4 ภาค



จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์พบว่าพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาส่วนมากปริมาณต้นทุนหลักเสริมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า S_1 ของพื้นที่นั้นๆ

5. สรุปผล

การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Robot Structural Analysis สามารถใช้วิเคราะห์ค่าแรงเฉือน ค่าโมเมนต์ดัด และค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างอาคารต้านแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งได้มีการนำข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ประกอบการออกแบบอาคารให้มีความมั่นคงและปลอดภัยต่อแรงแผ่นดินไหวได้อย่างเหมาะสม

แรงแผ่นดินไหวส่งผลต่อปริมาณเหล็กเสริมในโครงสร้างอย่างมากเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างและแรงเฉือนที่ฐานอาคารอย่างเห็นได้ชัดซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณเหล็กเสริมโดยตรงส่งผลให้โครงสร้างจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณเหล็กเสริมสูงกว่าโครงสร้างในพื้นที่อื่นอย่างมากซึ่งโครงสร้างอื่นมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าตามค่าแรงแผ่นดินไหว

ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงปริมาณวัสดุและงบประมาณในการก่อสร้าง และสามารถนำผลการวิเคราะห์มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดงบประมาณก่อสร้างของแต่ละพื้นที่ได้ กระบวนการศึกษาและผลการศึกษาแสดงถึงการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศในการออกแบบวิเคราะห์โครงสร้างและหาปริมาณโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยซอฟต์แวร์ Robot structure Analysis นั้นมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็นเสาเข็ม รวมถึงไม่มีการพิจารณาข้อมูลดิน หากมีการศึกษาต่อไปอาจมีการพิจารณาเพิ่มเติม เพื่อผลวิเคราะห์ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. ในงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างอาคารเรียน สพฐ. จากมาตรฐานออกแบบทั่วไป และมีอาคารประเภทอื่นๆ ที่ต้องการตรวจสอบความต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่กำหนดใน มยพ.1301/1302-61 ก่อนที่จะดำเนินการก่อสร้างในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการ เรื่อง การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 5 ในการวิเคราะห์เทียบต้นทุนของอาคารเรียน 4 ชั้น คณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า และ อาจารย์ ฤทธิ์ยุทธ ก้อนทอง ที่ได้กรุณาเสียสละเวลา ให้คำปรึกษาแนะนำเพิ่มเติม และ

ตรวจแก้ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อแก้ไขโครงการให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเรียบร้อย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวรวมทั้ง อาจารย์ ผู้อบรมสั่งสอนทุกท่าน ตลอดจนเพื่อนๆ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา รุ่นที่ 14 ทุกท่านที่ช่วยเหลือสนับสนุนกันมาด้วยดีโดยตลอด และขอขอบพระโยชน์อันพึงมีจากโครงการฉบับนี้ให้แก่ผู้ที่สนใจ เพื่อนำบางส่วนที่เหมาะสมไปทำประโยชน์และนำไปต่อยอดต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์ต่อตนเองและผู้อื่น

8.อ้างอิง

- [1] กฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ.2566
- [2] มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ.1301/1302-61 ปี2561 กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [3] สุนิดา นุเสน, เจษฎาพร ศรีภักดี, พรพจน์ นุเสน, จักรกฤษ ปงกันมูล, นิธิ อรรถ พัวพัน, พิทักษ์ พงษ์ หมอช้าง และมานพ แก้วโมราเจริญ (2565). การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย หน้า BIM04-1 - BIM04-5.
- [4] ภูวดล กลพิมาย, บุญมี ชินนาบุญ และสมชาย ชูชีพสกุล (2566). การวิเคราะห์ราคาก่อสร้างของอาคารเดี่ยวที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว หน้า STR57-7 - STR57-10.
- [5] Ari Syaiful Rahman Arifin , Jonrinaldi (2024). การวิเคราะห์การประมาณราคาค่าต้นทุนโครงการก่อสร้างบ้านต้านทานแผ่นดินไหวแบบง่าย หน้า 16 - หน้า 18



การพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อการประมาณราคา ด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

Development of an Autodesk Revit Add-in for BOQ Building information modelling

ชญาณีน คนอยู่^{1*} ชินฉนวนวรรณ นะรากรณ์¹ ฐานิต วิเศษสุวรรณ¹ เมธาสิทธิ์ ปิจดี¹ และ อภิชาติ บั๊กล้ำ²

¹ นิสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101508@up.ac.th

บทคัดย่อ

การถอดปริมาณงานก่อสร้างแบบดั้งเดิมซึ่งต้องอาศัยการวัดจากแบบแปลนกระดาษหรือแบบสองมิติ (2D CAD) ที่ใช้เวลานานมีความซับซ้อนและมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดสูง โดยเฉพาะโครงการที่มีขนาดใหญ่หรือแบบแปลนที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ปัจจุบันการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling :BIM) จึงได้รับความนิยมในวงการก่อสร้าง เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติ(3D) ที่เชื่อมโยงกับข้อมูลปริมาณและต้นทุน ส่งผลให้เกิดการพัฒนาแนวคิด BIM เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และควบคุมต้นทุนอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศ และการเปรียบเทียบผลการถอดปริมาณวัสดุระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีแบบจำลองสารสนเทศ BIM กรณีศึกษาบ้านพักอาศัยชั้นเดียวจำนวน 2 หลังพื้นที่ใช้สอย 224.25 และ 348.85 ตารางเมตร วิธีการวิจัยประกอบด้วยการถอดปริมาณด้วยแบบแปลนด้วยการถอดปริมาณด้วยมือ และการสร้างแบบจำลอง BIM ด้วยโปรแกรมAutodesk Revit ร่วมกับ Dynamo เพื่อเปรียบเทียบการทำประมาณวัสดุด้วยวิธีเดิมและวิธีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM เชื่อมโยงข้อมูลกับ Microsoft Excel และรหัสต้นทุน (Cost Code) ผลการวิจัยพบว่าการถอดปริมาณด้วย BIM มีความถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำมากกว่าวิธีดั้งเดิมโดยมีความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์จาก Revit และการถอดปริมาณด้วยมือ ที่ 4.82 % และ 5.17 % ตามลำดับ นอกจากนี้ BIM ยังช่วยลดข้อผิดพลาดจากการทำงานซ้ำซ้อนและสามารถอัปเดตข้อมูลอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปลน สรุปได้ว่าการพัฒนาโปรแกรมเสริมดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถอดปริมาณและการวิเคราะห์ต้นทุน ช่วยสนับสนุนการออกแบบการควบคุมงบประมาณและการบริหารโครงการก่อสร้างอย่างมีมาตรฐานและยั่งยืน

คำสำคัญ: Autodesk Revit ,การถอดปริมาณงาน,ชุดคำสั่ง Dynamo,

Abstract

Traditional Construction quantity take-off from paper drawings or 2D CAD is time-consuming complex and prone to errors particularly in large projects or with frequent design changes Building Information Modeling (BIM) has emerged as an effective solution offering 3D models linked with quantitative and cost data which has evolved into the concept of BIM for systematic cost control This study compares quantity takeoff between the traditional method and the Building Information Modeling (BIM) approach using two single-story residential houses with usable areas of 224.25 and 348.85 square meters. Quantity takeoff was conducted from construction drawings (BOQ) and BIM models created using Autodesk Revit and Dynamo, linked with Microsoft Excel and cost codes for analysis. Results show that the BIM method is faster, more accurate, and more consistent, with an average deviation of only 4.82 %, compared to 5.17 % in the traditional approach. BIM also reduces human errors and automatically updates quantities when design changes occur. In conclusion, the BIM-based workflow enhances efficiency and accuracy in quantity takeoff and cost analysis, supporting design, budgeting, and project management with greater precision and sustainability.

Keywords: Autodesk Revit, Quantity Takeoff, Dynamo Scripts,

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีต การถอดปริมาณงานก่อสร้าง (Quantity Take-Off - QTO) ดำเนินการด้วยกระบวนการแบบมือทั้งหมด โดยอาศัยการวัดค่าจากแบบแปลนกระดาษ เช่นแบบบลูพริ้นต์ (Blueprints) ร่วมกับเครื่องมือพื้นฐานอย่างไม้บรรทัดสเกล เครื่องคิดเลข หรือสไลด์รูลอร์ แม้ว่าการถอดปริมาณด้วยวิธีดังกล่าวจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำหากดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญ แต่ก็มีข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ การใช้เวลานาน ปริมาณข้อมูลที่สามารถจัดการได้มีขอบเขตจำกัด และมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดจากมนุษย์สูง อีกทั้งยังต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์เฉพาะด้านในการดำเนินงานอย่างมากจึงไม่เหมาะสมกับโครงการที่มีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนสูง ภายหลังเมื่อเทคโนโลยีเริ่มเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โปรแกรม AutoCAD ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเขียนแบบทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการจัดทำแบบแปลน ลดระยะเวลาในการทำงาน และเพิ่มความแม่นยำในการเขียนแบบ อย่างไรก็ตาม ในช่วงแรกของการใช้งาน AutoCAD ยังคงอยู่ในรูปแบบสองมิติ (2D) และไม่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลวัสดุหรือปริมาณงานได้โดยตรง ด้วยเหตุนี้การถอดปริมาณจากแบบที่เขียนด้วย AutoCAD ยังคงต้องอาศัยการวัดค่าด้วยตนเอง จากนั้นจึงนำไปคำนวณภายนอก ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อข้อผิดพลาดและความซ้ำซ้อนของงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปลนบ่อยครั้ง ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มภาระงาน แต่ยังส่งผลต่อความล่าช้าและก่อให้เกิดปัญหาในการดำเนินงานก่อสร้างโดยรวม

ปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling ; (BIM)) เป็นกระบวนการทำงานที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานสถาปัตยกรรมและการก่อสร้างที่เริ่มตั้งแต่การออกแบบอาคารจนถึงการก่อสร้าง โดยการสร้างแบบจำลองของอาคารที่เกิดจากการเชื่อมโยงข้อมูลต่างๆ ทั้งในรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่จะสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ Autodesk Revit เป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลอง 3 มิติของอาคาร (BIM) เพื่อช่วยในการถอดปริมาณวัสดุและคำนวณราคาก่อสร้าง โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองใน Revit แล้วใช้ฟังก์ชัน Schedule/Quantities เพื่อดึงข้อมูลวัสดุออกมาเป็นตาราง จากนั้นสามารถใส่ราคาต่อหน่วยของวัสดุหรือเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลต้นทุนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ราคางานย่อยและคำนวณต้นทุนรวมของโครงการได้อัตโนมัติ ซึ่งเมื่อมีการแก้ไขแบบ ระบบจะอัปเดตข้อมูลต้นทุนตามไปด้วยทันทีที่ปัจจุบันโปรแกรม Autodesk Revit ไม่เพียงแต่ใช้ในการสร้างโมเดล 3 มิติ สำหรับงานออกแบบและก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังสามารถเชื่อมโยงกับ Dynamo ซึ่งเป็นเครื่องมือการเขียนโปรแกรมเชิงภาพ (Visual Programming) เพื่อประมวลผลและส่งออกข้อมูลไปยัง Microsoft Excel โดยการดึงข้อมูลพารามิเตอร์ขององค์ประกอบอาคาร เช่น ประตู หน้าต่าง หรือวัสดุ แล้วส่งออกเป็นตารางข้อมูลเพื่อใช้ในการถอดปริมาณ การบริหารวัสดุ และการวิเคราะห์ต้นทุน พบว่ากระบวนการนี้ช่วยลดเวลาในการจัดทำข้อมูลแบบตาราง และ

เพิ่มความแม่นยำในการถอดปริมาณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบ

ดังนั้น ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) โดยประยุกต์ใช้ Dynamo ซึ่งเป็นเครื่องมือ Visual Programming สำหรับสร้างชุดคำสั่งโดยอัตโนมัติในการดึงข้อมูลปริมาณวัสดุจากโมเดล เชื่อมโยงกับ Cost Code และฐานข้อมูลต้นทุน เพื่อคำนวณและอัปเดตต้นทุนแบบอัตโนมัติเมื่อแบบมีการเปลี่ยนแปลง ทั้งยังสามารถส่งออกข้อมูลไปยังโปรแกรมภายนอก เช่น Microsoft Excel เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และควบคุมงบประมาณ โปรแกรมเสริมนี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดความผิดพลาด และส่งเสริมการบูรณาการระหว่างงานออกแบบ การประมาณราคา และการบริหารต้นทุนภายในระบบ BIM อย่างมีประสิทธิภาพ.

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อการพัฒนาส่วนเสริมสำหรับ Autodesk Revit สำหรับการประมาณราคาในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบการทำประมาณวัสดุด้วยวิธีเดิมและวิธีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านซอฟต์แวร์

- Autodesk Revit 2024 (Education License)
- Microsoft Excel

1.3.2 ขอบเขตด้านแบบ

- บ้าน ค.ศ.ล. จำนวน 2 หลัง ขนาด 224.25 ตร.ม. และขนาด 348.85 ตร.ม.

1.3.3 ขอบเขตด้านมาตรฐาน

- รหัสต้นทุน (Cost Code) มาตรฐาน วสท.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ส่วนเสริมสำหรับ Autodesk Revit เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM ได้จริง
- 1.4.2 ทราบถึงความแตกต่างของการถอดปริมาณวิธีเดิม กับ วิธีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อการประมาณราคาในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร บ้านพักอาศัย ค.ศ.ล. 1 ชั้น จำนวน 2 หลัง ตั้งอยู่ อ.เมืองลำปาง จ.ลำปาง ขนาดพื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 350 ตารางเมตร ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การประมาณราคาด้วยวิธีเดิม

การประมาณราคาด้วยวิธีดั้งเดิมมีรากฐานมาจากหลักเศรษฐศาสตร์และมาตรฐานการประเมินมูลค่า โดยอาศัยทั้ง ทฤษฎี มูลค่าทดแทน ทฤษฎีอุปสงค์ อุปทานแนวคิดมูลค่าปัจจุบัน เพื่อพัฒนาเป็นวิธีเปรียบเทียบตลาด วิธีต้นทุนและวิธีรายได้ การศึกษาทฤษฎีนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่นักวิจัยและนัก

ปฏิบัติสามารถนำไปใช้เป็นกรอบอ้างอิง เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบวิธีการสมัยใหม่ เช่น การใช้ BIM (Building Information Modeling) ในการถอดปริมาณและประมาณราคาอย่างแม่นยำ

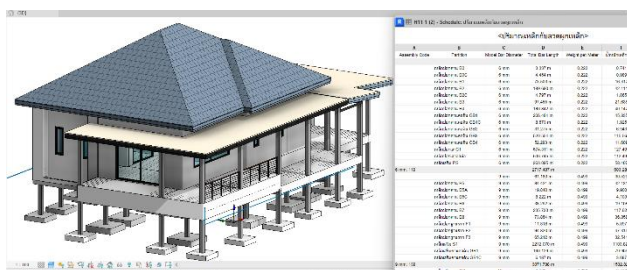
2.2 การประมาณราคาด้วย BIM

การคำนวณปริมาณงานด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถเข้ามามีส่วนร่วมในการคำนวณ ปริมาณงานทั้งหมดของอาคารได้เป็นอย่างดีเนื่องจากแบบจำลอง สารสนเทศอาคารประกอบไปด้วยรูปทรง 3 มิติ และข้อมูลคุณสมบัติตัวแปร ต่างๆ เช่น พื้นที่ ปริมาตร เส้นรอบรูป ความยาว จำนวน ฯลฯ ซึ่งสามารถ รายงานผลออกมาในรูปของตารางรายการ (Schedule) ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถให้ข้อมูลด้านปริมาณที่แม่นยำ เช่น พื้นที่หรือปริมาตร อย่างไรก็ตามสำหรับการประมาณราคาอย่างละเอียด มักมีปัญหากับข้อมูลที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุเนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดลงไปแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในการคำนวณปริมาณวัสดุโดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้น สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

2.2.1 ส่งออกข้อมูลปริมาณงานจากโปรแกรมแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ไปยังโปรแกรมสำหรับการประมาณราคา ในรูปแบบของตาราง ที่สามารถ นำไปใช้ต่อในโปรแกรมอื่นๆ ที่ใช้ในการประมาณราคา เช่น MS Excel

2.2.2 เชื่อมต่อข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารกับโปรแกรมสำหรับการ ประมาณราคาโดยตรงผ่านเครื่องมือเสริมที่ทำให้ผู้ประมาณราคาสามารถ เชื่อมข้อมูลและราคาของชิ้นต่างๆ เข้ากับชิ้นส่วนในแบบจำลองอาคาร สารสนเทศอาคาร เช่น ค่าแรง ค่าอุปกรณ์ ค่าวัสดุ ฯลฯ

2.2.3 ใช้โปรแกรมสำหรับคำนวณปริมาณงานและประมาณราคาโดยเฉพาะ เป็นการใช้โปรแกรมโดยเฉพาะที่สามารถนำเข้าแบบจำลองสารสนเทศ อาคารมายังโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณปริมาณงานและประมาณราคา โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบจำลองอาคารที่จำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลใหม่ โดยโปรแกรมจะสามารถตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลและแสดงผลแจ้งเตือนออกมาได้



รูปที่ 1 : แสดงการถอดปริมาณวัสดุจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

2.3 Level of Development (LOD)

คือการถูกพัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดของแต่ละภูมิภาคที่อธิบายความละเอียดของข้อมูลในแง่ต่าง ๆ ในยุคแรก Vico Software (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Trimble) เป็นบริษัทที่ผลิต Construction costing

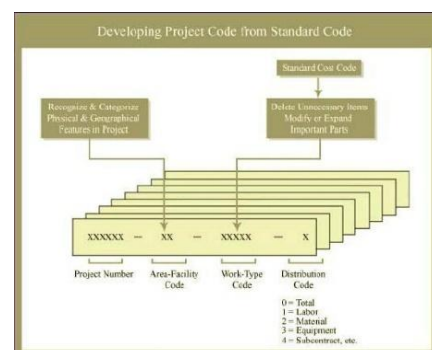
software เสนอแนวคิดเรื่อง Model Progression Specification (MPS) เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดการข้อมูลภายใน BIM Model เรียกว่า Level of Detail (LOD) แนวคิดแบบเดียวกันนี้ได้รับการยอมรับจากสถาบันสถาปนิกอเมริกัน (AIA) ถูกพัฒนาไปใช้กับขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์ด้านอื่นๆและเรียก Level of Development (LOD) และได้กำหนดระดับด้วย ตัวเลขเป็น LOD 100, LOD 200, LOD300, LOD400, LOD500



รูปที่ 2 : ตารางรายละเอียด LOD (Level of Development)ต่างๆ
(ที่มา:https://shartz.org/2019/12/what-is-Lod/)

2.4 รหัสต้นทุน หรือ Cost Codes

Cost Code หรือรหัสต้นทุนเป็นหัวใจสำคัญในการจัดระบบการบริหารต้นทุนในงานก่อสร้าง โดยช่วยในการจัดหมวดหมู่ เก็บข้อมูล และติดตามค่าใช้จ่ายของวัสดุและงานต่าง ๆ อย่างมีระบบและสอดคล้องกันระหว่างรัฐและเอกชนตัวอย่างเช่น รหัสต้นทุนตาม CSI Master Format, Uniformat หรือรหัสต้นทุนของวสท. (EIT Cost Code) ซึ่งใช้งานอย่างเป็นทางการในประเทศไทย ทำให้สามารถวิเคราะห์และควบคุมงบประมาณได้แม่นยำการใช้รหัสต้นทุน ช่วยลดความผิดพลาดในการจัดทำราคา



รูปที่ 3 : การจัดทำรหัสต้นทุน (Cost Code)

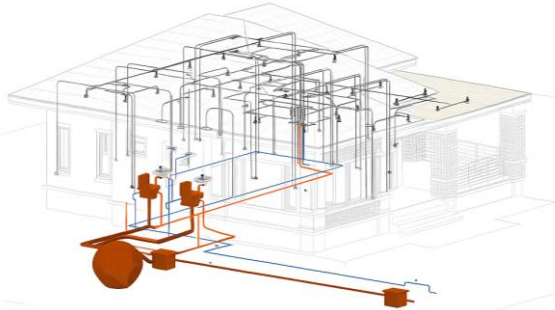
2.5 เปรียบเทียบข้อมูล

นำข้อมูลที่ไดจากการถอดปริมาณวัสดุเดิมเป็นการสร้างแบบโดยเป็นรูปแบบ 2 มิติ และจากระบบ (BIM) เป็นการสร้างแบบโดยเป็นรูปแบบทั้ง 2 มิติ 3 มิติ มาเปรียบเทียบข้อมูลในส่วนของการใช้โปรแกรมเสริม Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศ

อาคาร และนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทั้งสองกระบวนการทำงาน ได้แก่ ตรวจสอบข้อผิดพลาดและปัญหาที่เกิดขึ้น ระยะเวลาในการทำงาน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฤทธิ์ฤทธิ์ ก้อนทองและคณะ (2567) . การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานระบบประปาของธุรกิจก่อสร้างขนาดเล็ก การศึกษานี้จะนำ BIM ไปใช้กับขั้นตอนการตรวจสอบความสามารถในการก่อสร้าง ของแบบก่อสร้าง และการประมาณราคาก่อสร้าง ของแบบบ้าน คอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 หลัง ขนาด 120 ตารางเมตรและ 145 ตารางเมตร ซึ่งจะนำเทคโนโลยี BIM มาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในรูปแบบการประมาณราคาเพื่อที่นำมาศึกษาปริมาณวัสดุงานระบบประปาในการก่อสร้าง หลากหลายรูปแบบเนื่องจากโปรแกรมทำให้งานวิจัยนี้มีความแม่นยำมากขึ้น ในส่วนของการคำนวณซึ่งได้ใกล้เคียงกับการก่อสร้างจริง จากการศึกษาสรุปได้ว่า BIM สามารถลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน ลดระยะเวลาในการทำงาน และต้นทุนของปริมาณวัสดุระบบประปา แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ BIM ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะช่วยในขั้นตอนการประมาณราคา ให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว ความแม่นยำและประหยัดทั้งต้นทุนค่าก่อสร้างได้ในจำนวนมาก



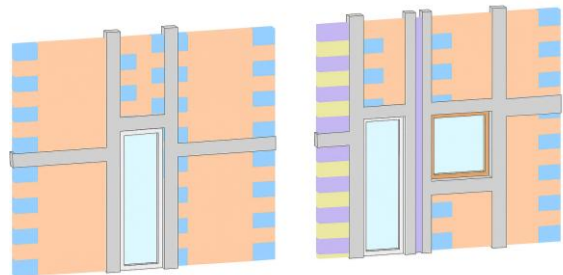
รูปที่ 4 : การบริหารจัดการงานระบบประปาของธุรกิจก่อสร้างขนาดเล็ก

งานวิจัยของสมจินตนา แชนงแก้ว และคณะ (2567) มุ่งประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 5 มิติ (5D BIM) เพื่อปรับปรุงการถอดปริมาณงาน โดยผสานข้อมูลด้านแผนงานและราคากับแบบจำลอง 3 มิติ ผลการศึกษาในโครงการก่อสร้างอาคารเรียนรู้และปฏิบัติการ 4 ชั้น พบว่าวิธีดังกล่าวช่วยลดเวลาในการทำงาน ลดข้อผิดพลาด ตรวจสอบความถูกต้องของแบบก่อสร้าง และเพิ่มประสิทธิภาพในการประมาณราคาได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม การเปรียบเทียบปริมาณงานระหว่าง Autodesk Revit และบัญชี BOQ พบว่าความแตกต่างเฉลี่ยของงานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม และงานสุขาภิบาล มีค่าน้อยกว่า 2.69%, 4.12% และ 8.43% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรแกรม Autodesk Revit มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงการวัดปริมาณงานซ้ำซ้อนได้



รูปที่ 5 : ประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 5 มิติ (5D BIM)

เมธาสิทธิ์ จันทร์พิทักษ์ และ ธนิต ธงทอง (2554). ได้ศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเชิงพารามิเตอร์เพื่อการถอดปริมาณวัสดุผนังอิฐก่อ โดยแนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยใช้การออกแบบเชิง พารามิเตอร์ เพื่อถอดปริมาณและสร้างข้อมูลรายละเอียดการก่อขึ้นส่วนอิฐ ในผนังอิฐก่อ โดยการใช้โปรแกรม Dynamo ผ่านซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ในการสร้างชุดคำสั่งเพื่อคำนวณตำแหน่งความยาว และปริมาณของ ชิ้นอิฐก่อ ผลการทดสอบระบบพบว่าใช้เวลาในการถอดปริมาณน้อยและสามารถให้แสดงผลในรูปแบบสามมิติได้ ซึ่งช่วยเสริมในการมองเห็นรายละเอียดตำแหน่งและความยาวของอิฐก่อได้สามารถนำข้อมูลของอิฐแต่ละชิ้นไปคำนวณสร้างรายการตัดอิฐเพื่อนำไปวางแผนการก่อสร้างต่อไป



รูปที่ 6 : ประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเชิงพารามิเตอร์เพื่อการถอดปริมาณวัสดุผนังอิฐก่อ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ผู้จัดทำได้แบ่งการวิจัยออกเป็นสองวิธี คือวิธีที่หนึ่ง การถอดปริมาณงานในระบบเดิม และวิธีที่สองการถอดปริมาณงานด้วยระบบ BIM ก่อนที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากสองวิธีมาทำการเปรียบเทียบในส่วนของคุณภาพ ความแม่นยำ ความซ้ำซ้อนในการทำงาน เพื่อใช้ในการตัดสินใจนำผลการศึกษาไปทดลองในการต่อไป

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

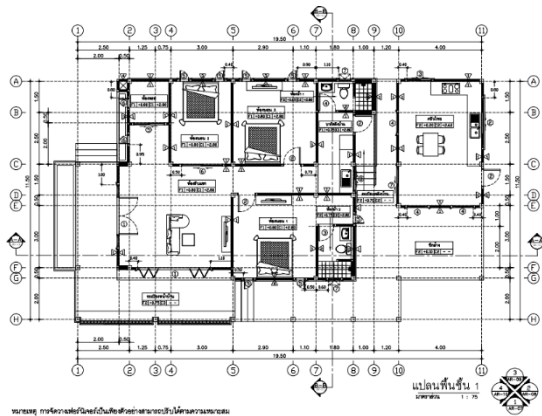
ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เช่น การประมาณราคา ทฤษฎีของ Building Information Modeling การประมาณราคาด้วย BIM ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk

Revit และศึกษาเทคนิคการใช้โปรแกรม Microsoft Excel รวมถึง การศึกษาหาค่าต้นทุน (Cost Codes) มาตรฐาน วสท.

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อเป็น แนวทางการศึกษาวิจัยครั้งนี้

3.2 คัดเลือกแบบบ้านพักอาศัยชั้นเดียว

ผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านพักอาศัย ค.ส.ล.ชั้นเดียวจำนวน 2 หลัง ขนาดพื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 350 ตารางเมตร ทั้ง 2 หลังในอำเภอเมืองลำปาง จังหวัดลำปาง



รูปที่ 7 : แบบบ้านพักอาศัยชั้นเดียว

3.3 การถอดปริมาณราคา

ผู้วิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

3.3.1 การถอดปริมาณวัสดุในระบบเดิมการถอดปริมาณวัสดุในระบบ เดิมจะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบโครงสร้างและทำการถอดปริมาณวัสดุ แบบละเอียดด้วยการถอดแบบมือ หรือ การปฏิบัติงานจริง เมื่อได้ปริมาณ วัสดุนำมาสรุปผลลงโปรแกรม Microsoft Excel

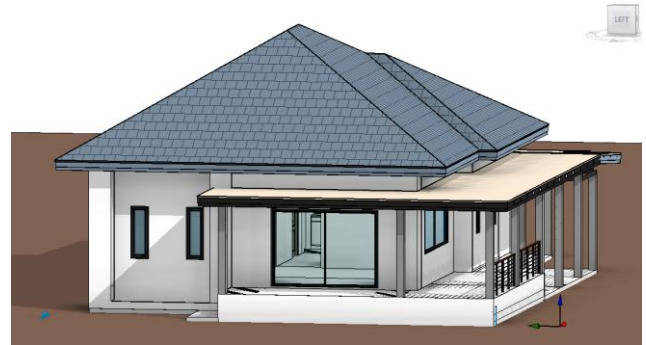


รูปที่ 8 : แสดงการถอดปริมาณวัสดุ

ที่มา : <https://www.kasikornbank.com/th>

3.3.2 การถอดปริมาณวัสดุในระบบ (BIM)

การถอดปริมาณวัสดุในระบบ (BIM) จะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบ โครงสร้างและทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปริมาณวัสดุโดย ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit



รูปที่ 9 : ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

3.3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของบ้านชั้นเดียว ภายใน ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit โดยการใช้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุแต่ละ องค์ประกอบ เช่น คาน เสา ผนัง และระบบต่าง ๆ การทำงานในระบบ แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ช่วยให้ข้อมูลทั้งหมด ถูกจัดเก็บในไฟล์เดียว และสามารถสร้างเอกสารเพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลอง สารสนเทศอาคาร เพื่อการถอดปริมาณรายงานผลออกมาในรูปแบบ รายการวัสดุ (Schedule) และนำผลวิเคราะห์ที่ได้ส่งออกข้อมูลไปยัง Microsoft Excel

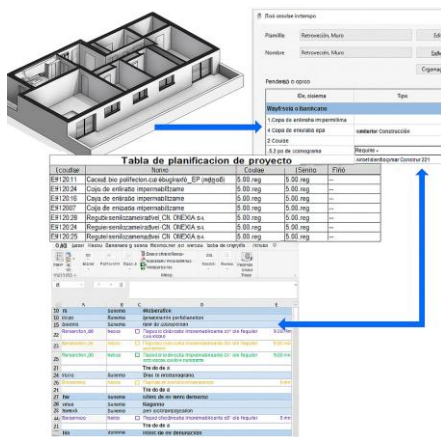
ประโยชน์ Autodesk Revit ช่วยในเรื่องแบบจำลอง 3 มิติของแบบ บ้าน ค.ส.ล 1 ชั้น สามารถทำให้ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายสำหรับการ ปรับปรุงภายหลัง อีกทั้งยังสามารถดึงข้อมูลจากโมเดล Revit และ ประมวลผลเพื่อสร้างรายการวัสดุ และปริมาณสำหรับ BOQ ได้

• 3.3.3.1 ถอดปริมาณงานและปริมาณราคาจากโมเดลด้วย ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

หลังจากใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลอง สารสนเทศอาคาร 3 มิติเรียบร้อยแล้ว จะทำการถอดปริมาณงานและปริมาณ ราคาจากแบบจำลอง 3 มิติ โดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit จะสามารถ คำนวณปริมาณพื้นที่ออกมาทำให้เราทราบว่ากิจกรรมแต่หมวดงานมี ปริมาณงานเท่าใด เพื่อนำปริมาณงานที่ได้ไปคำนวณปริมาณราคางาน แต่ละกิจกรรมได้ การถอดปริมาณงานและประมาณราคาของโมเดลโดยใช้ เครื่องมือ Schedules/Quantities(al)

3.3.4 สร้างตารางข้อมูลปริมาณด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

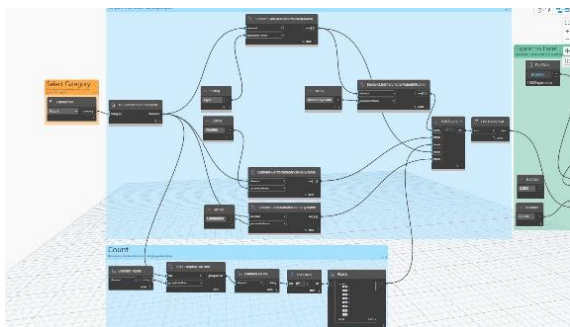
การสร้างตารางปริมาณวัสดุ (Quantity Take Off Table) ผ่าน BIM มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความเที่ยงตรง และความสอดคล้องในการจัดทำรายการวัสดุ โดยอาศัยคุณลักษณะข้อมูลขององค์ประกอบในโมเดล เช่น ข้อมูลเชิงเรขาคณิต (Area, Volume, Length) และข้อมูล semantically และสามารถปรับปรุงโดยอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในแบบจำลอง การสร้างตารางปริมาณวัสดุโดยอาศัย BIM นับเป็นกระบวนการที่ก้าวหน้า ให้ทั้งความแม่นยำ ลดข้อผิดพลาดและเวลาในกระบวนการจัดทำ BOQ และสามารถเชื่อมต่อกับมาตรฐานจัดหมวดหมู่ที่ใช้ในแต่ละประเทศได้อย่างมีระบบโดยเฉพาะภายใต้แนวทางงานวิจัยต่างๆ ที่พิสูจน์ประสิทธิภาพในเชิงปริมาณ ความแม่นยำ และการใช้งานจริง



รูปที่ 10 : แสดงตารางการถอดปริมาณวัสดุจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

3.3.5 สร้างชุดคำสั่ง Dynamo

การสร้างชุดคำสั่ง Dynamo เพื่อใช้ในการดึงข้อมูลจากแบบจำลอง BIM ที่ได้ทำการบันทึกข้อมูลไว้ โดยขั้นตอนและวิธีการทำงานของ ชุดคำสั่ง Dynamo เริ่มจากการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการ : ใช้งานภายในกลุ่มของแบบจำลองตามประเภทของกิจกรรม >> ตั้ง Run Mode เป็น Manual ก่อนซึ่งสามารถกดรันเองได้โดยอัตโนมัติ ออกแบบโครงสร้าง : คือสร้างชุดคำสั่งต่างๆของปริมาณ เพื่อแสดงผลออกในรูปแบบ Excel เพิ่ม Node ตามที่ออกแบบไว้ >> หากทดสอบเรียบร้อยแล้วให้บันทึกไฟล์ .dyn และเก็บไว้ในโฟลเดอร์ผ่าน Dynamo Player



รูปที่ 11 : ชุดคำสั่ง Dynamo ดึงข้อมูลพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

3.3.6 เพิ่ม Cost Code ในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

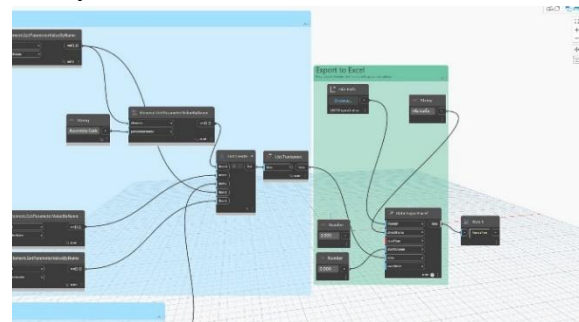
มีวิธีการและขั้นตอนในการเพิ่ม Cost Code ได้ดังนี้ เริ่มจากกำหนดโครงสร้างรหัสต้นทุน: ตั้งนโยบาย หมวดงาน ,ชนิด, วัสดุ >> ทำการวางระบบและตารางอ้างอิง จาก Excel หรือ ฐานข้อมูล สร้างพารามิเตอร์ Cost Code ใน Revit ผ่าน manage ส่วน Revit เป็ด Manage>>Project Paramiter แล้วสร้างพารามิเตอร์ เช่น “Cost Code”(String) ป้อนข้อมูลรหัสต้นทุน: กรอกข้อมูลด้วย Revit หรือ ใช้ Dynamo >> เลือก Elements ตาม Category (เช่น Walls, Doors) >> ใช้ Node เพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ Cost Code ลงไป>>ตรวจสอบให้แน่ใจว่ารหัสต้นทุนถูกต้อง สร้างตาราง Schedule ใน Revit เพื่อสรุปรหัสต้นทุน: ใน Revit : สร้าง Schedule (เช่น Floor/Wall Schedule)ใช้ Filter / Sorting ตามหมวด Cost Code เพื่อสรุปต้นทุนตามหมวดหมู่ >> ใช้ Dynamo หรือ Export Schedule ไปยัง Excel เพื่อวิเคราะห์เพิ่มเติม เช่น Pivot Table,วิเคราะห์ Variance



รูปที่ 12 : การวิเคราะห์และพัฒนาส่วนเสริม Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

3.3.7 ใช้ชุดคำสั่ง Dynamo ส่งข้อมูลไปยัง Excel

การใช้ชุดคำสั่งผ่าน Dynamo ในการส่งข้อมูลจาก BIM ไปยัง Excel ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดการข้อมูลโครงการ โดยมีทั้งวิธีที่ง่ายมีวิธีการดังนี้ เลือกข้อมูลจาก Revit โดยการใช้ Node : จัดรูปแบบข้อมูลโดยการใช้ List. >>สร้างเป็นรูปแบบตาราง กำหนดไฟล์ Excel : ใช้ File Path เพื่อระบุที่อยู่ไฟล์และชื่อซีต >> ส่งออกข้อมูล โดยใช้ Node Data. Export Excel >> 5.ตรวจสอบผลลัพธ์ เปิด Excel เพื่อตรวจสอบข้อมูล



รูปที่ 13 : ชุดคำสั่ง Dynamo สำหรับวิเคราะห์ต้นทุนสู่ Excel

3.4 วิเคราะห์ข้อมูลจากการถอดปริมาณแบบเดิมและแบบจำลองสารสนเทศอาคารในระบบ BIM

ผลการศึกษานี้จำนวนมากชี้ว่า BIM-based QTO มีจุดเด่นเหนือวิธีดั้งเดิมในแง่ความแม่นยำ การประหยัดเวลา และความพร้อมสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงลึก แม้ว่าจะต้องลงทุนล่วงหน้าในเทคโนโลยีและพัฒนา

ทักษะ แต่ผลลัพธ์ระยะยาวชี้ว่าการใช้ BIM สามารถรองรับการวิเคราะห์ต้นทุนได้ครบถ้วนและมีประสิทธิภาพอย่างแท้จริง การถอดปริมาณด้วยวิธีเดิมยังคงมีประโยชน์ในกรณีที่โครงการขนาดเล็กหรือบุคลากรยังไม่มีความพร้อมด้าน BIM แต่มีข้อจำกัดเรื่องความคลาดเคลื่อนและเวลาในขณะที่ BIM ช่วยให้การประมาณราคามีความถูกต้องสูง ลดความผิดพลาดและสนับสนุนการตัดสินใจที่ดีขึ้นเพื่อสะท้อนข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจริงในไซต์งาน

3.5 สรุปผลการดำเนินงาน

หลังจากการได้ข้อมูลและการเปรียบเทียบผลลัพธ์ทั้งสองกระบวนการ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และพัฒนาส่วนเสริม Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร อันเนื่องมาจากความเสี่ยงต่อความผิดพลาดความซ้ำซ้อนของงาน ความสามารถในการประสานงานและเชื่อมโยงข้อมูลผลการวิเคราะห์นี้จะถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการทำงานในบริษัทออกแบบและวิเคราะห์ โครงการบ้านพักอาศัย ค.ส.ล. 1 ชั้น เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนเหมาะสมต่อการใช้งบประมาณมากกว่าการใช้การถอดปริมาณวัสดุแบบเดิมเป็นการสร้างแบบโดยเป็นรูปแบบ 2 มิติ อีกทั้งยัง ช่วยให้สามารถออกแบบเชิงคำนวณและกระบวนการอัตโนมัติในรูปแบบ Dynamo และยังสามารถส่งออกไปยัง Excel ทำให้สามารถเก็บปริมาณวัสดุโดยอัตโนมัติภายหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการถอดปริมาณวัสดุแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM และการถอดปริมาณวัสดุแบบเดิมเพื่อที่จะพัฒนาส่วนเสริม Autodesk Revit เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบปริมาณวัสดุและปริมาณวัสดุ (BOQ) ในส่วนของงานโครงสร้าง ดังตาราง 1 ถึง ตาราง 6 ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณวัสดุบ้านพักอาศัยหลังที่ 1

4.1.1 การก่อสร้างแบบเดิม

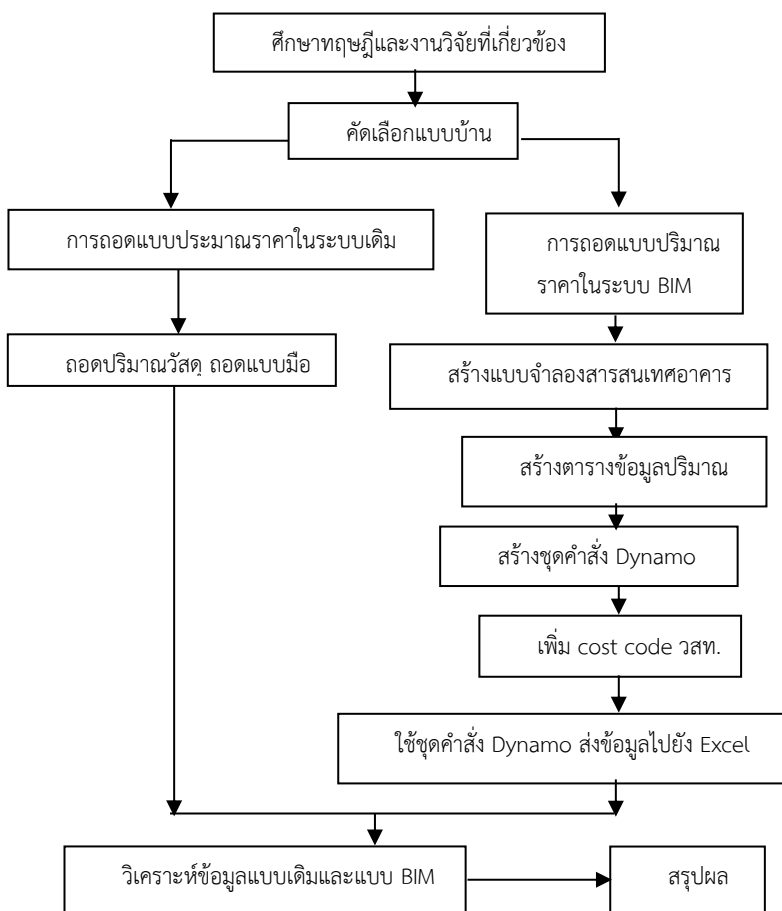
ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในงานโครงสร้าง ในการก่อสร้างแบบเดิมเป็นการถอดปริมาณโดยใช้แบบแปลนขออนุญาตก่อสร้าง อ้างอิงการถอดปริมาณ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544) ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมสรุปได้ดังตารางที่ 1

4.1.2 การก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในงานโครงสร้าง ในการก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM เป็นการถอดปริมาณโดยใช้โปรแกรม Autodesk Revit อ้างอิงการถอดปริมาณ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544) ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณงานก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM สรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 : ข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel การถอดปริมาณงานจากการถอดแบบมือ (บ้านหลังที่ 1)

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจากการถอดแบบมือ	ราคารวม
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง			
	- คอนกรีตโครงสร้าง ($f_c' = 240 \text{ ksc.}$)	ลบ.ม.	51.10	132,860.00
2	งานเหล็กโครงสร้าง			
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	491.80	13,770.40
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	1,403.89	39,308.92
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	1,653.54	49,606.20
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	845.70	25,371.00
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	144.00	3,744.00
3	งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ			
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.60 mm.	เส้น	120.00	20,505.60
	- เหล็ก C 75x45x15x2.30 mm.	เส้น	50.00	46,440.00
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	76.00	148,359.60
	- เหล็ก C 100x50x20x3.20 mm.	เส้น	54.00	83,980.80
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	15.00	32,562.00



ตารางที่ 2 : ข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel การถอดปริมาณงาน
จากการถอดแบบมือ (บ้านหลังที่ 1)

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit	ราคารวม
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง			
	- คอนกรีตโครงสร้าง ($f_c' = 240 \text{ ksc.}$)	ลบ.ม.	52.99	137,768.80
2	งานเหล็กโครงสร้าง			
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	543.88	15,228.64
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	1,532.88	42,920.64
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	1,729.34	51,880.29
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	870.97	26,128.98
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	152.46	3,963.96
3	งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ			
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.60 mm.	เส้น	128.00	21,872.64
	- เหล็ก C 75x45x15x2.30 mm.	เส้น	54.00	50,155.20
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	83.00	162,024.30
	- เหล็ก C 100x50x20x3.20 mm.	เส้น	58.00	90,201.60
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	16.00	34,732.80

4.2 ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณวัสดุบ้านพักอาศัยหลังที่ 2

4.2.1 การก่อสร้างแบบเดิม

ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในงานโครงสร้าง ในการก่อสร้างแบบเดิมเป็นการถอดปริมาณโดยใช้แบบแปลนขออนุญาตก่อสร้าง อ้างอิงการถอดปริมาณ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544) ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมสรุปได้ดังตารางที่ 3

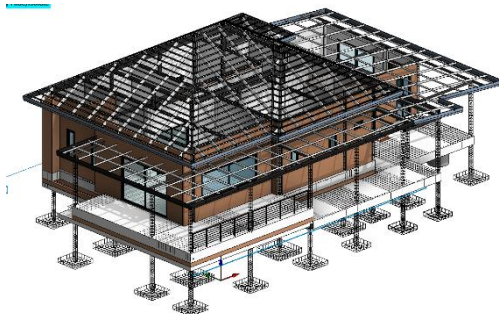
4.2.2 การก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในงานโครงสร้าง ในการก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM เป็นการถอดปริมาณโดยการใช้โปรแกรม Autodesk Revit อ้างอิงการถอดปริมาณ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544) ผลการวิเคราะห์ของการถอดปริมาณงานก่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM สรุปได้ดังตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4

ตารางที่ 3 : ข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel การถอดปริมาณวัสดุแบบจำลองอาคาร BIM (บ้านหลังที่ 2)

4.1.3 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

เป็นวิธีการสร้างแบบในส่วนของโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit โดยทำการสร้างแบบแปลนของบ้านพักอาศัยและนำส่งข้อมูลต่างๆเข้าไปในโปรแกรมสำเร็จรูปทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น ระยะ ขนาด ลักษณะ เป็นต้นแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติในรูปแบบที่ 12 และแสดงในรูปแบบ 3 มิติแสดงผลในรูปแบบที่ 13



รูปที่ 14 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 2 มิติ

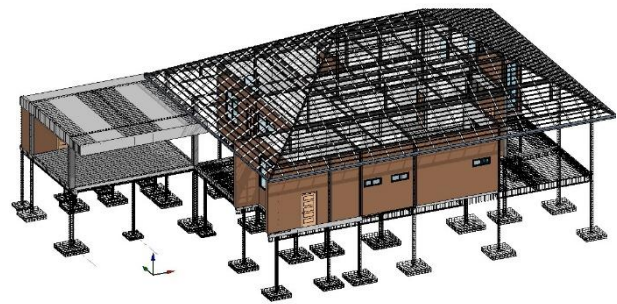


รูปที่ 15 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 3 มิติ

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจากการถอดแบบมือ	ราคารวม
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง			
	- คอนกรีตโครงสร้าง ($f_c' = 240 \text{ ksc.}$)	ลบ.ม.	128.54	334,204.00
2	งานเหล็กโครงสร้าง			
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	831.41	23,279.48
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	602.87	16,880.36
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	4,267.54	128,026.20
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	2,161.06	64,831.80
	- เหล็กเส้น DB 20 มม. (SD40)	กก.	217.57	6,527.10
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	255.65	6,646.90
3	งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ			
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.50 mm.	เส้น	116.00	19,822.08
	- เหล็กกล่อง 100x100x3.20 mm.	เส้น	33.00	64,419.30
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	87.00	135,302.40
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	37.00	80,319.60

ตารางที่ 4 : ข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel การถอดปริมาณวัสดุแบบระบบจำลองอาคาร BIM (บ้านหลังที่ 2)

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit	ราคารวม
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง			
	- คอนกรีตโครงสร้าง ($f'c = 240$ ksc.)	ลบ.ม.	134.76	350,373.40
2	งานเหล็กโครงสร้าง			
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	852.01	23,856.14
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	627.35	17,565.77
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	4477.47	134,324.13
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	2251.12	67,533.69
	- เหล็กเส้น DB 20 มม. (SD40)	กก.	235.26	7,057.68
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	272.39	7,082.17
3	งานโครงสร้างเหล็กอุปกรณ์			
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.50 mm.	เส้น	123.00	21,018.24
	- เหล็กกล่อง 100x100x3.20 mm.	เส้น	35.00	68,323.50
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	92.00	143,078.00
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	39.00	84,661.20



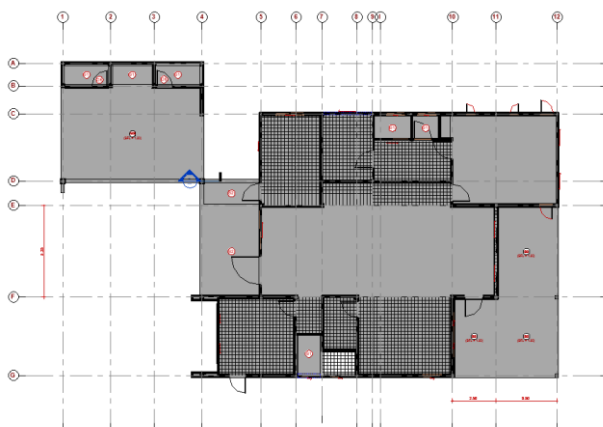
รูปที่ 17 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 3 มิติ

4.3 เปรียบเทียบปริมาณวัสดุทั้ง 2 แบบ

จากผลการวิจัยการถอดปริมาณวัสดุโครงสร้างเพื่อนำมาการก่อสร้างอาคารพักอาศัยได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบในส่วนของการประมาณ ความแม่นยำ เวลา ความสะดวกสบาย พบว่าในส่วนของการประมาณปริมาณวัสดุโครงสร้าง การถอดปริมาณที่ใช้ระบบสารสนเทศของอาคารสามารถทำได้รวดเร็วกว่า และไม่ต้องใช้โปรแกรมเสริมอื่นๆ มาช่วยในกระบวนการคำนวณ เพราะซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit สามารถวิเคราะห์และแสดงผลให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแสดงรายละเอียดเพื่อเปรียบเทียบ วิธีเดิมและวิธีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM ทั้ง 2 หลัง ดังตารางที่ 5-6 ดังนี้

4.2.3 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM

เป็นวิธีการสร้างแบบในส่วนของการสร้างด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit โดยทำการสร้างแบบแปลนของบ้านพักอาศัยและนำส่งข้อมูลต่างๆ เข้าไปในโปรแกรมสำเร็จรูปทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่นระยะ ขนาด ลักษณะ เป็นต้นแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติในรูปที่ 14 และแสดงในรูปแบบ 3 มิติแสดงผลในรูปที่ 15



รูปที่ 16 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 2 มิติ

ตารางที่ 5 : สรุปการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณงานของส่วนงานโครงสร้างจากโปรแกรม Autodesk Revit และ แบบมือ จากโครงการก่อสร้าง (บ้านหลังที่ 1)

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจากการถอดแบบมือ	ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit	ผลต่างปริมาณ (%)
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง				
	- คอนกรีตโครงสร้าง ($f'c = 240$ ksc.)	ลบ.ม.	51.10	52.99	3.56
2	งานเหล็กโครงสร้าง				
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	491.80	543.88	9.58
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	1,403.89	1532.88	8.41
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	1,653.54	1729.34	4.38
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	845.70	870.97	2.90
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	144.00	152.46	5.55
3	งานโครงสร้างเหล็กอุปกรณ์				
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.60 mm.	เส้น	120.00	128.00	6.25
	- เหล็ก C 75x45x15x2.30 mm.	เส้น	50.00	54.00	7.41
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	76.00	83.00	8.43
	- เหล็ก C 100x50x20x3.20 mm.	เส้น	54.00	58.00	6.90
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	15.00	16.00	6.25

4.5.1 งานคอนกรีตโครงสร้าง

คอนกรีตโครงสร้าง ($f'c$ 240 ksc) แบบมือ จำนวน 51.10 ลบ.ม. แบบจำลองอาคาร BIM 52.99 ลบ.ม. ผลต่าง 3.56 เปอร์เซ็นต์

4.5.2 งานเหล็กโครงสร้าง

เหล็กเส้น RB 6 มม.แบบมื่อ จำนวน 491.80 กก.แบบจำลองอาคาร BIM 543.88 กก. ผลต่าง 9.58 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น RB 9 มม. แบบมื่อ จำนวน 1,403.89 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 1532.88 กก. ผลต่าง 8.41 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น DB 12 มม. แบบมื่อ จำนวน 1,653.54 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 1729.34 กก. ผลต่าง 4.38 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น DB 16 มม.แบบมื่อ จำนวน 845.70 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 870.97 กก. ผลต่าง 2.90 เปอร์เซ็นต์ ลวดผูกเหล็ก แบบมื่อ จำนวน 144.00 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 152.46 กก. ผลต่าง 5.55 เปอร์เซ็นต์

4.5.3 งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

เหล็กกล่อง 25x25x1.60 mm. แบบมื่อ จำนวน 120 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM 128 เส้น ผลต่าง 6.25 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C 75x45x15x2.30 mm. แบบมื่อ จำนวน 50 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM 54.00 เส้น ผลต่าง 6.25 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C100x50x20x2.30 mm. แบบมื่อ จำนวน 76.00 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM 83.00 เส้น ผลต่าง 8.43 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C 100x50x20x3.20 mm. แบบมื่อ จำนวน 54 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM 58.00 เส้น ผลต่าง 6.90 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm. แบบมื่อ จำนวน 15 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM 16.00 เส้น ผลต่าง 6.25 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 สรุปการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณงานของส่วนงานโครงสร้างจาก โปรแกรม Autodesk Revit และ แบบมื่อ จากโครงการก่อสร้าง (บ้านหลังที่ 2)

ลำดับ	รายการ	หน่วย	ปริมาณงานจาก การถอดแบบมื่อ	ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit	ผลต่างปริมาณ (%)
1	งานคอนกรีตโครงสร้าง				
	- คอนกรีตโครงสร้าง (fc' = 240 ksc)	ลบ.ม.	128.54	134.76	4.61
2	งานเหล็กโครงสร้าง				
	- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	831.41	852.01	2.42
	- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	602.87	627.35	3.90
	- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SD40)	กก.	4,267.54	4477.47	4.69
	- เหล็กเส้น DB 16 มม. (SD40)	กก.	2,161.06	2251.12	4.00
	- เหล็กเส้น DB 20 มม. (SD40)	กก.	217.57	235.26	7.52
	- ลวดผูกเหล็ก	กก.	255.65	272.39	6.15
3	งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ				
	- เหล็กกล่อง 25x25x1.50 mm.	เส้น	116.00	123.00	5.69
	- เหล็กกล่อง 100x100x3.20 mm.	เส้น	33.00	35.00	5.71
	- เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm.	เส้น	87.00	92.00	5.43
	- เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.	เส้น	37.00	39.00	5.13

4.6.1 งานคอนกรีตโครงสร้าง

คอนกรีตโครงสร้าง (fc' 240 ksc) แบบมื่อ จำนวน 128.54 ลบ.ม. แบบจำลองอาคาร BIM 134.76 ลบ.ม. ผลต่าง 4.61 เปอร์เซ็นต์

4.6.2 งานเหล็กโครงสร้าง

เหล็กเส้น RB 6 มม. แบบมื่อ จำนวน 831.41 กก.แบบจำลองอาคาร BIM 852.01 กก. ผลต่าง 2.42 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น RB 9 มม. แบบมื่อ จำนวน 602.87 กก.แบบจำลองอาคาร BIM 627.35 กก. ผลต่าง 3.90 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น DB 12 มม.แบบมื่อ จำนวน 4,267.54 กก.

แบบจำลองอาคาร BIM 4,477.47 กก.ผลต่าง 4.69 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น DB 16 มม. แบบมื่อ จำนวน 2,161.06 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 2,251.12 กก. ผลต่าง 4.00 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเส้น DB แบบมื่อ จำนวน 217.57 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 235.26 กก. ผลต่าง 7.52 เปอร์เซ็นต์ ลวดผูกเหล็กแบบมื่อ จำนวน 255.65 กก. แบบจำลองอาคาร BIM 272.391 กก. ผลต่าง 6.15 เปอร์เซ็นต์

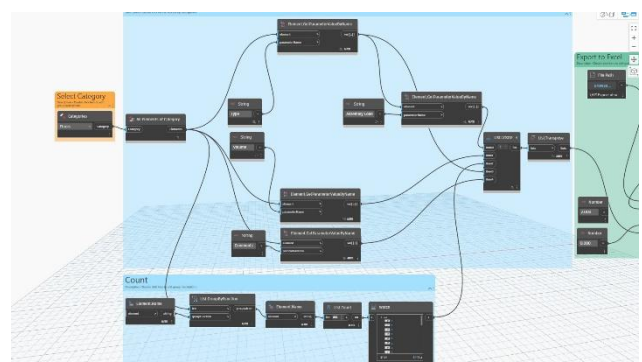
4.6.3 งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

เหล็กกล่อง 25x25x1.50 mm.แบบมื่อ จำนวน 116 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM จำนวน 123 เส้น ผลต่าง 5.69 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล่อง 100x100x3.20 mm. แบบมื่อ จำนวน 33 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM จำนวน 35 เส้น ผลต่าง 5.71 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C 100x50x20x2.30 mm. แบบมื่อ จำนวน 87 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM จำนวน 92 เส้น ผลต่าง 5.43 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก C 150x50x20x3.20 mm.แบบมื่อ จำนวน 37 เส้น แบบจำลองอาคาร BIM จำนวน 39 เส้น ผลต่าง 5.13 เปอร์เซ็นต์

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมเสริมบน Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนในระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit และ การถอดปริมาณด้วยมือของโครงการก่อสร้างบ้านพักอาศัยชั้นเดียวในส่วนงานโครงสร้าง

5.1 จากการศึกษาพบว่าการพัฒนาส่วนเสริมสำหรับ Autodesk Revit เพื่อการวิเคราะห์ต้นทุนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร การสร้างชุดคำสั่ง Dynamo เพื่อดึงข้อมูลจากแบบจำลอง BIM ที่ได้ทำการบันทึกข้อมูลไว้ โดยทำการเพิ่ม Cost code หรือรหัสต้นทุน เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Microsoft Excel ได้โดยอัตโนมัติ เพื่อวิเคราะห์แบบก่อสร้างจริงได้แม่นยำและรวดเร็วยิ่งขึ้น สามารถลดเวลาในการทำงาน ตรวจสอบความถูกต้องของแบบก่อสร้าง ลดข้อผิดพลาดของการถอดปริมาณงานและเพิ่มความเข้าใจในการทำงานของผู้ประมาณราคาได้เป็นอย่างดี แสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 : สร้างชุดคำสั่ง Dynamo ดึงข้อมูล เพื่อส่งออกข้อมูลไปยัง Excel สำหรับวิเคราะห์ต้นทุน

5.2 จากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit และ แบบก่อสร้างจริง ที่ได้จากการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิม พบว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยของงานก่อสร้างบ้านหลังที่ 1 และหลังที่ 2 มีค่าน้อยกว่าอยู่ที่ 4.82%, 5.17% ตามลำดับ ทั้งนี้ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit มีความแม่นยำใกล้เคียงกับแบบก่อสร้างจริง เนื่องจากการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมมีการวัดปริมาณงานซ้ำซ้อน เช่น การวัดปริมาณงานคอนกรีตโครงสร้าง ประกอบด้วย งานคอนกรีตพื้น คาน และเสา โดยที่โครงสร้างทั้ง 3 ส่วนซ้อนทับกัน ทำให้การวัดปริมาณงานซ้ำซ้อน แตกต่างกับปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit ที่วัดปริมาณงานเฉพาะโครงสร้างแต่ละส่วน

6.ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาระบบ Add-in ให้รองรับการวิเคราะห์ต้นทุนแบบ Real-time เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลราคาวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามตลาดได้ โดยอัตโนมัติ เช่น การดึงราคาวัสดุจากเว็บไซต์หรือฐานข้อมูลกลางของภาครัฐ

2. ควรนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับโครงการจริงหลายประเภท เช่น อาคารพาณิชย์ โรงงาน หรืออาคารสาธารณะ เพื่อประเมินความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเหมาะสมของระบบในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อ.อุทิศ ฤทธิชัย ก้อนทอง ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง ในการให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนได้ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่เริ่มดำเนินการจนกระทั่งดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ ๆ ที่ให้คำปรึกษา ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ดีสำหรับกรณีการศึกษาในวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Eastman, C.E. (2008). BIM Handbook A Guide to Building Information. John Wiley and Sons. The business value of BIM getting building information modelling to the bottom line, pp.26-27
- [2] C. Eastman, C.E. (2008). BIM Handbook A Guide to Building Information. John Wiley and Sons. The business value of BIM getting building information modelling to the bottom line, pp.29-30
- [3] Autodesk Inc. (2002). Building Information Modelling Autodesk Building industry solution. USA.

- [4] บริษัท วี อาร์ ดีจิตอล จำกัด.(2010) Building Information Modelling Autodesk. from +-.
- [5] อุทิศ ฤทธิชัย ก้อนทองและคณะ. (2565). “การศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่สามในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักแพทย์ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพแลฟฟีนผู้สูงอายุจังหวัดเชียงราย”.วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่33 ฉบับที่ 4.
- [6] ก้อนทอง อุ., และคณะ. (2020). “การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานหลักเสริมคอนกรีตของธุรกิจบ้านจัดสรร”. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 25, CEM02.
- [7] จันทรีพิทักษ์, เ., & ธงทอง, ธ. (2022). “การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเชิงพารามิเตอร์เพื่อการถอดปริมาณวัสดุผนังอิฐก่อ”. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, 27, BIM10-1.
- [8] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.(2554) มาตรฐานการคิดปริมาณงานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



การพัฒนาส่วนเสริมเพื่อวิเคราะห์หาค่าการถ่ายเทความร้อนรวม
ของอาคารเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
Development of Plugin for analyze overall thermal transfer value of the school building,
Faculty of Engineering, University of Phayao

ชญญา เคนทรภักดี¹ พนิดา สอสุธรรม¹ พัชรินทร์ อินต๊ะ¹ พัลลภ มะเดื่อ¹ พิรัชกร โยธินวัณบารุง¹
อภิชาติ บัวกล้า²

¹นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102240@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์พลังงานของอาคาร โดยใช้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังและ รั่วซึมกับภายในซอฟต์แวร์ส่วนเสริมไดนาโมเพื่อประเมินและปรับปรุงสมรรถนะด้านพลังงานของอาคารเรียนวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการสร้างฐานข้อมูลพารามิเตอร์ทางกายภาพของอาคาร ได้แก่ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ พื้นที่ผิว และค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า

ผลการวิจัยพบว่าซอฟต์แวร์ส่วนเสริมในไดนาโมสามารถประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 9.17% เมื่อเทียบกับผลลัพธ์จาก Autodesk Insight นอกจากนี้การปรับปรุงวัสดุอาคารด้วยวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสามารถลดค่า OTTV และ RTTV รวมได้สูงสุดถึง 39.80% ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าใน 10 ปีได้มากถึง 24,827,530 บาทโดยใช้เงินลงทุนปรับแก้วัสดุ 13,743,625 บาท

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าภายในโปรแกรมไดนาโมสามารถเป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์และตัดสินใจในการปรับปรุงอาคารให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานได้อย่างแม่นยำและยืดหยุ่น อีกทั้งยังสามารถลดระยะเวลาในการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์จำลองพลังงานทั่วไปเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานในสถาบันการศึกษาและอาคารสาธารณะอื่น ๆ ในอนาคต

คำสำคัญ : พลังงานอาคาร, ไดนาโม, อาคารอนุรักษ์พลังงาน

Abstract

This research aims to develop an analytical model for evaluating the building envelope energy performance using the overall thermal transfer value (OTTV) and roof thermal transfer value (RTTV) within the Dynamo platform, in order to assess and improve the energy performance of the Engineering Building at the University of Phayao. The research process involved creating a database of the building envelope's physical parameters, including material thermal conductivity, surface area, and equivalent temperature difference (T_{deq}).

The results showed that the developed Dynamo model can effectively evaluate the heat transfer performance of the building envelope, with an average deviation of only 9.17% compared to results obtained from Autodesk Insight. Furthermore, improving the building envelope with materials that have lower thermal conductivity was found to reduce the combined OTTV and RTTV values by up to 39.80%, resulting in a potential electricity cost reduction of 24,827,530 THB over 10 years, with an initial investment cost of 13,743,625 THB for material upgrades.

The findings demonstrate that Dynamo can serve as an accurate and flexible tool for energy performance analysis and decision-making in building retrofitting. Moreover, it significantly reduces analysis time compared to conventional energy simulation software. This approach is suitable for application in energy-efficient building design for educational institutions and other public facilities in the future.

Keywords: Energy Efficiency, Dynamo, Building Energy Performance

1. บทนำ

1.1 ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นประเด็นสำคัญระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของมนุษย์ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหานี้คือการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานสูงคือภาคอาคารทั้งอาคารที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน และอาคารพาณิชย์ ในประเทศไทยภาคอาคารมีส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะการใช้สำหรับระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ การใช้พลังงานดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการออกแบบและโครงสร้างอาคาร เนื่องจากส่วนประกอบของอาคาร เช่น ผนังและหลังคาเป็นตัวกลางสำคัญที่ทำให้ความร้อนจากภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ภายในส่งผลให้เครื่องปรับอากาศต้อง



ทำงานหนักขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสิ้นเปลืองพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมาก ดังนั้นการศึกษาแนวทางในการปรับปรุงและการออกแบบอาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายแต่ยังช่วยบรรเทาปัญหาภาวะโลกร้อน และส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคตจากสถิติปริมาณการใช้ไฟฟ้าของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการใช้ไฟฟ้าในปี 2566 มีปริมาณ 204,023 กิโลวัตต์/ชั่วโมง เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.4 เมื่อเทียบกับปีก่อนจากเศรษฐกิจที่ฟื้นตัวภายหลังสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (โควิด - 19) กระทรวงพลังงาน รายงานสถิติพลังงานในประเทศไทย ปี 2567 หน้าที่ 91 [1]

BIM คืออะไร Building Information Modeling หรือแบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการออกแบบและก่อสร้างอาคารโดยการสร้างแบบจำลองอาคาร พร้อมข้อมูลหรือสารสนเทศ จำลองการก่อสร้างอาคารจริง ไปใช้ในการทำงานขั้นต่อไป รวมถึงงานในสาขาวิชาชีพด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น งานด้านวิศวกรรมงานก่อสร้างและบริหารงานโครงการก่อสร้างงานบำรุงรักษาและงานบริหารจัดการอาคาร งานวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารเป็นต้น แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคาร [2]

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1.1 เพื่อทราบขั้นตอนการนำแบบจำลองสารสนเทศไปพัฒนาซอฟต์แวร์ใดนาโมในการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคาร
- 1.1.2 เพื่อทราบแนวทางการปรับปรุงพลังงานกรอบอาคารของอาคารเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ซอฟต์แวร์

- Autodesk Revit (Education license)
- Dynamo (Education license)
- Microsoft Excel (Education license)
- Autodesk Insight 360 (Education license)

1.3.2 ด้านแบบอาคาร

- อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา (EN1-2)

1.3.3 ด้านพื้นที่

- ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ (EN1-2) ต.แม่กา อ.เมือง จ.พะเยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1.4.1 ทราบแนวทางการใช้ซอฟต์แวร์ใดนาโมในการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารได้อย่างถูกต้อง
- 1.4.2 ทราบแนวทางการปรับปรุงวัสดุอาคาร เพื่อลดพลังงานกรอบอาคารได้อย่างมีนัยยะสำคัญ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำได้รวบรวมแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การถ่ายเทพลังงานความร้อนรวมของอาคาร

ที่ผ่านมาการควบคุมหรือกำกับการใช้พลังงานของอาคารในประเทศไทย ได้ดำเนินการ ภายใต้กฎหมายหลักสองกฎหมายคือพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2564 ทำให้ ปัจจุบันได้มีกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานในดังต่อไปนี้

กฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และ วิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานพ.ศ. 2552. ประกาศกระทรวงพลังงาน ของอาคารขนาดใหญ่ตาม

พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานฯ มาตรา 19 ให้ใช้ บังคับอาคารที่มีขนาดพื้นที่รวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป ต้องมีการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน [4]

2.1.1 ศึกษาวิธีการคำนวณค่า OTTV-RTTV

หลักการคำนวณค่า OTTV-RTTV ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ หลักการคำนวณจาก ประกาศกระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2552 (ออกตามความใน พ.ร.บ. การส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550) โดยการหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง และพลังงาน

- ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) คือ ค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนัก ของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกแต่ละด้าน (OTTV) รวมกันสามารถคำนวณได้จาก

$$OTTV = \frac{(AW_1)(OTTV_1) + (AW_2)(OTTV_2) + \dots + (AW_i)(OTTV_i)}{(AW_1) + (AW_2) + \dots + (AW_i)}$$

เมื่อ

AW_i คือ พื้นที่ ของผนังด้านที่ พิจารณาซึ่งรวมพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

$OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังอาคารแต่ละส่วนมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ $OTTV_i = (U_w)(1-WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC) (ESR)$ เมื่อ

OTTV ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านที่พิจารณา (วัตต์/ตร.ม.) (W/m^2)

U_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ (วัตต์/ตร.ม.องศาเซลเซียส) ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

WWR คือ อัตราส่วนของพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสง และหรือของผนังโปร่งแสง ต่อพื้นที่ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา

TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคาร

ซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ(องศาเซลเซียส)($^\circ C$)

U_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังโปร่งแสง หรือกระจก (วัตต์/ตร.ม-องศาเซลเซียส)($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (องศาเซลเซียส) ($^\circ C$)

SHGC คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคา

โปร่งแสง

SC คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนจากรังสีค่าการถ่ายเทความร้อนรวม

ESR คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสงหรือหลังคาทึบแสงมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

- ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) คือ ค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาแต่ละส่วน (RTTV_i)

ให้คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$RTTV = \frac{(Ar_1)(RTTV_1) + (Ar_2)(RTTV_2) + \dots + (Ar_i)(RTTV_i)}{(Ar_1) + (Ar_2) + \dots + (Ar_i)}$$

เมื่อ

Ar_i คือ พื้นที่ของหลังคาส่วนที่พิจารณา ซึ่งรวมพื้นที่หลังคาทึบและพื้นที่หลังคา โปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

RTTV_i คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารแต่ละส่วนมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้



$$RTTV_i = (U_r)(1-SRR) - (TD_{eq}) + (U_s)(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR)$$

U_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

SSR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา

TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ระหว่างภายนอกและภายในของหลังคาซึ่งรวมถึงผลการ ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคามีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^\circ C$)

U_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาโปร่งแสง มีหน่วย

เป็นวัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกหลังคามีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^\circ C$)

$SHGC$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง

2.2 อาคารอนุรักษ์พลังงาน

เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศไว้ โดยกฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบปรับอากาศประเภทสถานศึกษาที่กำหนดในกฎกระทรวงฯ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร ค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนรวมของหลังคาไม่เกิน 15 วัตต์ต่อตารางเมตร[5]

2.3 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building formation modeling)

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร คือ แบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการออกแบบและก่อสร้าง โดยการสร้างแบบจำลองอาคาร (building model) พร้อมข้อมูลหรือสารสนเทศ (information) ในองค์ประกอบของแบบจำลองนั้นๆ จำลองการก่อสร้างอาคารจริงซึ่งปัจจุบัน ถูกนำมาใช้กับงานออกแบบ สถาปัตยกรรมมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการผนวกการทำงานออกแบบสถาปัตยกรรม ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองอาคาร และข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลองอาคารไปใช้ในการทำงานขั้นต่อไป [6]

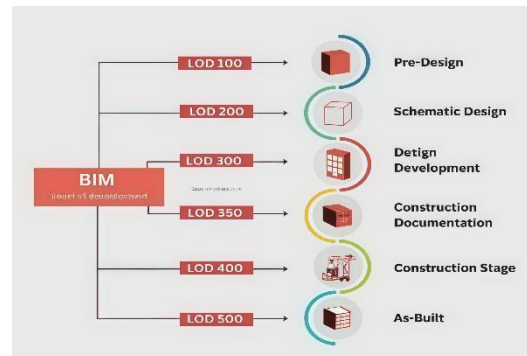


ภาพที่ 1 กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

(แหล่งที่มา : <https://revitdigitalconstruction.wordpress.com/bim-3/>)

2.4 Level of Development (LOD)

คือ การถูกพัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดของแต่ละภูมิภาคที่อธิบายรายละเอียดของข้อมูลในแง่ต่างๆ ในยุคแรก Vico Software (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Trimble) เป็นบริษัทที่ผลิต Construction costing software เสนอแนวคิดเรื่อง Model Progression Specification (MPS) เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดการข้อมูลภายใน BIM Model เรียกว่า Level of Detail (LOD) แนวคิดแบบเดียวกันนี้ได้รับการยอมรับจากสถาบันสถาปนิกอเมริกัน(AIA) ถูกพัฒนาไปใช้กับขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์ด้านอื่นๆ และเรียก Level of Development (LOD) และได้กำหนดระดับด้วยตัวเลขเป็น LOD 100, LOD 200, LOD300, LOD400, LOD500 [7]



ภาพที่ 2 ตารางรายละเอียด LOD (Level of Development) ต่างๆ

(แหล่งที่มา : <https://www.topbimcompany.com/bim-level-of-development-iod/>)

2.5 อาคาร

แบบของอาคารในงานสถาปัตยกรรมมีมากมายหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นอาคารที่พักอาศัยไปจนถึงอาคารสาธารณะความหลากหลายของการออกแบบประเภทอาคารไม่ใช่เพียงแค่ประโยชน์ด้านการใช้งานแต่ยังสัมพันธ์ไปถึงข้อกำหนดในการออกแบบอาคารต่างๆ อีกด้วย



ภาพที่ 3 รูปตัดอาคารปฏิบัติการ B18 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

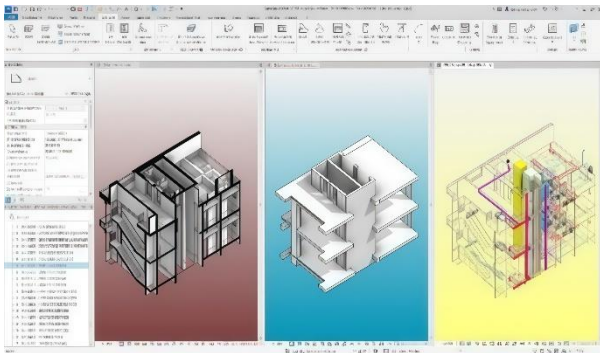
2.6 ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit (Education license)

2.6.1 Autodesk Revit เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบเขียนแบบด้านสถาปัตยกรรม งานอาคาร โดยเฉพาะของ Autodesk ในรูปแบบ CAD ที่รองรับการทำงานในระบบ

2.6.2 BIM (Building Information Modeling) เพื่อช่วยให้สถาปนิกวิศวกร และนักออกแบบสามารถสร้างการออกแบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการสร้างเอกสารประกอบ



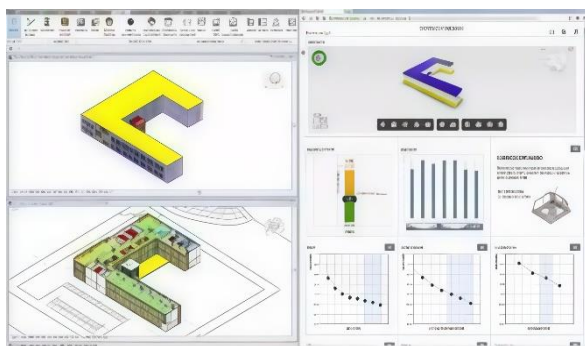
จากโมเดล Revit และยังสามารถใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์อื่นๆ ได้อย่างดี ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้งานซอฟต์แวร์ Autodesk Revit อย่างแพร่หลายทั้งในงานวิศวกรรมและงานสถาปัตยกรรมแต่เนื่องจากตัวซอฟต์แวร์ยังมีขีดจำกัดในการทำงานอยู่ซึ่งซอฟต์แวร์จุดตอในการสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงเนื่องจากซอฟต์แวร์มีการทำงานโดยใช้ระบบ อ้างอิงจากระนาบการทำงาน (work plane) เพื่อสร้างแบบจำลองหรือการนำข้อมูลจากแบบจำลองมาใช้ในการวิเคราะห์ที่ยังไม่ครอบคลุมในทุกด้าน [8]



ภาพที่ 4 โปรแกรม Autodesk Revit
(แหล่งที่มา : Autodesk Revit Features | Revit Software Features)

2.7 ซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360 (Education license)

เป็นเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่รวมอยู่ใน Autodesk Revit และ Autodesk BIM 360 ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้าน พลังงานของอาคาร ทำให้สถาปนิก วิศวกร และนักออกแบบสามารถทำการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

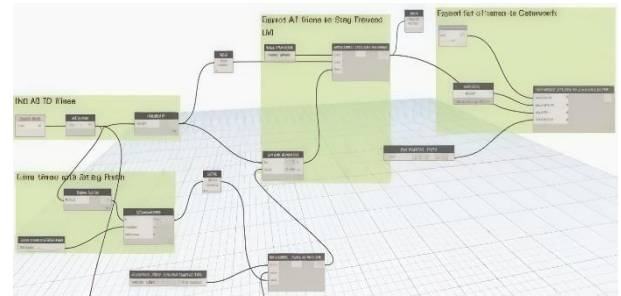


ภาพที่ 5 การใช้งานโปรแกรมAutodesk Insight
(ที่มา : <https://www.ideateinc.com/blog/2016/10/revit-2017-optimize-building>)

2.8 ซอฟต์แวร์ Dynamo

เครื่องมือเสริมที่เป็น Visual Programming ซึ่งหมายถึงการเขียนซอฟต์แวร์ด้วยภาพ พัฒนาโดยบริษัท Autodesk inc. เพื่อใช้กับซอฟต์แวร์ Revit เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำให้ผู้ที่ไม่ได้เรียนมาในสาขาคอมพิวเตอร์ทำการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อสร้างแบบ 3 มิติ ได้อย่างที่ต้องการโดยใช้การกำหนดเป็น Diagram ของแนวความคิดโดยย่อการทำงานเป็นจุด เรียกว่า Node

เมื่อต้องการทำงานอะไรก็ให้ศึกษา Node ที่ต้องการมาในการสร้างซอฟต์แวร์ และในแต่ละ Node ก็จะมีบอก Input และ Output เป็นรูปภาพ [10]

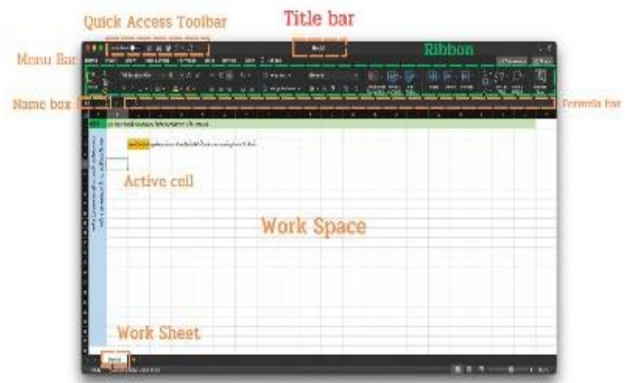


ภาพที่ 6 การใช้งานโปรแกรม Dynamo
(ที่มา: https://xiebin.gitbooks.io/paper-crane/content/01_Introduction/what_is_visual_programming.html)

2.9 ซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

เป็นซอฟต์แวร์ประเภทสเปรดชีตหรือตารางทำการที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งมีความโดดเด่นทางด้านการคำนวณและการสร้างตารางโดยสามารถช่วยให้ผู้ใช้สร้างสูตรคำนวณหรือฟังก์ชันเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้สะดวกและรวดเร็ว (อวยพร โกมลวิจิตรกุล 2550: 16) และ Microsoft Excel ยังเป็นซอฟต์แวร์ที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้งานที่เกี่ยวข้องกับตัวเลขมากที่สุด เช่น งานด้านบัญชี การเงิน วางแผนการตลาด การจัดทำงบประมาณ สถิติ สารสนเทศและอื่นๆ

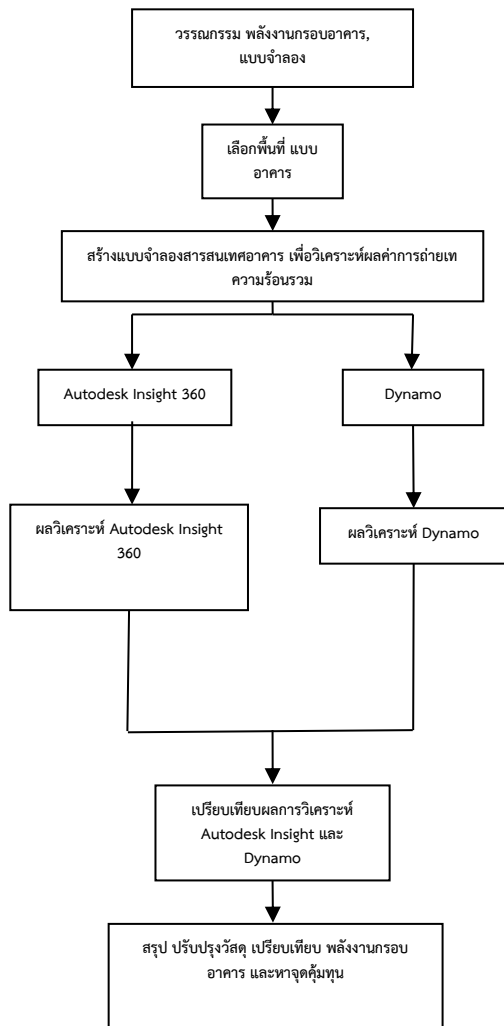
ส่วนประกอบต่างๆ ของ Excel เมื่อเปิดซอฟต์แวร์ขึ้นมาเมื่อเปิดซอฟต์แวร์ Excel แล้วหน้าจอที่ได้จะมีส่วนต่างๆ ที่ควรรู้จักซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถที่จะใช้งาน Excel ได้ตามความต้องการ



ภาพที่ 7 โปรแกรม Microsoft Excel
(ที่มา : <https://www.thepexcel.com/microsoft-excel-introduction>)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยวิเคราะห์การพัฒนาซอฟต์แวร์คำนวณพลังงานเพื่อลดค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารและค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (OTTV-RTTV) ด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคารกรณีศึกษาอาคารเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ (EN1-2) มหาวิทยาลัยพะเยา



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ทบทวนวรรณกรรม

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำได้รวบรวม แนวคิด ทฤษฎี จากงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งในและต่างประเทศ เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นกรอบแนวคิดและสนับสนุนวิธีการวิจัยในการศึกษาครั้งนี้

3.1.1 แนวทางการปรับปรุงอาคารสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเพื่อประหยัดพลังงาน

- เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกรอบอาคาร สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเชียงราย
- เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและให้กรอบอาคารมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมตามเกณฑ์ที่กำหนด

3.1.2 แนวทางการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น

- เพื่อหาแนวทางการพัฒนาและประยุกต์นำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) ในขั้นตอนการ

ออกแบบเบื้องต้น ตามเกณฑ์กฎหมายการอนุรักษ์พลังงานประเทศไทย

- เพื่อทดสอบเครื่องมือการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) ด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร(BIM) ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น
- เพื่อส่งเสริมการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานให้เข้าถึงผู้ออกแบบซึ่งเป็นผู้กำหนดปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น [11]

3.1.3 การพัฒนาเกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพพลังงานของกรอบอาคารโดยใช้รายการที่กำหนด

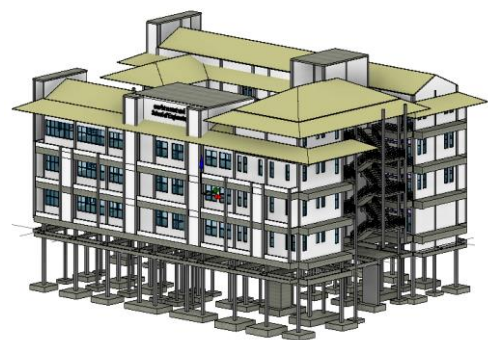
- เพื่อศึกษาและพัฒนาเกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพพลังงานของกรอบอาคาร โดยวิธีการใช้รายการที่กำหนด (prescriptive method) ที่สามารถให้ผลผ่านเกณฑ์ โดยไม่ต้องใช้โปรแกรม BEC คำนวณสำหรับทุกกลุ่มประเภทอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน
- เพื่อศึกษาแนวทางการเลือกวัสดุกรอบอาคารที่สามารถนำมาออกแบบให้สอดคล้องกับเกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพพลังงาน [12]

3.2 เลือกแบบ

การศึกษาในหัวข้อกรณีศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์ผลด้านพลังงานความร้อนค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนของหลังคาโดยเลือกใช้แบบก่อสร้างอาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพัฒนาส่วนเสริมไดนามิในการสร้างชุดข้อมูลวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารเนื่องจากในแบบก่อสร้างนี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกต่อการเรียนของนิสิตและบุคลากรทางการศึกษา

3.3 สร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทพลังงานกรอบอาคารมีขั้นตอนเบื้องต้นดังนี้การสร้างแบบจำลองสถาปัตยกรรมอาคารตัวอย่างภาพที่ (9) ทำการตั้งค่าวัสดุกรอบอาคารให้แสดงผลค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทพลังงานกรอบอาคารอย่างถูกต้องจากนั้นสร้างแบบจำลองด้านพลังงานความร้อน



ภาพที่ 9 แบบจำลองสถาปัตยกรรม อาคารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยพะเยา

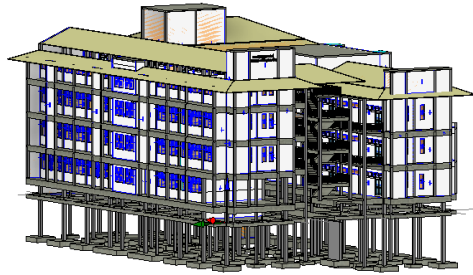
3.4 พลังงานกรอบอาคาร

3.4.1 ซอฟต์แวร์ไดนามิ

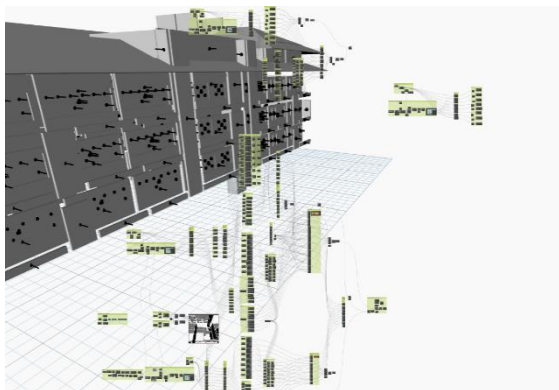
การวิเคราะห์ข้อมูลด้านวัสดุทางการศึกษาซอฟต์แวร์ไดนามิมาใช้ในการบ่งชี้ข้อมูลของค่าต่างๆในวัสดุที่ใช้ในการคิดค่าพลังงานรอบ



อาคารที่จำลองในตัวแบบจำลองสารสนเทศอาคารเรียกว่าการทำงานเป็น node เมื่อต้องวิเคราะห์ผลการทำงานต่างๆที่สนใจศึกษาตัวแปร node มาสร้างโปรแกรมและในแต่ละ node ก็จะบอก Input และ Output เป็นรูปภาพ



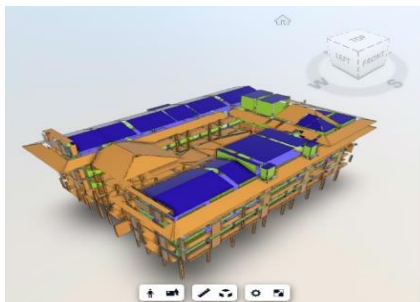
ภาพที่ 10 แบบจำลองกำหนด node วิเคราะห์พลังงาน



ภาพที่ 11 dynamo node analysis

3.4.2 Autodesk Insight

วิเคราะห์เชิงความร้อนใช้ในการวิเคราะห์เวลาและอุณหภูมิที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนหรือความเย็นลงตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่กำลังวิเคราะห์กรณีศึกษาการถ่ายเทพลังงานความร้อนรวมของอาคาร AutodeskInsightนำมาปรับใช้ในการวิเคราะห์พลังงานตัวแบบจำลองสารสนเทศอาคาร Autodesk Insight อ้างอิงมาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [13]



ภาพที่ 12 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์(EN1-2) ที่อยู่ในโหมดวิเคราะห์พลังงาน ใน Autodesk Insight 360

3.5 ศึกษาแบบจำลองสารสนเทศอาคารจากตัวแปรด้านวัสดุที่ส่งผลต่อการถ่ายเทพลังงานรอบอาคาร

การศึกษาแบบจำลองสารสนเทศอาคารในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองสารสนเทศวัสดุที่ใช้ส่งผลต่อการวิเคราะห์ผลค่าการถ่ายเทพลังงานรอบอาคารจากซอฟต์แวร์ หรือไม่ว่าไร ทำการวิเคราะห์ข้อมูลวัสดุโดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ ได้แก่ การทำสีวัสดุผนังหลังคาสีขาว โค้ดวัสดุ B10015 ฉนวนกันความร้อนชนิด (PE) หนา 50 มิลลิเมตร โค้ดวัสดุ B1071 ฉนวนกันความร้อนชนิด (PU) หนา 50 มิลลิเมตรโค้ดวัสดุ B1073 [14]

3.6 เปรียบเทียบสรุปผลการศึกษา

การปรับแก้วัสดุอาคาร เพื่อมาวิเคราะห์พลังงานรอบอาคารที่ลดลงโดยใช้ซอฟต์แวร์ไดนาโม ร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยใช้ค่าความเคลื่อนไหวจากการเปรียบเทียบในซอฟต์แวร์ Autodesk Insight ในช่วงก่อนการปรับแต่งอาคารมาเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของซอฟต์แวร์ไดนาโมที่ทางผู้จัดทำได้พัฒนา นำไปสู่การเปรียบเทียบต้นทุนระยะคุ้มทุนในการปรับแก้ไขอาคาร เพื่อการลดการใช้ไฟฟ้าในอาคารแบบยั่งยืน

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์พลังงานความร้อนของกรอบอาคารโดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร จากอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ (EN1-2) ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา อาคารดังกล่าวมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี การปรับปรุงวัสดุรอบอาคารทำให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพด้านการอนุรักษ์พลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ร่วมกับส่วนเสริม Dynamo ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนและประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคารได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบ ส่งผลให้อาคารต้นแบบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับมาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน

4.1 ผลวิเคราะห์ซอฟต์แวร์คำนวณพลังงาน

การวิเคราะห์ผลการใช้วัสดุปรับปรุงอาคารที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนรวมของกรอบอาคารสามารถวิเคราะห์ผลได้จากการใช้โปรแกรม Autodesk Revit วิเคราะห์พลังงานรอบอาคารที่เปลี่ยนแปลง ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบซอฟต์แวร์คำนวณพลังงาน

โปรแกรมวิเคราะห์	OTTV (W/m ²)	RTTV (W/m ²)	พลังงานรอบอาคาร (kWh/m ² /year)	% ความคลาดเคลื่อน
Dynamo	43.81	20.21	655.14	9.17
Insight			595.05	

ตามมาตรฐานของ ASHRAE โปรแกรม Insight ไม่สามารถแสดงผลค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังภายนอก (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) ได้อย่างแยกส่วนอย่างชัดเจน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำส่วนเสริม Dynamo มาใช้ร่วมกับกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อให้สามารถคำนวณค่าดังกล่าวได้ โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐานASHRAEและกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งกำหนดให้ค่าOTTVต้องไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร และค่า RTTV ต้องไม่เกิน 15 วัตต์ต่อตารางเมตร ตารางที่ 2 ตารางรายการวัสดุที่เลือกใช้

รายการวัสดุปรับแต่งเลือกใช้	code
ทาสีวัสดุผนังหลังคาสีขาว	B10015
ฉนวนกันความร้อนชนิด (PE) หนา 50 มิลลิเมตร	B1071
ฉนวนกันความร้อนชนิด (PU) หนา 50 มิลลิเมตร	B1073



ตารางที่ 3 ตารางพลังงานกรอบอาคารปรับแต่งวัสดุ จาก Dynamo

พลังงาน กรอบ อาคารก่อน ปรับแต่ง (kWh/m ² / year)	วัสดุปรับแต่ง	OTTV (W/m ²)	RTTV (W/m ²)	พลังงานกรอบ อาคารหลัง ปรับแต่ง (kWh/m ² /year)	% ลดลง
655.14	B10015	43.81	19.12	573.67	12.44
655.14	B1071	43.81	11.64	394.39	39.80
655.14	B1073	43.81	9.37	398.31	39.20
655.14	B1071+air void 5 cm.	43.81	10.51	393.09	40.00
655.14	B1073+Air void 5 cm.	43.81	8.62	387.87	40.80
655.14	B1071+B10015	43.81	11.12	391.88	40.18
655.14	B1073+B10015	43.81	9.89	389.21	40.59
655.14	B1071+B10015+air void 5 cm	43.81	10.98	390.55	40.39
655.14	B1073+B10015+air void 5 cm	43.81	9.72	388.33	40.73

ตารางที่ 4 ค่าไฟที่ลดลงต่อปี คิดค่าจากค่ารอบพลังเดิม โดยราคาค่าไฟ
เดิมอยู่ที่ 6,237,970 บาท

วัสดุปรับแต่ง	พลังงานกรอบ อาคาร (kWh/m ² /year)	พื้นที่หลังคา (m ²)	หน่วย ไฟ	ค่าไฟต่อปี(บาท)	ค่าไฟที่ลดลงต่อปี (บาท)
B10015	573.67	2,198.98	4.33	5,462,247	775,723
B1071	394.39	2,198.98	4.33	3,755,217	2,482,753
B1073	398.31	2,198.98	4.33	3,792,542	2,445,428
B1071+air void 5 cm.	393.09	2,198.98	4.33	3,742,839	2,495,131
B1073+Air void 5 cm.	387.87	2,198.98	4.33	3,693,137	2,544,833
B1071+B10015	391.88	2,198.98	4.33	3,731,318	2,506,652
B1073+B10015	389.21	2,198.98	4.33	3,705,895	2,532,075
B1071+B10015+air void 5 cm	390.55	2,198.98	4.33	3,718,654	2,519,316
B1073+B10015+air void 5 cm	388.33	2,198.98	4.33	3,697,516	2,540,454

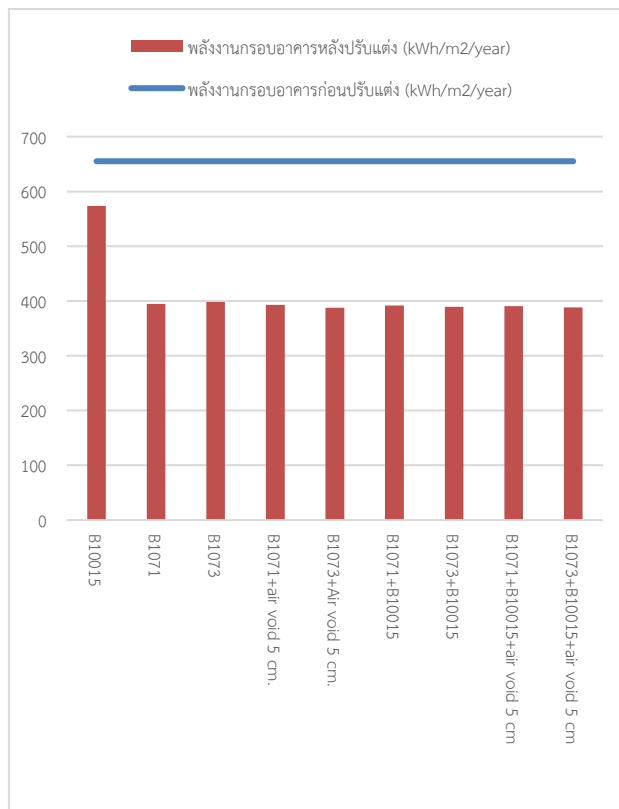
ตารางที่ 5 ราคาวัสดุปรับแต่ง

วัสดุปรับแต่ง	พื้นที่หลังคา (m ²)	ราคาต่อตาราง เมตร	ค่าแรง	ราคารวม(บาท)
B10015	2198.98	59	28	3,632,715
B1071	2198.98	250	25	13,743,625
B1073	2198.98	355	25	19,515,948
B1071+air void 5 cm.	2198.98	250	30	16,492,350
B1073+Air void 5 cm.	2198.98	355	30	23,419,137
B1071+B10015	2198.98	309	53	36,012,695
B1073+B10015	2198.98	414	53	48,250,019
B1071+B10015+air void 5 cm	2198.98	309	63	42,807,544
B1073+B10015+air void 5 cm	2198.98	414	63	57,353,796

ตารางที่ 6 เปรียบค่าไฟที่ลดลงใน 10 ปี กับวัสดุปรับแต่ง

วัสดุปรับแต่ง	ค่าไฟที่ ลดลงต่อปี (บาท)	ค่าไฟที่ลดลงใน 10 ปี(บาท)	ราคารวม	ส่วนต่างการลงทุน
B10015	775,723	7,757,230	3,632,715	4,124,515
B1071	2,482,753	24,827,530	13,743,625	11,083,905
B1073	2,445,428	24,454,280	19,515,948	4,938,332
B1071+air void 5 cm.	2,495,131	24,951,310	16,492,350	8,458,960
B1073+Air void 5 cm.	2,544,833	25,448,330	23,419,137	2,029,193
B1071+B10015	2,506,652	25,066,520	36,012,695	-10,946,175
B1073+B10015	2,532,075	25,320,750	48,250,019	-22,929,269
B1071+B10015+air void 5 cm	2,519,316	25,193,160	42,807,544	-17,614,384
B1073+B10015+air void 5 cm	2,540,454	25,404,540	57,353,796	-31,949,256

แผนภูมิ 1 เปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารปรับแต่งวัสดุ จาก Dynamo

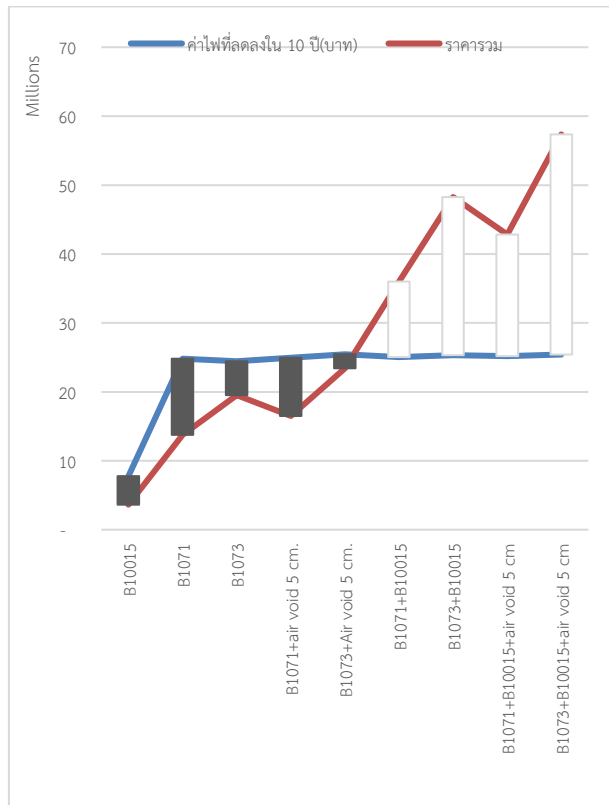


4.2 ผลวิเคราะห์ระยะคุ้มทุนในการปรับแต่งอาคาร

การวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารที่ได้จากการปรับปรุงวัสดุ โดยจะอ้างอิงจากการใช้ซอฟต์แวร์ Dynamo มาวิเคราะห์ค่าไฟที่เกิดจากพลังงานกรอบอาคาร และหาค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคารมาหาระยะคุ้มทุน เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจสำหรับการปรับแต่งอาคาร



แผนภูมิ 2 จุดคุ้มทุน



จากแผนภูมิ วัสดุปรับแต่งที่มีค่าความต่างกันระหว่างราคารวมของการลงทุนปรับแต่ง กับ ค่าไฟที่ลดลงใน 10 ปี จะเห็นได้ว่า โฟมโพลีเอทีลินี มีความคุ้มค่าการลงทุนในการปรับแต่งมากที่สุด

5.สรุปผลวิจัย

5.1 สรุปขั้นตอนการนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

จากผลการวิเคราะห์ที่โครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นในซอฟต์แวร์ Dynamo มีความสามารถในการเรียนรู้และประมาณค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคารโดยผลการเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ Autodesk Insight พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่เพียง 9.17%

5.2 สรุปผลวิเคราะห์วัสดุปรับปรุงกรอบอาคาร

จากผลการวิเคราะห์พบว่า การปรับปรุงอาคารกรอบอาคารด้วยวัสดุที่เหมาะสมมีผลต่อการลดการสูญเสียพลังงานได้อย่างมีนัยยะสำคัญ โดยเฉพาะการใช้วัสดุฉนวนกันความร้อน เช่น ฉนวนใยแก้ว และ โฟมโพลีเอทีลินี ซึ่งสามารถค่าพลังงานกรอบอาคารได้มากกว่า 40.73% เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารเดิม ขณะเดียวกันการหาวัสดุฉนวนหลังคาเป็นสีขาว แม้จะช่วยลดการใช้พลังงานได้ในสัดส่วนที่น้อยกว่าแต่ก็มีประโยชน์ในการลดการดูดซับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์และสามารถเสริมประสิทธิภาพเมื่อใช้ร่วมกับฉนวนได้

ทั้งนี้แนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ฉนวนกันความร้อนชนิด (PE) หนา 50 mm ซึ่งสามารถลดพลังงานได้สูงสุดถึง 39.80% ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวดังแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมสามารถช่วยยกระดับอาคารให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมาตรฐานอาคารอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้วัสดุปรับแต่งข้างต้น จะช่วยลดค่าไฟใน 10 ปีไป 24,827,530 บาท ใช้งบประมาณในการปรับปรุงอาคาร 13,743,625 บาท โดยที่ส่วนต่างการลงทุน 11,083,905 บาท

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ผศ. ดร. อภิชาติ บัวกล้า อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ให้ความรู้ และ ข้อเสนอแนะและ ความคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษา งานวิจัย ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ฤทธิยุทธ ก้อนทอง สำหรับให้คำแนะนำ ตลอดจนถึงความรู้และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการศึกษา งานวิจัย ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่เป็น สถานที่ที่บ่มเพาะให้ความรู้และความอนุเคราะห์สถานที่ในการจัดทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยา เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้รับการ สนับสนุน ทุนวิจัยบางส่วนจากมหาวิทยาลัยพะเยา สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน พี่น บุคคลรอบข้างทุกๆ คน รวมถึงผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บิดา มารดาและ ครอบครัว ที่ให้การ สนับสนุน คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดีและให้กำลังใจ แรงบันดาลใจ ที่ทำให้เกิดงานวิจัยนี้

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงานรายงานสถิติพลังงานในประเทศไทย ปี 2567 หน้าที่ 91 จาก <https://anyflip.com/qvjvx/qagw/>
- [2] แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับประเทศไทย (Thailand BIM Guideline) ฉบับปี พ.ศ. 2558 จาก <https://asa.or.th/handbook/handbook20150427/#>
- [4] การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน ด้วยการปรับปรุงกรอบอาคาร กรณีศึกษา: อาคารที่อยู่อาศัย Application of Building Information Modeling for Reducing Energy Consumption by Building Envelope Improvement, Case study: Residential buildings จาก <https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1924/917>
- [5] แนวทางการปรับปรุงอาคารสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเพื่อประหยัดพลังงาน Renovation strategies to improve energy saving for provincial health office จาก <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/61877/51004>
- [6] Mio' S (2555) ,กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) จาก<https://miobim.blogspot.com/2012/10/bim-buildinginformation-modeling.html?m=1>
- [7] Shartz Organization Myanmar (2568) ,ตารางรายละเอียด LOD (Level of Development) ต่างๆ จาก <https://shartz.org/2019/12/what-is-lod/>
- [8] Yolanda MURIEL (2566) ,การใช้ Revit กับงานสถาปัตยกรรม , จาก <https://yolandamuriel.com/2023/02/01/revit-architecture-830-familias-101-controlar-la-visibility-1-visibility-y nivel-de-detalle-de-la-familia/>
- [9] Vasudha Dixit (2559) ,การใช้งานโปรแกรม Autodesk Insight , จาก <https://www.ideateinc.com/blog/2016/10/revit-2017-optimize-building>
- [10] Pavel Pavlov (2558) ,การใช้งานโปรแกรม Dynamo , Automation of information Flow from Revit to Bim Ling Dynamo จาก



https://projekter.aau.dk/projekter/files/231026964/Dynamo_Project.pdf

[11] แนวทางการพัฒนาแบบจำลองอาคารสารสนเทศ (BIM) เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้นจาก

<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/2017/>

[12] การพัฒนาเกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพพลังงานของกรอบอาคาร โดยใช้รายการที่กำหนด จาก

<https://so02.tcithaijo.org/index.php/jed/article/view/244059/166939>

[13] มาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

[https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/2023-](https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/2023-2026_standards_committee_strategic_plan.pdf)

[2026_standards_committee_strategic_plan.pdf](https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/2023-2026_standards_committee_strategic_plan.pdf)

[14] หนังสือบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน ปีงบประมาณ 2568 โดย กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักอำนวยการสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน จาก

<https://www.yotathai.com/yotanews/obec2568>



การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อการบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก: กรณีศึกษาอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

Application of Building Information Model Technology (BIM) for Facility Management: A Case Study of the Faculty of Engineering Building, University of Phayao

ชัยณรงค์ กันทะหล่น¹ ณภัทร เล็กทุ่ง¹ ญดาพร โพธิ์ธัญ¹ ธารดา พรหมอยู่¹ และ ฤทธิชยุต ก้อนทอง²

¹นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

²อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65101913@up.ac.th

บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์พื้นที่ภายในอาคารสถาบันอุดมศึกษามักเผชิญปัญหาความแออัด ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้ ความปลอดภัย และประสบการณ์ผู้ใช้งาน งานวิจัยนี้มุ่งประยุกต์ใช้หลักการการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (Facility Management: FM) ร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) เพื่อระบุจุดแออัดและปรับผังภายในให้เกิดการใช้พื้นที่ที่คุ้มค่า ภายใต้บริบทอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา โดยเริ่มจากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานจริงจากตารางจองและแผนการใช้ห้อง เพื่อสร้างแผนที่ความหนาแน่นและเส้นทางสัญจรของผู้ใช้ จากนั้นพัฒนาโมเดล BIM ในระดับห้องและเฟอร์นิเจอร์เพื่อจำลองการจัดวางใหม่อย่างเป็นระบบ เช่น ปรับรูปแบบการจัดโต๊ะ ขยายและจัดแนวช่องทางเดิน และกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ให้เข้าถึงได้สะดวก ทั้งหมดดำเนินการภายใต้เงื่อนไขด้านความปลอดภัยและความปลอดภัย ตามมาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) พร้อมทั้งกำหนดตัวชี้วัดประเมินผลที่ชัดเจน ได้แก่ พื้นที่ว่างใช้สอยต่อคน จำนวนที่นั่งหรือชุดเฟอร์นิเจอร์ที่เพิ่มขึ้นโดยไม่ลดคุณภาพการใช้งาน สัดส่วนช่วงเวลาในห้องอยู่ในสภาพแออัด และความพึงพอใจของผู้ใช้ ผลที่คาดหวังคือสามารถเพิ่มพื้นที่ว่างภายในห้องประมาณ 10–25% หรือเพิ่มจำนวนที่นั่ง/เฟอร์นิเจอร์ 10–20% ในห้องเป้าหมาย ลดความแออัดและเพิ่มความคล่องตัวในการใช้งาน โดยยังคงมาตรฐานความปลอดภัยและความสบาย แนวทาง BIM ร่วมกับ FM ที่นำเสนอมีความเรียบง่าย ยึดข้อมูลจริงเป็นฐาน ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงหลักฐานของผู้บริหารอาคาร และสามารถขยายผลสู่ห้องประเภทอื่นภายในคณะได้อย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM), การบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (FM), การจัดการพื้นที่, ความแออัดภายในห้อง, การจัดผังเฟอร์นิเจอร์

Abstract

The utilization of interior space in higher-education buildings often encounters overcrowding, adversely affecting learning efficiency, safety, and user experience. This study applies Facility Management (FM) principles in conjunction with Building Information Modeling (BIM) to identify overcrowding hotspots and reconfigure interior layouts for more efficient space use, in the context of the Faculty of Engineering building at the University of Phayao. The methodology comprises: (1) collecting and analyzing actual usage data from booking schedules and room timetables to generate occupancy heat maps and circulation paths; (2) developing room- and furniture-level BIM models to systematically simulate alternative layouts, such as reconfiguring desk arrangements, widening and aligning circulation aisles, and repositioning equipment for improved accessibility; (3) enforcing comfort and safety constraints in accordance with the standards of the Office of the Higher Education Commission (OHEC); and (4) defining clear evaluation metrics, including usable area per person, the number of seats or furniture units added without compromising functional quality, the proportion of time rooms remain in an overcrowded state, and user satisfaction. Expected outcomes include a 10–25% increase in usable in-room space or a 10–20% increase in seats/furniture in target rooms, reduced overcrowding and enhanced circulation, while maintaining safety and comfort standards. The proposed BIM-FM approach is straightforward, data-driven, supports evidence-based decision-making by facility managers, and is scalable to other room types within the faculty.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Facility Management (FM), space management, room overcrowding, furniture layout

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันสถาบันอุดมศึกษาต้องเผชิญความท้าทายด้านการใช้พื้นที่ภายในอาคารอย่างเข้มข้น ทั้งจากจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น รูปแบบการเรียนรู้ที่หลากหลายและข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและสุขภาวะ ปัญหาความแออัดในห้องเรียน ห้องปฏิบัติการและพื้นที่ทำงาน ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้ คุณภาพสภาพแวดล้อมการทำงาน ความปลอดภัยในการสัญจรและประสบการณ์ของผู้ใช้ แนวทางแก้ไขที่ได้จริงและคุ้มค่าในระยะสั้น คือการปรับการใช้พื้นที่ภายในห้องให้เหมาะสม โดยไม่ต้องต่อเติมหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอาคาร

การบูรณาการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) เข้ากับการบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (Facility Management: FM) เป็นวิธีที่เหมาะสมในการยกระดับการใช้พื้นที่หลังการก่อสร้าง โดยเชื่อมโยงข้อมูลการใช้งานจริงจากระบบจองห้องเพียงระบบเดียวเข้ากับโมเดล BIM ระดับห้องและเฟอร์นิเจอร์ เพื่อจำลองและประเมินการจัดวางใหม่อย่างเป็นระบบ ตัวอย่างเช่น การปรับรูปแบบการจัดโต๊ะ การขยายและจัดแนวช่องทางเดินและการกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ให้เข้าถึงได้ง่าย ทั้งหมดดำเนินการภายใต้เงื่อนไขด้านความสบายและความปลอดภัยตามมาตรฐานของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) โดยมีขอบเขตมุ่งเน้นเฉพาะ “การปรับการใช้พื้นที่ภายในห้อง” ไม่รวมงานต่อเติมหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอาคาร

แนวทางการดังกล่าวคาดว่าจะช่วยเพิ่มพื้นที่ว่างใช้สอยภายในห้องได้ประมาณ 10–25% หรือเพิ่มจำนวนที่นั่ง/ชุดเฟอร์นิเจอร์ได้ 10–20% ในห้องเป้าหมาย ลดความแออัดและเพิ่มความคล่องตัวในการสัญจร โดยยังคงมาตรฐานความปลอดภัยและความสบายของผู้ใช้ อีกทั้งสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารอาคารให้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น บนฐานข้อมูลจริงจากระบบจองห้องเดียว และสามารถขยายผลไปสู่ห้องประเภทอื่นภายในคณะได้อย่างเป็นระบบและคุ้มค่าในทางปฏิบัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยี BIM ร่วมกับการบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (FM) ในการบริหารทรัพยากรและการใช้พื้นที่ภายในห้องของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

1.2.2 เพื่อทดลองใช้ BIM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์และจำลองการจัดวางภายในห้องจากข้อมูลการใช้งานจริง เพื่อปรับพื้นที่ให้เกิดการใช้งานที่คุ้มค่า เพิ่มพื้นที่ว่างใช้สอยหรือจำนวนที่นั่ง และลดความแออัด ภายใต้ข้อกำหนดด้านความสบายและความปลอดภัยตามมาตรฐาน สกอ.

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านสถานที่

- ห้องที่มีผู้ใช้งานหนาแน่นภายในอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

1.3.2 ขอบเขตด้านโปรแกรม

- Autodesk Revit (Education License)
- Microsoft Excel

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลที่เป็นแนวทางในการบริหารจัดการพื้นที่ภายในอาคารด้วย BIM ร่วมกับ FM เพื่อสนับสนุนการพัฒนาอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ในอนาคต

1.4.2 ได้ผลการวิเคราะห์พื้นที่ใช้สอยและข้อเสนอการปรับปรุงภายในห้องจากข้อมูลการใช้งานจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความแออัดและยืดอายุการใช้งานอาคาร ตามมาตรฐาน สกอ.

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญต่อการกำหนดกรอบแนวคิดและทิศทางการวิจัย เนื่องจากจะช่วยให้เห็นถึงทฤษฎี หลักการ และผลงานวิจัยที่ผ่านมา ตลอดจนช่องว่างความรู้ที่การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะเติมเต็ม

2.1 Facility Management (FM)

Facility Management (FM) การบริหารจัดการทรัพยากรอาคาร คือการบริหารจัดการทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้หรือสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์สร้างขึ้นรวมถึงกิจกรรมที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพ โดยมีองค์ประกอบมีค่านึงถึง คือ 3P ได้แก่ คน People กระบวนการ Process และสิ่งแวดล้อม/สถานที่ Place โดยหลักการของ FM จะให้ความสำคัญกับผู้ใช้อาคารและเป้าหมายขององค์กรเป็นหลัก ส่วนตัวอาคารเป็นส่วนเสริมที่จะอำนวยความสะดวกตามเป้าหมายที่องค์กรวางไว้ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับธุรกิจทุกระดับ ทั้งในแง่การบริหารความเสี่ยงขององค์กร Risk Assessment และการพัฒนาด้านการอนุรักษ์พลังงานอย่างเป็นรูปธรรม ที่ครอบคลุมต่อเนื่องและยั่งยืน

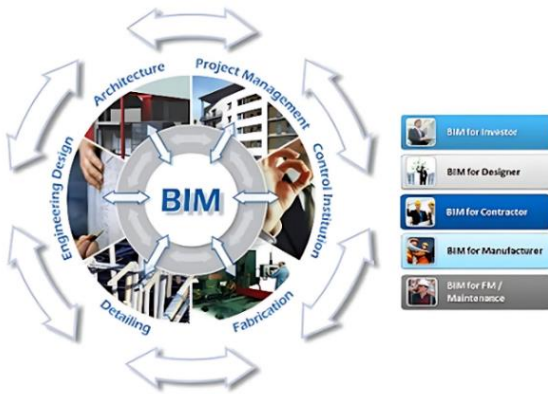


รูปที่ 1 Facility Management

(แหล่งที่มา :<https://inno.co.th/iso-41001/>)

2.2 Building Information Modeling (BIM)

เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับวงการงานสถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง ที่เริ่มตั้งแต่การออกแบบอาคารไปจนถึงการก่อสร้าง BIM จะเป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์มาควบคุมกระบวนการต่างๆ ระบบจะสร้างแบบจำลองเสมือนของอาคารที่แม่นยำ แบบจำลองแบบดิจิทัล ทางการออกแบบ การเขียนแบบ การคำนวณโครงสร้าง การประมาณราคา การจัดซื้อ รวมไปถึงการวางแผนงานต่างๆ ของอาคาร



รูปที่ 2 กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศ

(แหล่งที่มา : <https://www.appicadthai.com/articles/bim/>)

2.3 สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

สำหรับงานวิจัยนี้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) มีบทบาทสำคัญที่กำหนดมาตรการใช้วิเคราะห์การทำงานพื้นที่ของพื้นที่ในแต่ห้อง ทำให้เป็นมาตรฐานเพื่อสร้างการเรียนรู้ของผู้ศึกษาให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

เกณฑ์พื้นที่ใช้สอย

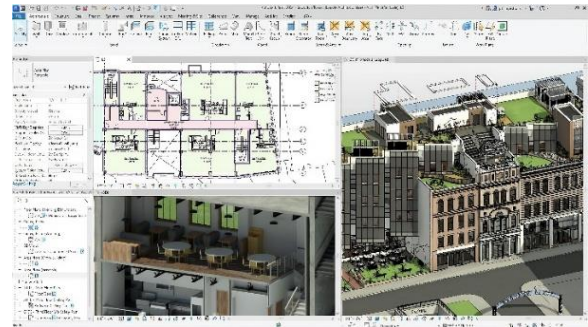
1. ห้องบรรยายและห้องสัมมนา (ห้องขนาดเล็กที่ใช้)
 - 1.1 ห้องบรรยายขนาดความจุ 300 คน 0.9 ม² : คน
 - 1.2 ห้องบรรยายขนาดความจุ 200 คน 0.9 ม² : คน
 - 1.3 ห้องบรรยายขนาดความจุ 100 คน 1.0 ม² : คน
 - 1.4 ห้องบรรยายขนาดความจุ 50 คน 1.1 ม² : คน
 - 1.5 ห้องบรรยายขนาดความจุ 25 คน 1.5 ม² : คน
 - 1.6 ห้องสัมมนาหรือห้องจัดขนาดความจุ 30 คน 1.8 ม² : คน
2. ห้องปฏิบัติการทดลองสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์
 - 2.1 ห้องปฏิบัติการทดลองเคมี ฟิสิกส์ (ปี 1,2) ขนาดความจุ 50 คน 3.5 ม² : คน
 - 2.2 ห้องปฏิบัติการทดลองด้านอื่นๆ (ปี 1,2) ขนาดความจุ 50 คน 3.0 ม² : คน
 - 2.3 ห้องปฏิบัติการทดลองเคมี ฟิสิกส์ (ทั่วไป) ขนาดความจุ 25 คน 4.0 ม² : คน
 - 2.4 ห้องปฏิบัติการทดลองด้านอื่นๆ (ทั่วไป) ขนาดความจุ 25 คน 3.5 ม² : คน
 - 2.5 ห้องปฏิบัติการทดลองทั่วไป ขนาดความจุ 50 คน 5.0 ม² : คน (ทางด้านวิทยาศาสตร์ สำหรับปี 3,4 และปริญญาโท)
3. ห้องปฏิบัติการทดลองสำหรับวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์
 - 3.1 ห้องปฏิบัติการทดลองสำหรับวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์
 - สำหรับ นักวิจัย 2 คน
 - นักศึกษานิเทศศาสตร์ 4 คน 10.0 ม² : คน (ปฏิบัติงานในห้องทดลอง)
 - 3.2 ห้องปฏิบัติการทดลองสำหรับวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์
 - สำหรับ นักวิจัย 1 คน
 - นักศึกษานิเทศศาสตร์ 1 คน 10.0 ม² : คน (ปฏิบัติงานภาคสนาม)

รูปที่ 3 เกณฑ์การแบ่งพื้นที่ใช้สอยในแต่ละห้องของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

(แหล่งที่มา : <http://talentmobility.uru.ac.th/download/link>)

2.4 โปรแกรม Autodesk Revit

Revit คือซอฟต์แวร์ Building Information Modeling (BIM) ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ อัจฉริยะ สำหรับโครงการก่อสร้าง ซอฟต์แวร์นี้สามารถรวมศาสตร์ต่างๆ เข้าด้วยกัน ช่วยลดขั้นตอนการออกแบบและจัดทำเอกสาร



รูปที่ 4 ภาพภายในโปรแกรม Autodesk Revit

(แหล่งที่มา : <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>)

2.5 โปรแกรม Microsoft Excel

เป็นโปรแกรมประเภทSpreadsheet หรือโปรแกรมตารางงานซึ่งจะเก็บข้อมูลต่างๆ ลงบนแผ่นตารางงานคล้ายกับการเขียนข้อมูลลงไปบนสมุดที่มีการตีช่องตารางทั้งแนวนอนและแนวตั้งซึ่งช่องตารางแต่ละช่องจะมีชื่อประจำแต่ละช่องทำให้ง่ายต่อการป้อนข้อมูลและการแก้ไขข้อมูล ทำให้สะดวกต่อการคำนวณและการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้สามารถสร้างกราฟได้จากข้อมูลได้อย่างรวดเร็วได้อย่างเป็นหมวดหมู่และเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5 ภาพภายในโปรแกรม Microsoft Excel

(แหล่งที่มา : <https://www.9experttraining.com/articles/>)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญญพงศ์ นาคะบุตร ได้ศึกษาเรื่องการประเมินการใช้พื้นที่อาคารกรณีศึกษา อาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการทำการประเมินโครงการหลังการใช้งาน (Post Occupancy Evaluation, POE) ของอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วังท่าพระ ในเรื่องของขนาดการใช้พื้นที่สำหรับการเรียนการสอนภายหลังการปรับปรุงอาคาร เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกับมาตรฐานของพื้นที่ห้องเรียนและห้องปฏิบัติการ รวมถึงเพื่อศึกษาปัญหาที่พบและเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่มี ทั้งเสนอแนวทางในการบริหารจัดการพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อรองรับการขยายตัวในอนาคต

ประเภทห้อง	ความจุ ปัจจุบัน (คน)	มาตรฐาน ที่กำหนด (คน/ตร.ม.)	พื้นที่ตามเกณฑ์ มาตรฐาน (ตร.ม.)	พื้นที่ ปัจจุบัน (ตร.ม.)	จำนวน ห้อง
ห้องเรียน (Classroom)	40	1.4	56.00	50.25	1
	60	1.4	84.00	59.50	2
	80	1.4	112.00	121.50	1
ห้องปฏิบัติการ (Studio)	20	3.6	72.00	59.50	2
	40	3.6	144.00	108.00	1
	60	3.6	216.00	114.75	2
	70	3.6	252.00	174.25	1
	80	3.6	288.00	184.50	1

เกณฑ์มาตรฐาน

รูปที่ 6 ตารางการเปรียบเทียบห้องเรียนและห้องปฏิบัติการก่อนหลังปรับปรุง

มยุรฉัตร ฉัตรสุวรรณ ได้ศึกษาเรื่องการใช้และการจัดการข้อมูลในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรกายภาพอาคารชุดแบบ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) มาเป็นแนวคิดที่พัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบและก่อสร้าง โดยผสานข้อมูลเข้ากับแบบจำลองสามมิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดความผิดพลาดจากวิธีการแบบเดิม ในประเทศไทย BIM ถูกนำมาใช้มากกว่าสิบห้าปีแล้ว โดยเริ่มได้รับความสนใจจากหลากหลายภาคส่วน ทั้งสถาบันการศึกษา ผู้ประกอบการ และโดยเฉพาะผู้พัฒนาอสังหาริมทรัพย์ที่เห็นประโยชน์ในการเพิ่มคุณภาพงานออกแบบ ก่อสร้าง และการบริหารโครงการให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

งานบริหารจัดการอาคารชุด / ลักษณะข้อมูลที่ใช้	กลุ่มผู้จัดการอาคาร (35)			
	ข้อมูลรูปภาพ (Graphic)		ไม่เป็นข้อมูลรูปภาพ (Non-Graphic)	อื่น ๆ (ใช้ข้อมูลมากกว่า 1 ลักษณะ)
	แบบผังอาคาร / รูปด้าน (2D)	แบบโมเดล (3D)	เอกสาร/คู่มือ (Documentation)	
1. การวางแผนการรักษาความปลอดภัย (A)	51.4%	22.9%	2.9%	22.9%
2. การวางแผนการกำจัดของเสีย (B)	57.1%	2.9%	28.6%	11.4%
3. การวางแผนจัดการงานภูมิสถาปัตยกรรม (C)	31.4%	37.1%	11.4%	20%
4. การวางแผนการกำจัดแมลง (D)	65.7%	11.4%	8.6%	14.3%
5. การวางแผนการทำความสะอาด (E)	34.3%	25.7%	20%	20%
6. การวางแผนการจัดสวนไม้ประดับ (F)	28.6%	54.3%	0	17.1%
7. การวางแผนการเปลี่ยนเครื่องจักร (G)	5.7%	20%	60%	14.3%

รูปที่ 7 ร้อยละ (Percentage) ลักษณะข้อมูลที่เหมาะสมต่อวางแผนจากผู้จัดการอาคารชุด

อภิชาติ บัวกล้า นันทพล มหาวัน ปณณพงค์ กุลพัฒนเศรษฐ ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศในปัจจุบันมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างคือ แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาความซ้ำซ้อนและลดความผิดพลาดตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบจนถึงกระบวนการก่อสร้าง ด้วยการสร้างแบบจำลองสามมิติพร้อมผสานข้อมูลสารสนเทศเข้าไปในกระบวนการเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง BIM มิติที่เจ็ด (7D BIM) ในการบริหารทรัพยากรอาคาร โดยมุ่งเน้นไปที่การจัดการบำรุงรักษาอาคารศูนย์บรรณสารและการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยพะเยา ครอบคลุมทั้งระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบไฟฟ้าส่องสว่าง ระบบปรับอากาศ และการจัดการทรัพยากรภายในด้านหมวดหมู่หนังสือ

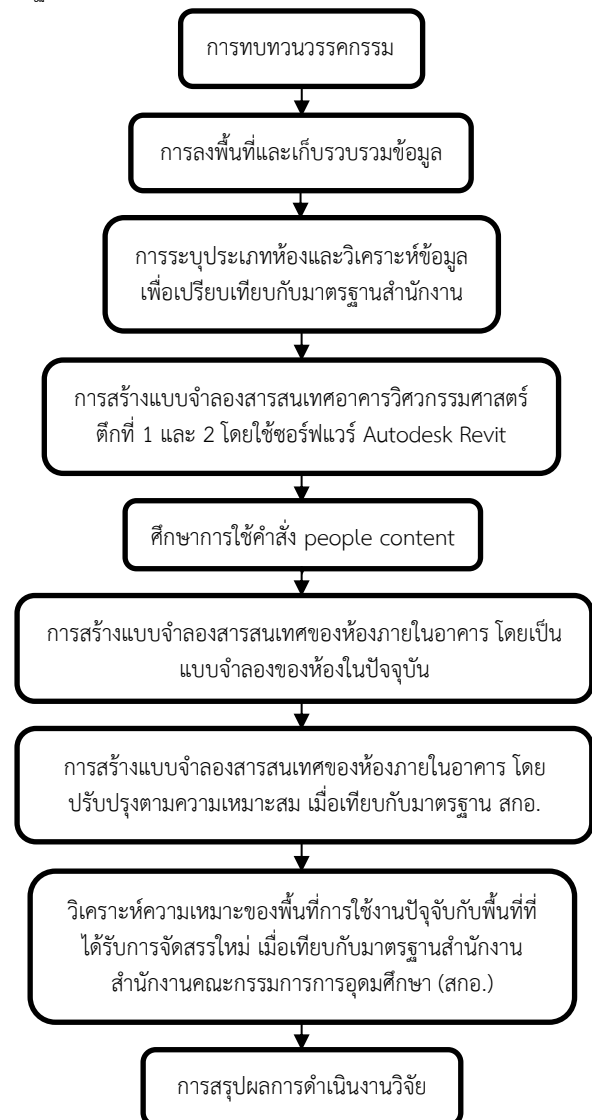


รูปที่ 8 ตัวอย่างรูปแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมครั้งนี้จัดทำให้สอดคล้องกับเป้าหมายที่ต้องการใช้ BIM ร่วมกับ FM เพื่อปรับการใช้พื้นที่ภายในห้องของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา เรามุ่งหาแนวทาง หลักการ และหลักฐานจากงานวิจัยหรือข้อมูลจริง ช่วยให้ใช้พื้นที่ในระดับห้องได้คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาศัยโมเดล BIM ที่เชื่อมกับข้อมูลการใช้งานจริงจากระบบจองห้องและผลสำรวจผู้ใช้ ทั้งหมดดำเนินการตามมาตรฐานด้านความสบายและความปลอดภัยของ สกอ.



3.2 การลงพื้นที่และเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่และเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนผู้ใช้และความสบายของห้องภายในอาคาร



รูปที่ 9 ภาพการลงพื้นที่เก็บรวบรวมข้อมูล

3.3 การระบุประเภทห้องและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

3.3.1 ศึกษามาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

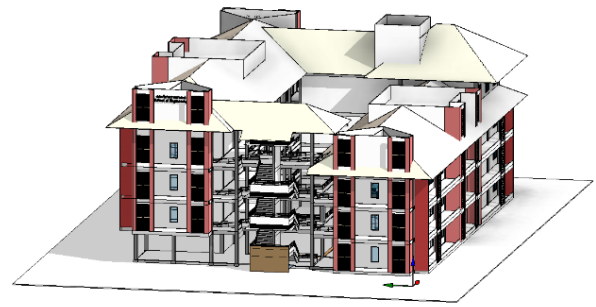


รูปที่ 10 ภาพการศึกษามาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

3.3.2 กำหนดห้องที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ความเหมาะสมของผู้ใช้ภายในห้อง เมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ได้แก่ ห้องสำนักงาน, ห้อง EN1301 และ EN2206

3.3.3 จัดประเภทห้องที่จะทำการวิเคราะห์ตามความเหมาะสมของผู้ใช้ภายในห้องโดยอ้างอิงจากมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ได้แก่ ห้องสำนักงาน (ธุรการ), ห้อง EN1301 (ปฏิบัติการ) และห้องบรรยาย EN2206

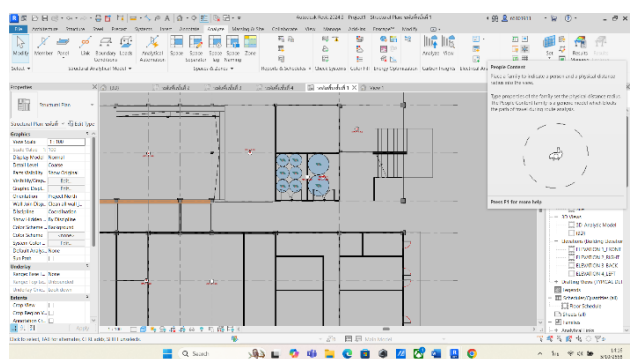
3.4 สร้างแบบจำลองสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารวิศวกรรมศาสตร์ ตึกที่ 1 และ 2 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit



รูปที่ 11 แบบจำลองสารสนเทศอาคารวิศวกรรมศาสตร์ตึกที่ 1 และ 2

3.5 ศึกษาการใช้คำสั่ง people content โดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการใช้คำสั่ง people content เพื่อระบุพื้นที่ใช้สอยต่อคนตามมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) จากห้องที่จะทำการการศึกษา



รูปที่ 12 คำสั่ง people content โดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

3.6 การสร้างแบบจำลองสารสนเทศของห้องภายในอาคารวิศวกรรมศาสตร์ ตึกที่ 1 และ 2 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองของห้องในปัจจุบัน

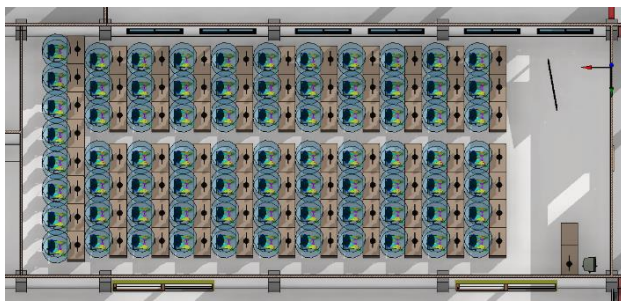
ผู้วิจัยได้จัดทำแบบจำลองสารสนเทศของห้องภายในอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึกที่ 1 และ 2 ที่คัดเลือกไว้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และใช้คำสั่ง people content เพื่อระบุพื้นที่ใช้สอยต่อคน ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองปัจจุบันก่อนที่จะได้รับการจัดสรรพื้นที่ใหม่

3.6.1 แบบจำลองสารสนเทศของห้อง สำนักงาน (แบบปัจจุบัน)



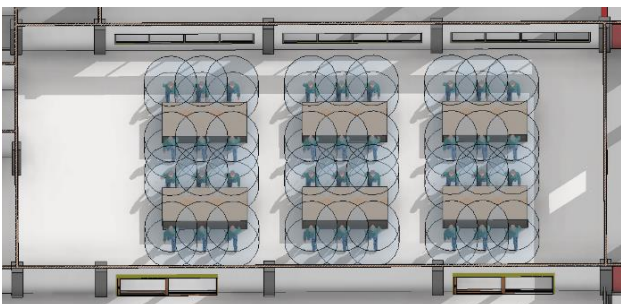
รูปที่ 13 ห้องสำนักงาน (ปัจจุบัน)

3.6.2 แบบจำลองสารสนเทศของห้อง EN1301 (แบบปัจจุบัน)



รูปที่ 14 EN1301 (ปัจจุบัน)

3.6.3 แบบจำลองสารสนเทศของห้อง EN2206 (แบบปัจจุบัน)

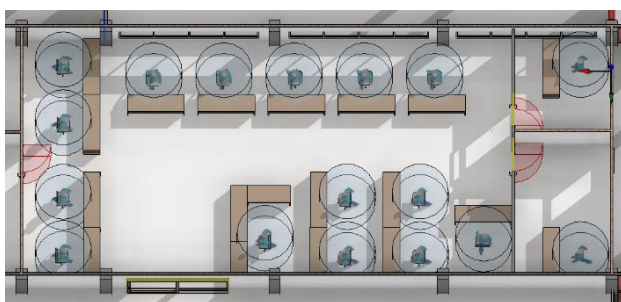


รูปที่ 15 EN2206 (ปัจจุบัน)

3.7 การสร้างแบบจำลองสารสนเทศของห้องภายในอาคารวิศวกรรมศาสตร์ ตึกที่ 1 และ 2 โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงตามความเหมาะสม เมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

ผู้วิจัยได้จัดทำแบบจำลองสารสนเทศของห้องภายในอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึกที่ 1 และ 2 ที่คัดเลือกไว้ โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และใช้คำสั่ง people content เพื่อระบุพื้นที่ใช้สอยต่อคน ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงตามความเหมาะสม เมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

3.7.1 แบบจำลองสารสนเทศของห้องสำนักงานที่ปรับปรุงตามความเหมาะสมเมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)



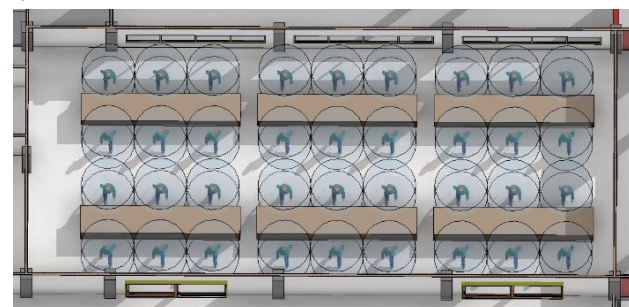
รูปที่ 16 ห้องสำนักงาน (ปรับปรุงตามความเหมาะสม)

3.7.2 แบบจำลองสารสนเทศของห้อง EN1301 ที่ปรับปรุงตามความเหมาะสมเมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)



รูปที่ 17 EN1301 (ปรับปรุงตามความเหมาะสม)

3.7.3 แบบจำลองสารสนเทศของห้อง EN2206 ที่ปรับปรุงตามความเหมาะสมเมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)



รูปที่ 18 EN2206 (ปรับปรุงตามความเหมาะสม)

3.8 วิเคราะห์ความเหมาะสมของพื้นที่การใช้งานปัจจุบันปัจจุบันกับพื้นที่ที่ได้รับการจัดสรรใหม่ เมื่อเทียบกับมาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบพื้นที่การใช้งานของห้องภายในอาคารที่ได้คัดเลือกไว้ตามแบบปัจจุบันกับแบบที่ได้รับการจัดสรรใหม่โดยใช้มาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

3.9 การสรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เมื่อผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการเปรียบเทียบพื้นที่การใช้งานของห้องภายในอาคารที่ได้คัดเลือกไว้ตามแบบปัจจุบันกับแบบที่ได้รับการจัดสรรใหม่โดยใช้มาตรฐานสำนักงานสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

4. วิเคราะห์ผลงานวิจัย

ตารางการเปรียบเทียบการจัดเฟอร์นิเจอร์ในปัจจุบันกับการจัดเฟอร์นิเจอร์โดยใช้แบบจำลองสารสนเทศ

ชื่อห้อง	จำนวนความจุผู้ใช้งาน (คน)	
	จากการจัดเฟอร์นิเจอร์ในปัจจุบัน	จากการจัดเฟอร์นิเจอร์ผ่านแบบจำลองสามมิติ
สำนักงาน	14	17
EN1301	79	78
EN2206	36	36



จากตารางจะเห็นได้ว่า ห้อง EN1301 จำนวนความจุผู้ใช้งานจากการจัดเฟอร์นิเจอร์ผ่านแบบจำลองสามมิติ มีจำนวนน้อยกว่าจำนวนการจัดเฟอร์นิเจอร์ในปัจจุบัน แต่เมื่อสังเกตจากภาพแบบจำลองสามมิติ จะเห็นว่าถึงแม้จะลดจำนวนความจุผู้ใช้งานลง ผู้ใช้งานแต่ละคนจะมีพื้นที่ใช้งานต่อคนที่มากขึ้น มีความสบายมากขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพการทำการกิจกรรมมากขึ้น

5.สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อการบริหารจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก ผลวิจัยพบว่าการจัดเฟอร์นิเจอร์ในปัจจุบันของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ตึกที่ 1 และ 2 ยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ทำให้บางห้อง เช่น ห้อง EN1301 และห้อง EN2206 เมื่อรองรับผู้ใช้งานสูงสุดตามความจุทำให้ห้องแออัดส่งผลให้ความสบายตัวลดลง ประสิทธิภาพการเรียนรู้ลดลง ในห้องสำนักงานที่มีความจุน้อยเกินไปจนไม่เหมาะสมผลกับพื้นที่ของห้อง ส่งผลให้ห้องมีการใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ เมื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยี BIM ผ่านซอฟต์แวร์ Autodesk Revit เข้ามาช่วยจำลองการจัดเฟอร์นิเจอร์ภายในห้องต่างๆ พบว่าสามารถช่วยจำลองขนาดของเฟอร์นิเจอร์ พื้นที่ใช้งานต่อหนึ่งคน ได้อย่างละเอียด สามารถยับแบบจำลองเฟอร์นิเจอร์ภายในห้องและแบบจำลองผู้ใช้งานได้อย่างอิสระ แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยี BIM เข้ามามีส่วนช่วยให้เห็นขนาดพื้นที่ ขนาดเฟอร์นิเจอร์จำนวนผู้ใช้งาน และพื้นที่ใช้งานต่อหนึ่งคน ในแบบจำลองสามมิติ ทำให้สามารถวางแผนปรับปรุงพื้นที่และจัดสรรพื้นที่ห้องได้เหมาะสมเนื่องจากมีข้อมูลรองรับ

6.ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้เทคโนโลยี BIM ในการบริหารจัดการเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคารให้เหมาะสมต่อความต้องการของผู้ใช้อาคารมากยิ่งขึ้น
2. งานวิจัยควรคำนึงถึง มาตรฐาน สกอ. โดยเก็บเฉพาะข้อมูลรวม ไม่ระบุตัวบุคคล กำหนดสิทธิ์การเข้าถึง และบันทึกการใช้งานข้อมูลอย่างโปร่งใส
3. เพื่อการใช้พื้นที่อาคารให้คุ้มค่า ควรศึกษาการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่สามารถใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ควรศึกษาข้อกำหนดและอัตราการใช้พื้นที่ที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ฤทธิพิศ ก้อนทอง ผู้ช่วยสอน นางสาวพรวิณัย ชัยแก้วและนายธีรภัทร์ มูลละออง รวมถึงเพื่อนร่วมวิจัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำและการสนับสนุนเป็นอย่างดี จึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Andi Seabeck (2568), What is Facility Management? Core Functions, Challenges, Systems, Trends & More จาก <https://www.camcode.com/blog/guide-to-facility->
- [2] Natalia Larrimer (2561), ISO 41001: Standard for Facility Management จาก <https://blog.ansi.org/anab/iso-41001-facility-management-systems-standard/>

[3] บริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด (2565), อาคารปลอดภัย ใส่ใจดูแล กับมาตรฐาน ISO 41001:2018 Facility Management System จาก <https://inno.co.th/iso-41001/>

[4] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา STAFF (2562), เกี่ยวกับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จาก <https://www.eng.up.ac.th/about>

[5] มหาวิทยาลัยพะเยา (2568), ความเป็นมาของมหาวิทยาลัยพะเยา จาก https://www.up.ac.th/Intro_history.aspx

[6] Autodesk Inc (2568), What is the process of BIM? จาก <https://www.autodesk.com/asean/solutions/bim/benefits-of-bim#what-is-the-process-of-bim>

[7] พระราชบัญญัติระเบียบบริหารราชการกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (2562),หน้าที่และอำนาจ คณะกรรมการการอุดมศึกษา จาก <https://www.ops.go.th/ohec-aboutus/ohec-rule>

[8] Thawatchai Praduu (2565), Microsoft Excel (โปรแกรมเพื่อการคำนวณ) จาก <https://library.wu.ac.th/km/microsoft-excel>

[9] ปัญพงศ์ นาคะบุตร (2553), การประเมินการใช้พื้นที่อาคาร กรณีศึกษา : อาคารเรียนคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จาก <https://sure.su.ac.th/xmlui/handle/123456789/358?attempt=3&&attempt=2&locale-attribute=th>

[10] มยุรฉัตร ฉัตรสุวรรณ (2563), การใช้และการจัดการข้อมูลในแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรกายภาพอาคารชุด จาก <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/9762/>

[11] ปณณพงค์ กุลพัฒน์เศรษฐ (2564), การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่เจ็ดสำหรับอาคารศูนย์บรรณสารและการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยพะเยา จาก <https://conference.thaince.org/index.php/ncce26/article/view/804>



การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศเพื่อปรับปรุงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคาร : กรณีศึกษาอาคารพักอาศัย 7 ชั้น

Application of Building Information Modelling to Improve Life-Cycle Carbon Emission Building; Case Study Condominium 7 Floor

ศรายุทธ ดีจ่าย^{1*} ถิรวัฒน์ ชื่นแบ่ง¹ รัชชานนท์ วันนารัตน์¹ ศุภณัฐ ทราชมอ¹ และฤทธิษุทธิ์ ก้อนทอง²

¹ นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 65102565@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคาร(Life-cycle carbon emissions) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคาร์บอนจากวัสดุก่อสร้าง(Embodied Carbon) และคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร(Operational Carbon) ของอาคารพักอาศัยสูง 7 ชั้น รวมถึงการพิจารณาผลของทิศทางและตำแหน่งที่ตั้งของอาคารต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน การศึกษาครั้งนี้ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 7 ร่วมกับซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360 เพื่อจำลองพลังงานและประเมินปริมาณคาร์บอนตลอดอายุการใช้งานของอาคาร การวิจัยดำเนินการใน 4 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา โดยเปรียบเทียบผลระหว่างอาคารดั้งเดิมและอาคารที่ได้รับการปรับปรุงวัสดุรอบอาคาร คือ คอนกรีตมวลเบาผสมฉนวนใยเซลลูโลส กระฉกชนิด Low-e และการติดตั้งแผงบังตาเพื่อลดความร้อนจากแสงแดด ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดค่าคาร์บอนฝังตัวได้ 17% และลดค่าคาร์บอนจากการใช้งานอาคารเฉลี่ย 2.6% ขณะเดียวกันการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารลดลงเฉลี่ย 8% โดยพบว่าทิศใต้เป็นทิศทางที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความร้อนสะสมน้อยและช่วยลดภาระการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศได้ดีที่สุด ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารร่วมกับการปรับปรุงวัสดุและการวางทิศทางอาคารอย่างเหมาะสม กระทั่งสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางสำคัญในการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานและส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ : แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, คาร์บอนฝังตัว, คาร์บอนจากการใช้งานอาคาร, การปล่อยคาร์บอนตลอดวัฏจักรชีวิต

Abstract

This research aims to study the life-cycle carbon emissions of buildings, focusing on the analysis and comparison of embodied carbon from construction materials and operational carbon from building use in a seven-story residential building. The study also examines the influence of building orientation and location on energy performance. A 7D Building Information Modeling (BIM) approach was

employed in conjunction with Autodesk Insight 360 software to simulate energy performance and evaluate the carbon footprint throughout the building's life cycle. The study was conducted in four provinces of Thailand: Chiang Mai, Khon Kaen, Bangkok, and Songkhla by comparing the baseline building model with an improved model featuring upgraded building envelope materials, including lightweight concrete with cellulose fiber insulation, Low-e glass, and external shading devices to reduce solar heat gain. The results indicated that these improvements reduced embodied carbon by 17% and operational carbon by an average of 2.6%, while the overall electricity consumption decreased by an average of 8%. It was also found that the south orientation was the most suitable direction, as it resulted in lower heat accumulation and reduced the cooling energy demand most effectively. The findings suggest that the application of Building Information Modeling, combined with appropriate material enhancement and building orientation, can effectively reduce life-cycle carbon emissions. This approach serves as an essential guideline for energy-efficient building design and promotes sustainable development in the future.

Keywords : Building Information Modeling, Embodied carbon, Operational carbon, Life-cycle carbon emissions

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ที่ผ่านมาการออกแบบและก่อสร้างอาคารมุ่งเน้นไปที่การตอบสนองต่อการใช้งาน ความแข็งแรง และความสวยงามทางสถาปัตยกรรมเป็นหลัก โดยไม่มีการคำนึงถึงประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เมื่ออาคารถูกใช้งานจริงจำเป็นต้องพึ่งพาการใช้พลังงานอย่างมาก เพื่อรักษาสภาพน่าสบายภายในอาคาร เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบไฟส่องสว่าง และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ อันนำไปสู่การใช้พลังงานในระดับสูงต่อเนื่อง และก่อให้เกิดคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร (Operational Carbon) ในสัดส่วนที่อาจสูงถึง 80 – 95% ของการปล่อยคาร์บอนทั้งหมดตลอดอายุการใช้งานอาคาร และคาร์บอนจากการใช้งานอาคารเป็นสาเหตุหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) จาก



อาคารที่ถูกออกแบบโดยไม่คำนึงถึงประสิทธิภาพพลังงานปัญหาดังกล่าวจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาคารแบบเก่ามีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์สูงและไม่สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนในปัจจุบัน

ปัจจุบัน Building Information Modeling (BIM) หรือแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการออกแบบเพื่อความยั่งยืนในหลายมิติ เนื่องจาก BIM ไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือด้านการออกแบบสถาปัตยกรรมและโครงสร้างเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลที่สามารถบูรณาการข้อมูลที่เกี่ยวข้องของอาคารได้อย่างครอบคลุม ตั้งแต่ข้อมูลวัสดุ ปริมาณงาน พื้นที่ใช้สอย ระบบพลังงาน ไปจนถึงวงจรชีวิตทั้งหมดของอาคาร (Building Life Cycle) สิ่งนี้ทำให้ BIM เป็นเครื่องมือที่ทรงพลังสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน หนึ่งในประเด็นสำคัญ คือ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาคาร ซึ่งครอบคลุมทั้ง Embodied Carbon หรือคาร์บอนฝังตัว คือ คาร์บอนที่เกิดจากการผลิต และขนส่ง และคาร์บอนที่เกิดจากการใช้งานอาคาร การใช้ BIM ร่วมกับซอฟต์แวร์ การวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม เช่น Autodesk Insight 360 สามารถช่วยประเมินปริมาณคาร์บอนในทุกระยะได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบ นอกจากนี้ BIM ยังช่วยในการทดสอบการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน การออกแบบทางเลือกของระบบพลังงาน หรือแม้กระทั่งการวิเคราะห์การใช้พลังงานในช่วงเวลาต่างๆ ของปี ซึ่งช่วยให้สามารถคาดการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาวได้ดีกว่าวิธีการคำนวณแบบที่ผ่านมา

ผู้วิจัยได้นำการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เข้ามาช่วยในการทำประเมินค่าคาร์บอน ฟุตพริ้นท์ของอาคารที่อยู่อาศัยตัวอย่าง ด้วยการเชื่อมต่อ Model ของอาคารเข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์ สิ่งแวดล้อม Autodesk Insight 360 ทำให้สามารถศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคาร์บอนฝังตัวในวัสดุที่ใช้ก่อสร้างและคาร์บอนจากการใช้งานอาคารได้ เพื่อแก้ปัญหาการออกแบบอาคารในอดีตที่ไม่มีการคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงอย่างมีประสิทธิภาพและมีความยั่งยืนมากขึ้นยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าคาร์บอนฝังตัวและคาร์บอนจากการใช้งานอาคารจากแบบอาคารเดิมกับแบบอาคารที่ทำการปรับปรุงแล้ว

1.2.2 เพื่อเสนอแนะแนวทางปรับปรุงอาคารในการลดคาร์บอนฝังตัวและคาร์บอนจากการใช้งานอาคารให้ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ด้านซอฟต์แวร์

- Autodesk Revit (Education License)
- Autodesk Insight 360 (Education License)

1.3.2 ด้านแบบก่อสร้าง

- แบบก่อสร้างอาคารอาคารที่พักอาศัยสูง 7 ชั้น

1.3.3 ด้านระยะเวลาการใช้งานอาคาร

- ระยะเวลาการใช้งานอาคาร 20 ปี
- การใช้งานอาคาร 24 ชั่วโมงตลอด 7 วันต่อสัปดาห์

1.3.4 ด้านสถานที่

- ตำแหน่งที่ตั้งอาคารกรณีศึกษา เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานจำนวน 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ เชียงใหม่ สงขลา และขอนแก่น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รู้ผลกระทบของคาร์บอนที่เกิดจากการก่อสร้างและการใช้อาคาร

1.4.2 ได้แนวทางการปรับปรุงอาคารให้มีประสิทธิภาพและความยั่งยืนมากขึ้นยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำได้รวบรวมแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

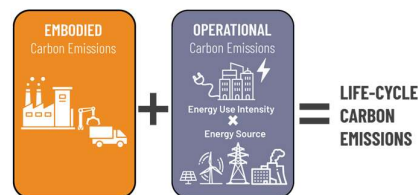
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในอาคาร

Embodied Carbon หมายถึง ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ที่เกิดจากกระบวนการซึ่งได้มาสู่วัสดุขั้นต้นที่สถาปนิกได้เลือกใช้ และระบุลงเล่มสเปคแบบนั่นเอง โดยการวัดค่า Embodied Carbon ที่ได้จากวัสดุที่ใช้ในอาคารนั้นเกิดจาก

- วัตถุดิบในการผลิตวัสดุขั้นต้น (Extract Raw Material)
- กระบวนการผลิตวัสดุขั้นต้น (Manufacture Product)
- การขนส่งวัสดุขั้นต้น (Transport to Site)
- การติดตั้งวัสดุขั้นต้น (Use and Maintain)
- การทำลายซากหรือการย่อยสลายวัสดุขั้นต้น (Demolish)
- ความสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Upcycling)

Operational Carbon หมายถึง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซเรือนกระจกอื่นๆ ที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างการใช้งานอาคาร ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานเพื่อการดำเนินงาน เช่น การปรับอากาศ การส่องสว่าง การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า การทำน้ำร้อน และการขนส่งภายในอาคาร (ลิฟต์และบันไดเลื่อน) พลังงานเหล่านี้ส่วนใหญ่มักมาจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล จึงมีการปล่อยคาร์บอนออกสู่บรรยากาศอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 รอยเท้าคาร์บอนของอาคารตลอดอายุการใช้งาน คือผลรวมของ Embodied Carbon และ Operational Carbon

(อ้างอิงจาก : <https://globalabc.org/buildingmaterialsandclimate/chapte-2-life-cycle-thinking/2-1-embodied-versus-operational-carbon-emissions-in-buildings.html>)

2.1.2 ฟาซาด (Façade) หรือแผงบังตา

ในทางสถาปัตยกรรม หมายถึงส่วนภายนอกของอาคารที่มองเห็นได้ โดยเฉพาะด้านหน้าหรือด้านที่สำคัญ หรือที่บางคนเรียกว่า “เปลือกอาคาร” แผงบังตาจึงไม่ใช่แค่ส่วนใดส่วนหนึ่ง หรือเป็นเพียงแค่ผนังธรรมดา แต่หมายถึงการออกแบบอาคารภายนอกโดยรวมทั้งหมด ซึ่งนอกจากความสวยงามแล้วยังมีฟังก์ชันต่างๆ ที่ช่วยระบายอากาศ และป้องกันความร้อนจากแสงแดดอีกด้วย



รูปที่ 2 แผงบังตา

(อ้างอิง : <https://roovtect.com/post/know-more-about-facade>)

2.1.3 อาคารที่พักอาศัย

คือแบบของอาคารในงานสถาปัตยกรรมมีมากมายหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น อาคารที่อยู่อาศัย ไปจนถึงอาคารสาธารณะ ความหลากหลายของการออกแบบประเภทอาคาร ไม่ใช่เพียงแค่ประโยชน์ด้านการใช้งาน แต่ยังสัมพันธ์ไปถึงข้อกำหนดในการออกแบบอาคารต่างๆ อีกด้วย



รูปที่ 3 อาคารอยู่อาศัย

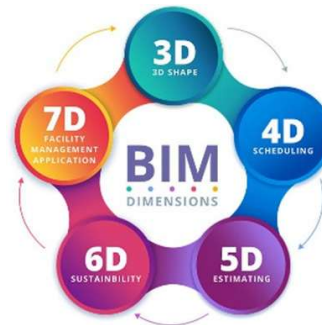
(อ้างอิงจาก : <https://www.kacha.co.th/articles/ความหมาย-อาคาร-แต่ละแบบ/>)

2.1.4 BIM Dimension

การแบ่ง “ระดับการใช้งาน BIM” ออกเป็นหลายมิติ ตามประเภทข้อมูลที่เราใส่เข้าไปในโมเดล และเป้าหมายในการนำโมเดลนั้นมาใช้ ตั้งแต่การออกแบบไปจนถึงการก่อสร้าง การบริหารจัดการอาคาร และการรื้อถอน ซึ่งแต่ละมิติก็จะบ่งบอกความซับซ้อนและประโยชน์ที่ได้รับมากขึ้น

- 1D (Data) เก็บรวบรวมข้อมูลในรูปแบบข้อความ ตัวเลข และเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
- 2D (Drawing) การเขียนแบบ 2 มิติ เช่น ผังพื้น (Plan), ผังไฟฟ้า (Electrical plan)
- 3D (3D Modeling) การสร้างโมเดล 3 มิติของอาคารหรือโครงสร้าง ซึ่งแสดงขนาด รูปร่างและตำแหน่งขององค์ประกอบต่างๆ
- 4D (Time Scheduling) เพิ่มข้อมูลด้านเวลา เช่น กำหนดการก่อสร้าง ตารางงาน และระยะเวลาดำเนินการ
- 5D (Cost Estimation) เพิ่มข้อมูลด้านต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ การแรงงาน และอุปกรณ์เพื่อคำนวณงบประมาณ
- 6D (Sustainability & Energy Analysis) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานและความยั่งยืน เช่น การใช้พลังงาน การหมุนเวียนของอากาศ
- 7D (Facility Management) การใช้เทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) ในมิติที่ 7 เพื่อวิเคราะห์และบริหารจัดการด้านความยั่งยืน (Sustainability) และการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Efficiency)

ของอาคาร โดยเชื่อมข้อมูลการออกแบบและการก่อสร้างเข้ากับการประเมินผลด้านพลังงานวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทั้ง Operational Carbon และ Embodied Carbon

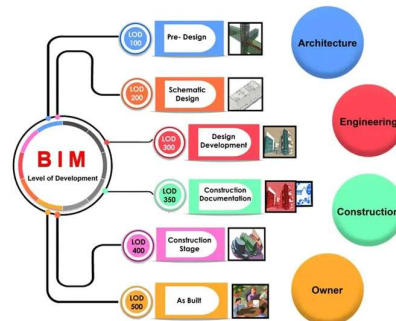


รูปที่ 4 ระดับการใช้งาน BIM

(อ้างอิงจาก : <https://www.elogictech.com/blog/bim-implementation-bim-3d-through-bim-7d/>)

2.1.5 Level of Development (LOD)

ถูกพัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดของแต่ละภูมิภาคที่อธิบายความละเอียดของข้อมูลในแง่ต่างๆ ในยุคแรก Vico Software (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Trimble) เป็นบริษัทที่ผลิต Construction costing software เสนอแนวคิดเรื่อง Model Progression Specification (MPS) เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดการข้อมูลภายใน BIM Model เรียกว่า Level of Detail (LOD) แนวคิดแบบเดียวกันนี้ได้รับการยอมรับจากสถาบันสถาปนิกอเมริกัน (AIA) ถูกพัฒนาไปใช้กับขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์ด้านอื่นๆ และเรียก Level of Development (LOD) และได้กำหนดระดับด้วยตัวเลขเป็น LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400, LOD 500 ขอบเขตของข้อมูลจึงมีความเชื่อมโยงกับงานด้านอื่นๆ มากขึ้น



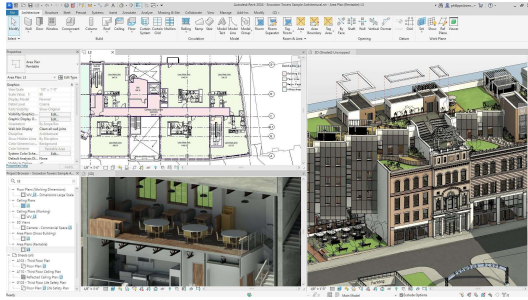
รูปที่ 5 Level of Development

(อ้างอิงจาก : <https://thaibim.net/2021/05/28/what-is-lod/>)

2.2 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

2.2.1 Autodesk Revit (Education license)

ซอฟต์แวร์แบบ Building Information Modeling ใช้ในการออกแบบและสร้างโมเดลสิ่งก่อสร้าง 3D ซึ่งรวมถึงส่วนประกอบและระบบต่างๆ เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบปรับอากาศ การใช้ Revit จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถจัดการและติดตามข้อมูลได้ง่ายขึ้น

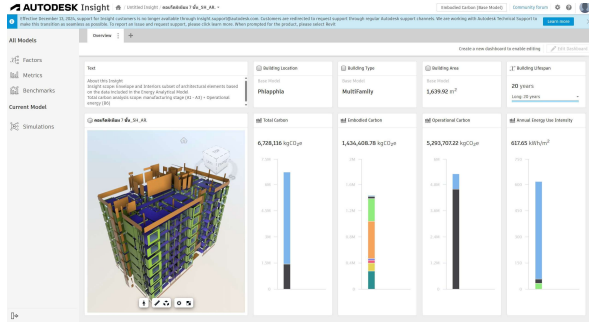


รูปที่ 6 การใช้ Revit กับงานสถาปัตยกรรม

(อ้างอิงจาก : <https://synergyssoft.co.th/educenter/course/revit/arc-01>)

2.2.2 Autodesk Insight (Education license)

โปรแกรมที่ทำงานร่วมกับ Autodesk Revit โดยสามารถส่งข้อมูลอาคารไปวิเคราะห์พลังงานและการคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ด้วย Autodesk Insight 360 ได้ทันที ช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้อย่างสะดวกขึ้น

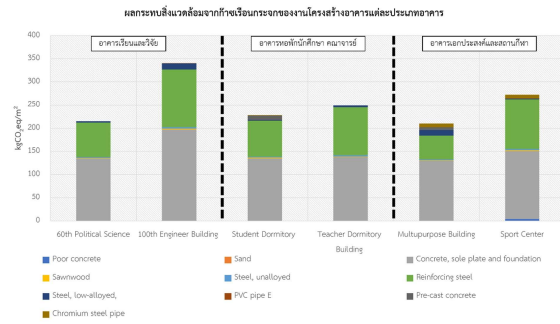


รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม Autodesk Insight 360

(อ้างอิงจาก : <https://synergyssoft.co.th/article/special/aec/autodesk-insight-360>)

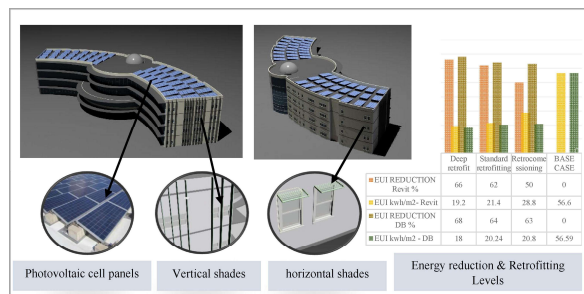
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิพัฒน์(2560)[1]งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของอาคารสถานศึกษาใน ประเทศไทย โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อบ่งชี้แหล่งกำเนิดผลกระทบที่สำคัญ อันจะนำไปสู่การวิเคราะห์แนวทางการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการประเมินศักยภาพการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามแนวทางต่างๆ โดยคำนึงถึงต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย ผลการวิจัยพบว่า ในการแบ่งวัฏจักรชีวิตของอาคารออกเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงก่อนการใช้งานอาคารหรือช่วงก่อสร้าง (Construction Phase) ช่วงการใช้งานอาคาร(Operation Phase) และช่วงหลังการใช้งานอาคารหรือช่วงรื้อทำลาย(Demolition Phase) ช่วงที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงสุดคือ ช่วงการใช้งานอาคาร ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งานที่ 50 ปีเป็นหลัก รองลงมาคือช่วงการก่อสร้างอาคาร ซึ่งเกิดจากการได้มาซึ่งวัสดุก่อสร้างต่างๆ โดยวัสดุที่ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุดคือ คอนกรีต(Concrete) และเหล็กเสริมคอนกรีต (Reinforcing steel) แต่เนื่องจากวัสดุที่ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุดเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักอาคาร จึงสามารถปรับเปลี่ยนได้ยาก งานวิจัยนี้จึงเสนอแนะแนวทางการลด ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการปรับเปลี่ยนวัสดุรอบอาคารเป็นหลัก ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า วัสดุรอบ อาคารที่ก่อให้เกิดความยั่งยืนสูงสุดทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และด้านสิ่งแวดล้อม คือ ฉนวนเซลลูโลส และคอนกรีตมวลเบา โดยสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ 107,740 tCO₂eq และ 97,321 tCO₂eq ตามลำดับ



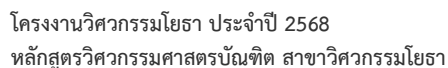
รูปที่ 8 ผลวิเคราะห์ปริมาณก๊าซของชนิดวัสดุในงานโครงสร้างแต่ละประเภทอาคาร

Danial et al.(2023)[2]การปรับปรุงอาคารเดิม(Retrofitting) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็นความจำเป็นที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ทำให้แนวคิดการประหยัดพลังงานเป็นที่นิยมมากขึ้นในฐานะทางออกต่อปัญหานี้ อาคารส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่ยั่งยืน ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหา แม้การก่อสร้างอาคารใหม่ที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานจะช่วยให้ได้แต่ก็ยังไม่เพียงพอ อาคารที่มีอยู่ในปัจจุบันมีสัดส่วนการใช้พลังงานประมาณ 60% ของการใช้พลังงานทั่วโลก การปรับปรุงอาคารเดิมสามารถทำให้การใช้พลังงานต่ำลงได้ง่าย ปัญหาคือการหาซอฟต์แวร์ที่สามารถช่วยออกแบบ จินตนาการ จำลอง วิเคราะห์ และจัดทำเอกสารโครงการได้อย่างแม่นยำ สะดวก และรวดเร็ว ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือการพัฒนาโครงสร้างสำหรับการบูรณาการระหว่าง BIM และประเภทของการปรับปรุงอาคาร ซึ่งจะทำได้โดยการรวมกลยุทธ์การปรับปรุงเชิงลึก(deep retrofitting) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานรายปีได้ถึง 68% โดยเลือกอาคารสำนักงานมหาวิทยาลัยคลองสุขเป็นกรณีศึกษา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้โปรแกรม Revit ง่ายและรวดเร็วกว่าโปรแกรม Design Builder ในการจำลองพลังงาน แต่โปรแกรม Revit ยังต้องได้รับการพัฒนาเพิ่มเติม แนวทางการปรับปรุงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์การรับรองมาตรฐาน LEED ได้



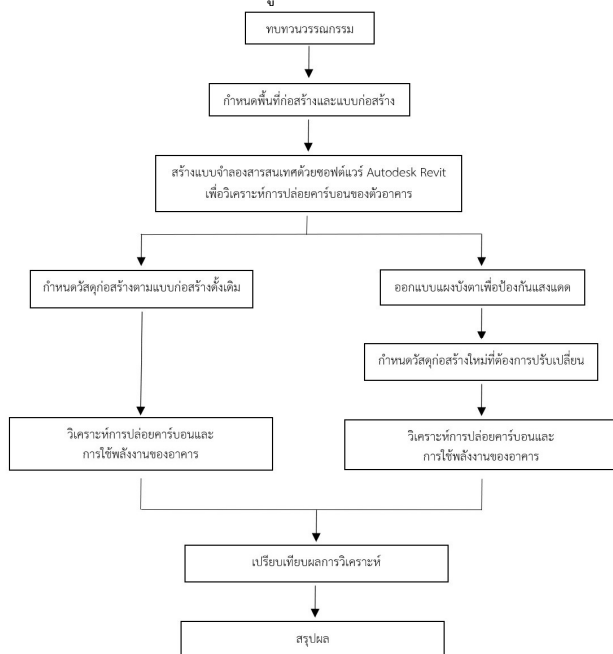
รูปที่ 9 อาคารสำนักงานของมหาวิทยาลัยคลองสุขหลังจากการเพิ่มกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด(การปรับปรุงเชิงลึก)

Khan et al.(2023)[3]การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร(BIM) เป็นแพลตฟอร์มข้อมูลและเครื่องมือจัดการสมัยใหม่ที่ส่งเสริมการพัฒนาอาคารสีเขียว ในประเทศปากีสถาน ภาคการก่อสร้างใช้พลังงานมากกว่า 50% ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมด และมีอัตราการเติบโตต่อปีอยู่ที่ 4.7% ในภาคครัวเรือน และ 2.5% ในภาคเชิงพาณิชย์ ตามลำดับ ปัญหาพลังงานถือเป็นอุปสรรคทางเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดของประเทศปากีสถาน โดยสภา Building Information Modeling แห่งปากีสถาน(Pakistan BIM



รูปที่ 10 แบบจำลองพลังงานที่สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360

งานวิจัยการใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่ 7 เพื่อออกแบบอาคาร
อนุรักษ์พลังงาน : กรณีศึกษาอาคารพักอาศัย 7 ชั้น ได้แบ่งการศึกษา
ออกเป็น 9 ขั้นตอนดังแสดงในรูป

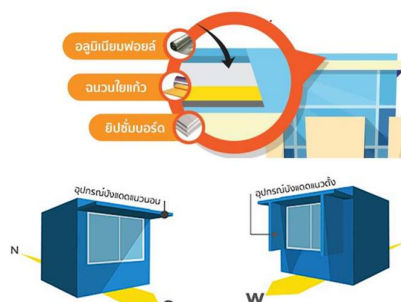


รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินงาน
โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

บททวนเอกสารและงานวิจัยเพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้และทฤษฎีต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย ทำการรวบรวมจากวิทยานิพนธ์ บทความทางวิชาการ หนังสือ และเอกสารต่างๆ จากทั้งในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาตามหัวข้อดังนี้

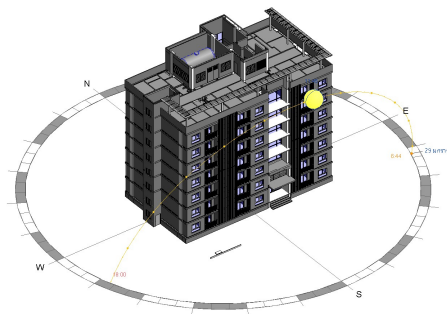
3.1.2 การปรับปรุงวัสดุรอบอาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

3.1.3 งานวิจัยในอดีตเรื่องการใช้สารสนเทศอาคารในการวิเคราะห์การใช้พลังงาน



รูปที่ 12 การปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างและทิศทางการวางอาคาร

การศึกษานี้ได้เลือกตำแหน่งและทิศทางของอาคารเป็นกรณีวิเคราะห์ผลกระทบตัวแปรด้านทิศทางและตำแหน่งที่ตั้งว่าส่งผลกับการวิเคราะห์ผลด้านปริมาณการปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของตัวอาคารจากซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360 หรือไม่อย่างไร ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทิศทางโดยกำหนดด้านหน้าของอาคารเริ่มต้นที่ ทิศใต้ ปรับเพิ่มทีละ 90 องศาในทิศตามเข็มนาฬิกา การวิเคราะห์ข้อมูลด้านตำแหน่งทำการศึกษา 4 ตำแหน่งได้แก่ เชียงใหม่ กรุงเทพฯ ขอนแก่น และสงขลา เพราะเนื่องจากประเทศไทยมีการแบ่งภูมิภาคที่แตกต่างกัน การแบ่งกลุ่มวัฒนธรรมแบบกว้างๆ เป็น 4 ภูมิภาค ซึ่งใช้มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 ตามการแบ่ง ของคณะกรรมการภูมิศาสตร์แห่งชาติ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ โดยมีการกระจายเชิงพื้นที่ ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเนื่องจากในแต่ละพื้นที่ให้ค่าการกระทำความเย็น ที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์ผลข้อมูล ภูมิภาคละ 1 จังหวัด



รูปที่ 13 ตัวอย่างการระบุทิศทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล



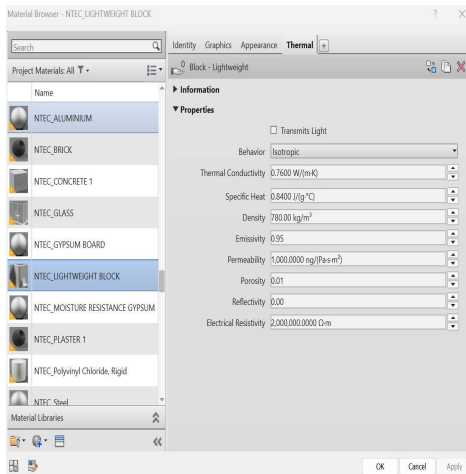
3.3 จัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit เพื่อวิเคราะห์ผลด้านปริมาณการปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคาร โดยเลือกใช้แบบอาคารที่พักอาศัยแบบอาคารชุด มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 7 ชั้น โครงสร้างหลักเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลปริมาณการปล่อยคาร์บอนของอาคาร เนื่องจากเป็นแบบก่อสร้างอาคารจึงต้องมีการคำนึงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม



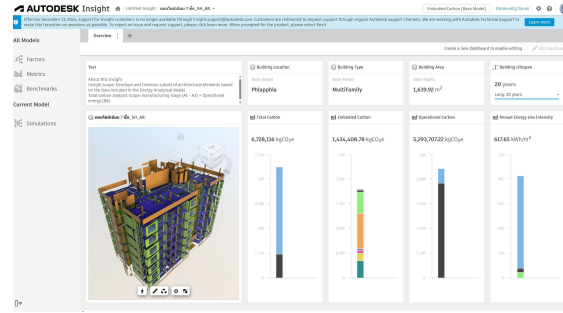
รูปที่ 14 แบบจำลองสถาปัตยกรรมอาคาร(ก่อนปรับปรุง)

การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลปริมาณการปล่อยคาร์บอนของอาคารมีขั้นตอนเบื้องต้นดังนี้ การสร้างแบบจำลองสถาปัตยกรรมอาคารตัวอย่างในรูปที่ 14 จากนั้นทำการตั้งค่าวัสดุและข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบของอาคารให้แสดงผลข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนอย่างถูกต้อง



รูปที่ 15 การตั้งค่าและใส่ข้อมูลต่างๆของวัสดุในแต่ละองค์ประกอบ

จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองด้านพลังงานและปริมาณการปล่อยคาร์บอนโดยใช้ฟังก์ชัน Analyze เพื่อนำแบบจำลองอาคารไปตรวจสอบและวิเคราะห์ผลต่อในซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360



รูปที่ 16 แบบจำลองด้านพลังงานและปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360

3.4 วิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคาร

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคาร ทั้ง 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 4 ทิศทาง ด้วยแบบจำลองอาคารเดิม กับแบบจำลองอาคารที่ได้ทำการปรับปรุงวัสดุและติดตั้งระบบบังตาเพื่อป้องกันแสงแดด

3.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองอาคารเดิม

- กำหนดวัสดุของกรอบอาคารเดิม

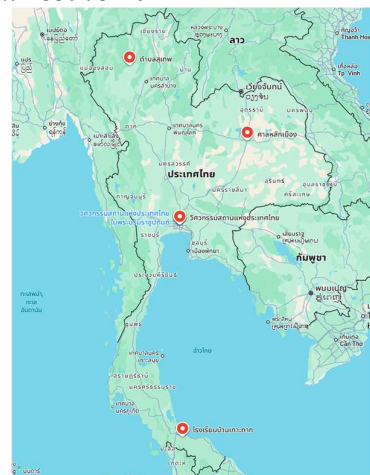
อาคารที่พักอาศัย มีโครงสร้างหลักเป็นแบบคอนกรีตเสริมเหล็กและกรอบอาคารมีรายละเอียดวัสดุดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดวัสดุของกรอบอาคารเดิม

ส่วนประกอบกรอบอาคาร	รายละเอียดวัสดุ
ผนังทับ	อิฐบล็อกฉาบปูนเรียบ, คอนกรีตเสริมเหล็ก
ผนังโปร่งแสง	กระจกใส หนา 6 มม.
หลังคาและฝ้า	พื้นดาดฟ้าคอนกรีตเสริมเหล็ก ฝ้าฉาบฉั่มบอร์ดหนา 9 มม.

- วิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคารเดิม

ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ผลการปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคาร ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ 4 กลุ่มกรณีตำแหน่งที่ตั้งและทิศทางของอาคาร คือ 1) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดเชียงใหม่ 2) ตำแหน่งที่ตั้งกรุงเทพฯ 3) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดสงขลา 4) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดขอนแก่น ทำให้การศึกษาครั้งนี้ได้แบบจำลอง 16



รูปที่ 17 ตำแหน่งที่ตั้งอาคารกรณีศึกษา



3.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองอาคารที่ทำการปรับปรุง

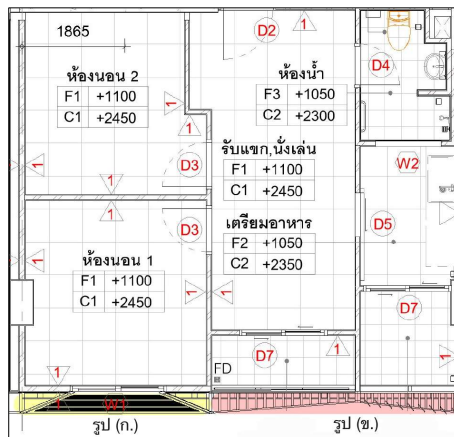
- ออกแบบแผงบังตาเพื่อป้องกันแสงแดด

การออกแบบแผงบังตา มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดปริมาณความร้อนและรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่อาคารโดยตรง อันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในอาคารพักอาศัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยซึ่งมีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น การควบคุมแสงแดดจึงมีความสำคัญอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแผงบังตาที่ติดตั้งบริเวณผนังด้านนอกอาคาร แผงบังตาที่ออกแบบมีลักษณะเป็นแนวตั้ง เพื่อช่วยลดความร้อนจากแสงแดดที่ส่องเข้ามาโดยตรง ขณะเดียวกันยังคงเปิดโอกาสให้มีการรับแสงธรรมชาติและการระบายอากาศได้เพียงพอ และยังได้มีการออกแบบแผงบังตานวนอน เพื่อป้องกันแสงอาทิตย์ที่มีมุมตกกระทบสูงในช่วงกลางวัน ซึ่งช่วยลดการสะสมความร้อนภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบแผงบังตานี้ไม่เพียงช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศ แต่ยังเป็นองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมที่ช่วยเพิ่มคุณค่าเชิงความงามและสร้างเอกลักษณ์ให้แก่อาคารอีกด้วย



รูป (ก.) มุมมองภาพจำลอง

รูป (ข.) มุมมองภาพจำลอง



รูป (ค.) ตำแหน่งการติดตั้งแผงบังตา

รูปที่ 18 การติดตั้งแผงบังตา(อาคารที่ทำการปรับปรุง)

- กำหนดวัสดุของกรอบอาคารที่ทำการปรับปรุง

อาคารที่พักอาศัย มีโครงสร้างหลักเป็นแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก และกรอบอาคารมีรายละเอียดวัสดุดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดวัสดุของกรอบอาคารที่ทำการปรับปรุง

ส่วนประกอบกรอบอาคาร	รายละเอียดวัสดุ
ผนังทับ	อิฐมวลเบาขนาด 1 นิ้ว, คอนกรีตเสริมเหล็ก
ผนังโปร่งแสง	กระจก Low-e
หลังคาและฝ้า	พื้นลาดฟ้าคอนกรีตเสริมเหล็ก+ฉนวนเส้นใยเซลลูโลสหนา 1 นิ้ว, ฝ้าฉาบเรียบ

- วิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคารที่ทำการปรับปรุง

ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ผลการปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคารเมื่อทำการเพิ่มแผงบังตาและเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้เป็นกรอบอาคาร ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับกรอบอาคาร 3 ส่วนได้แก่ ปรับปรุงคอนกรีตมวลเบาและฉนวนเส้นใยเซลลูโลสหนา 1 นิ้วเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุผนังทับแสง ปรับปรุงเพิ่มฉนวนเส้นใยเซลลูโลสหนา 1 นิ้วที่พื้นคานฝ้า และปรับปรุงกระจกโดยการเลือกใช้กระจก Low-e ดังตารางที่ 3 ซึ่ง 3 วัสดุนี้เป็นแนวทางในการปรับปรุงในงานวิจัยของพิพัฒน์(พ.ศ.2560) และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ 4 กลุ่มกรณีตำแหน่งที่ตั้งและทิศทางของอาคาร คือ 1) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดเชียงใหม่ 2) ตำแหน่งที่ตั้งกรุงเทพฯ 3) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดสงขลา 4) ตำแหน่งที่ตั้งจังหวัดขอนแก่น ทำการศึกษาครั้งนี้ได้แบบจำลองอีก 16 แบบจำลอง

ตารางที่ 3 รูปตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงอาคาร

วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุง	รูปภาพตัวอย่างของวัสดุ
อิฐมวลเบา	
ฉนวนเส้นใยเซลลูโลส	

3.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานของอาคาร ระหว่างแบบจำลองอาคารเดิม และแบบจำลองอาคารที่ผ่านการปรับปรุง โดยใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบหลักได้แก่

3.5.1 ปริมาณคาร์บอนฝังตัวโดยเปรียบเทียบค่าคาร์บอนฝังตัวของอาคาร ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง (เชียงใหม่ กรุงเทพฯ สงขลา และขอนแก่น) และแต่ละทิศทางการวางอาคาร

3.5.2 ปริมาณคาร์บอนจากการใช้งานอาคารโดยเปรียบเทียบค่าคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง และแต่ละทิศทางการวางอาคาร

3.5.3 การใช้พลังงานไฟฟ้า (Annual Energy Use Intensity) โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำความเย็น แสงสว่าง และระบบอื่นๆของอาคาร ระหว่างอาคารเดิมกับอาคารที่ปรับปรุงแล้ว ในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง และแต่ละทิศทางการวางอาคาร

3.5.4 ปริมาณค่าไฟฟ้าของอาคารโดยทำการคำนวณและเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอาคาร ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้ง และแต่ละทิศทางการวางอาคาร



4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาแนวทางปรับปรุงอาคารในการลดคาร์บอนฝังตัวและคาร์บอนจากการใช้งานอาคารด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคารกรณีศึกษาอาคารที่อยู่อาศัย ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากอาคารเดิมและอาคารที่ทำการปรับปรุงรวมถึงผลกระทบด้านตำแหน่งและทิศทางโดยวิเคราะห์ตัวแปรตำแหน่งจำนวน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ เชียงใหม่ กรุงเทพฯ ขอนแก่น และสงขลา และได้ทำการแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 เรื่องดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัว ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง

การวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัว ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง สามารถวิเคราะห์ผลได้จากการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Insight 360 วิเคราะห์ผลปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัว ในทิศทางที่ต่างกันเริ่มจากทิศใต้ โดยสามารถแสดงตำแหน่งและทิศทางที่ทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนฝังตัวในแต่ละตำแหน่งของอาคารเดิมที่ทำการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4 และแสดงตำแหน่งและทิศทางที่ทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนฝังตัวในแต่ละตำแหน่งของอาคารที่ปรับปรุงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัวอาคารเดิมในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง

ตำแหน่งที่ตั้ง	ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัว (kgCO ₂ e)			
	แบบอาคารเดิม			
	0°	90°	180°	270°
จังหวัดเชียงใหม่	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78
กรุงเทพฯ	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78
จังหวัดสงขลา	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78
จังหวัดขอนแก่น	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78	1,434,408.78

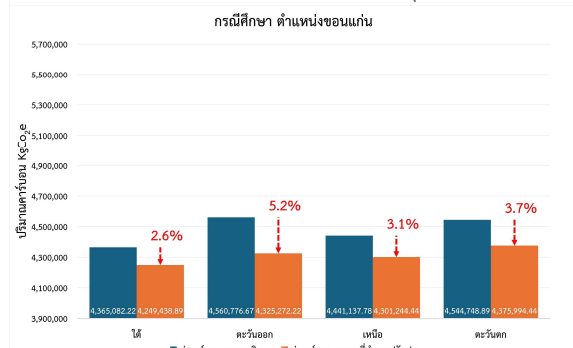
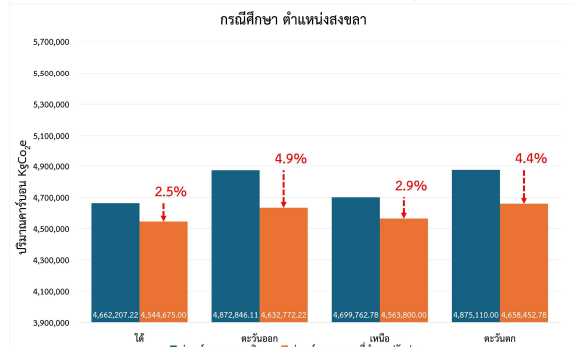
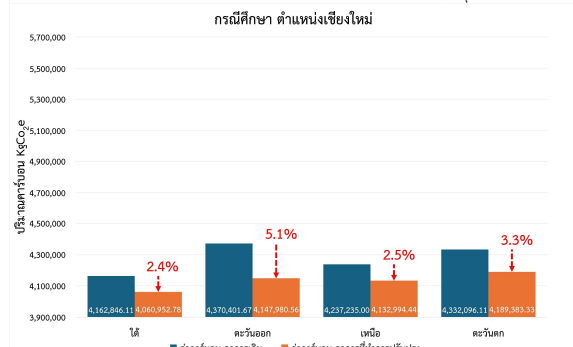
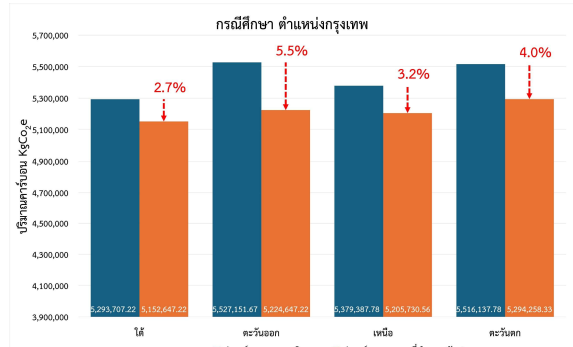
ตารางที่ 5 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัวอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง

ตำแหน่งที่ตั้ง	ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฝังตัว (kgCO ₂ e)			
	แบบอาคารที่ปรับปรุง			
	0°	90°	180°	270°
จังหวัดเชียงใหม่	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78
กรุงเทพฯ	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78
จังหวัดสงขลา	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78
จังหวัดขอนแก่น	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78	1,189,805.78

จากผลการศึกษา เนื่องจากคาร์บอนฝังตัวเป็นค่าคาร์บอนที่เกิดจากตัววัสดุก่อสร้าง การเปลี่ยนทิศทางการวางอาคารหรือตำแหน่งที่ตั้งนั้นค่าจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ แต่จะเห็นได้ว่าแบบอาคารที่ได้ทำการปรับปรุงวัสดุนั้นสามารถทำให้ค่าคาร์บอนฝังตัวของอาคารลดลงไป 244,603 kgCO₂e หรือคิดเป็นผลเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าคาร์บอนฝังตัวเท่ากับ 17%

4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง

การวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง สามารถแสดงตำแหน่งและทิศทางที่ทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนการใช้งานน้อยที่สุดในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์และร้อยละการลดลงของปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการใช้งานอาคารหลังการปรับปรุง ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการใช้งานอาคาร ทั้ง 4 ตำแหน่งศึกษา

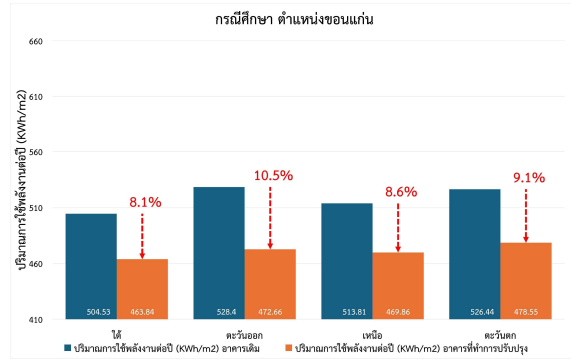
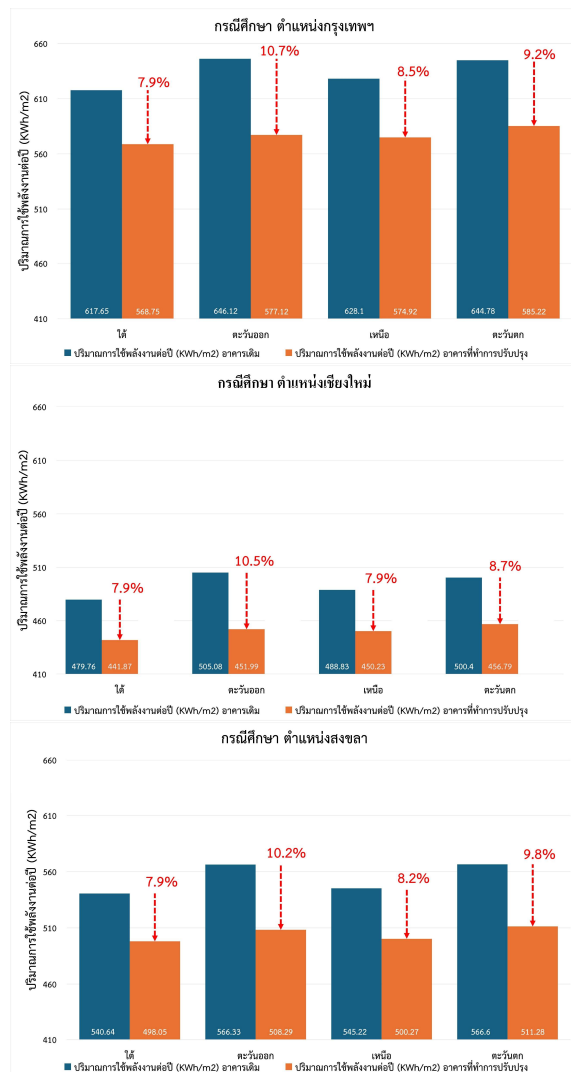
จากผลการศึกษาปริมาณการปล่อยคาร์บอนจากการใช้งานอาคารพบว่า ตำแหน่งที่ศึกษาทั้ง 4 ตำแหน่ง มีปริมาณคาร์บอนจากการใช้งานอาคารต่ำที่สุดเมื่อวางอาคารทางทิศใต้ และหลังการปรับปรุงอาคารมีปริมาณคาร์บอนจากการใช้งานอาคารลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 2.6% เนื่องจากประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนจากทิศตะวันออกไป



ตะวันตกโดยมีมุมเงยสูง ผนังด้านทิศใต้มักได้รับรังสีตรงน้อยกว่าและอยู่ในมุมที่สามารถควบคุมได้ง่ายด้วยกันสาดหรือฟาซาด ทำให้ความร้อนสะสมเข้าสู่อาคารน้อยกว่าทิศอื่น ๆ

4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี ระหว่างอาคารเดิมและอาคารที่ปรับปรุงในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งและแต่ละทิศทาง

จากการปรับปรุงวัสดุกรอบอาคาร การศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี ที่ใช้ในการทำความเย็น แสงสว่าง และระบบอื่นๆของอาคารระหว่างอาคารเดิมกับอาคารที่ปรับปรุงแล้ว สามารถแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี ที่น้อยที่สุดของอาคารเดิมกับอาคารที่ปรับปรุงแล้วดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี ทั้ง 4 ตำแหน่งศึกษา

จากผลการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีของตัวอาคาร พบว่า ตำแหน่งศึกษาทั้ง 4 ตำแหน่ง มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีต่ำที่สุดเมื่อวางอาคารทางทิศใต้ และหลังการปรับปรุงอาคารมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 8%

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์การทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ และคาร์บอนจากการใช้งานอาคารจากแบบอาคารเดิมกับแบบอาคารที่ทำการปรับปรุงแล้ว จากผลการทดสอบพบว่า ตำแหน่งศึกษาทั้ง 4 ตำแหน่ง นั้น มีทิศที่เหมาะสมต่อการวางอาคารที่อยู่อาศัยตัวอย่างคือทิศใต้ และจากผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงอาคารสามารถลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้ 17% และลดค่าการใช้พลังงานของอาคารต่อปีเมื่อวางอาคารทางทิศใต้ได้ 8%

จากการปรับปรุงอาคารโดยการปรับปรุงวัสดุอาคารส่วนผนังทึบเป็นคอนกรีตมวลเบาบวกกับฉนวนเส้นใยเซลลูโลสหนา 1 นิ้ว ปรับปรุงเพิ่มฉนวนเส้นใยเซลลูโลสหนา 1 นิ้วที่พื้นดานฟ้า ปรับปรุงกระจกโดยการเลือกใช้กระจก Low-e และทำการออกแบบแผงบังตาเพื่อป้องกันแสงแดดนั้นสามารถช่วยลดปริมาณคาร์บอนจากการใช้งานอาคารและลดการใช้พลังงานในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงอาคารให้มีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมในด้านอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ชะยะมูลฝอย

5.2.2 การศึกษาเพิ่มเติมในประเภทอาคารที่หลากหลายงานวิจัยนี้เน้นอาคารประเภทอาคารที่พักอาศัย ควรมีการศึกษาต่อในอาคารสำนักงาน โรงเรียน หรือโรงพยาบาล ที่มีลักษณะการใช้งานต่างกัน

5.2.3 ควรศึกษาวิเคราะห์ความคุ้มค่าของแนวทางการปรับปรุงกรอบอาคารเพื่อลดพลังงาน

5.2.4 การใช้เทคโนโลยีสมาร์ททิลดิ่ง ในอนาคตอาจเน้นการใช้ระบบอัตโนมัติ (Automation) และ IoT ในการปรับควบคุมพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับกรอบอาคารตามทิศทางที่เหมาะสม



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก อาจารย์ ฤทธิพิศ ก้องทอง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนถึง ความรู้ และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการศึกษา งานวิจัย ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่เป็นสถานที่บ่ม เพาะให้ความรู้และความอนุเคราะห์สถานที่ในการจัดทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยา เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน ทุนวิจัยบางส่วนจากมหาวิทยาลัยพะเยา สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน เพื่อน บุคคลรอบข้างทุกคน รวมถึงผู้ที่ให้ความ ช่วยเหลือทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บิดา มารดาและ ครอบครัว ที่ให้การ สนับสนุน คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดีและให้กำลังใจ แรงบันดาลใจ ที่ ทำให้เกิดงานวิจัยนี้

อ้างอิง

- [1] พิพัฒน์(พ.ศ.2560). การลดการปล่อยคาร์บอนจากอาคารโดย การ ประเมินวัฏจักรชีวิตของอาคาร, สืบค้น 10 สิงหาคม 2568, จาก <https://digital.car.chula.ac.th>
- [2] Danial และคณะ(พ.ศ.2566). Methodology for retrofitting energy in existing office buildings using building information modelling programs, สืบค้น 10 สิงหาคม 2568, จาก <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923000643>
- [3] Khan และคณะ(พ.ศ.2566). Bim-based energy analysis and optimization using insight 360 (case study), สืบค้น 10 สิงหาคม 2568, จาก <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522008877>
- [4] Global Alliance for Buildings and Construction. A building's carbon footprint over its lifespan is the sum of its embodied plus operational emissions. สืบค้นเมื่อ 5 กันยายน 2568, จาก <https://globalabc.org/buildingmaterialsandclimate/chapte-2-life-cycle-thinking/2-1-embodied-versus-operational-carbon-emissions-in-buildings.html>
- [5] การไฟฟ้านครหลวง. ประเภที่ 5 กิจการเฉพาะอย่าง. สืบค้น เมื่อ 6 กันยายน 2568, จาก <https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other/8zaWLPzHm>
- [6] บริษัท คชา (ไทยแลนด์) จำกัด. ความหมาย “อาคาร” แต่ละแบบ. สืบค้นเมื่อ 6 กันยายน 2568, จาก <https://www.kacha.co.th/articles/ความหมาย-อาคาร-แต่ละแบบ/>
- [7] eLogicTech solutions. Dimensions of BIM – BIM 3D, BIM 4D, BIM 5D, BIM 6D, and BIM 7D. สืบค้นเมื่อ 6 กันยายน 2568, จาก <https://www.elogictech.com/blog/bim-implementation-bim-3d-through-bim-7d/>
- [8] ThaiBIM. Level of Development (LOD) คืออะไร?. สืบค้น เมื่อ 6 กันยายน 2568, จาก <https://thaibim.net/2021/05/28/what-is-lod/>
- [9] SYNERGYSOFT EDUCATION CENTER. Autodesk Revit Architectural Modeling for Building Project Training Course. สืบค้นเมื่อ 6 กันยายน 2568, จาก <https://synergysoft.co.th/educenter/course/revit/arc-01>
- [10] Synergysoft. Autodesk Insight 360. สืบค้นเมื่อ 8 กันยายน 2568, จาก <https://synergysoft.co.th/article/special/aec/autodesk-insight-360>

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 3 สำหรับธุรกิจขนาดเล็ก กรณีศึกษาบ้านพักอาศัยในจังหวัดลำปาง Application of 3D Building Information Modelling for Small Enterprises: A Case Study of Residential Housing in Lampang Province

วชิราภรณ์ รุณวิจิตร¹ วรวัฑฒ์ แจงค์¹ สุพิชชา คล่องแคล่ว^{1,*} และฤทธิพิชญ์ ก้อนทอง²

¹นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

²อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: supicha.klongklew@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการออกแบบโครงสร้างสำหรับธุรกิจขนาดเล็ก โดยมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร กรณีศึกษาบ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กหนึ่งชั้นในจังหวัดลำปาง 3 หลัง เพื่อเปรียบเทียบกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศกับกระบวนการเดิม ในด้านประสิทธิภาพ เวลาและต้นทุนของกระบวนการทั้งหมด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเดิมใช้ซอฟต์แวร์ CSI Etab ในกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot มีค่าแรงเฉือนและค่าโมเมนต์ที่ได้มีค่าต่างกันไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้ซอฟต์แวร์แทนกันได้ ในส่วนของระยะเวลาและต้นทุนกระบวนการแบบสารสนเทศช่วยลด ระยะเวลาได้ดีกว่ากระบวนการแบบเดิม ดังนั้นการนำกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศเข้ามาช่วยในการทำงานสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานได้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

คำสำคัญ : แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, คอนกรีตเสริมเหล็ก, ซอฟต์แวร์ CSI Etab

Abstract

This study aims to improve the efficiency of structural design processes for small-scale enterprises through the implementation of Building Information Modeling (BIM) technology. Three single-story residential houses located in Lampang Province were selected as case studies to compare the performance of a BIM-based workflow with a conventional design process. The BIM-based process significantly reduced design time and total project cost. These findings suggest that integrating BIM into structural design can enhance efficiency and productivity, particularly for small-scale engineering firms.

Keyword : Building Information Modeling, Reinforced concrete, software CSI Etab

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

บริษัทรับออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างขนาดเล็กใน จ.ลำปาง มีกระบวนการทำงานที่มักจะเจอข้อผิดพลาดเช่น ความล่าช้าในการทำงานเนื่องจากการประสานงานที่ไม่ต่อเนื่องกัน เกิดข้อผิดพลาดจากการคำนวณและการจัดการข้อมูลที่ซับซ้อนของบุคลากรในการบันทึกข้อมูลด้วยมือ ข้อจำกัดของซอฟต์แวร์ที่ยังขาดความสามารถในการเชื่อมโยงข้อมูลหลายแหล่ง ทำให้การบริหารจัดการข้อมูลและการอัปเดตข้อมูลไม่มีประสิทธิภาพ การติดตามการเปลี่ยนแปลงที่ล่าช้าอาจเกิดความผิดพลาดในการอัปเดตข้อมูล รวมถึงการตัดสินใจที่รวดเร็วและแม่นยำจากการจัดเก็บข้อมูลที่ไม่เป็นระบบ

การนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร มาใช้ช่วยเพิ่มการทำงานให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บและอัปเดตในระบบเดียว การใช้เครื่องมือคำนวณอัตโนมัติ ทำให้การออกแบบและคำนวณสามารถทำงานร่วมกันได้แบบเรียลไทม์ ลดข้อผิดพลาด นอกจากนี้ การใช้ BIM มีความสามารถในการเชื่อมโยงข้อมูลจากโปรแกรมอื่นได้อย่างรวดเร็ว สามารถจัดการข้อมูลได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ ไม่ยุ่งยาก และสุดท้ายการจัดการข้อมูลในรูปแบบที่เป็นระบบช่วยให้สามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

แนวทางการแก้ไขปัญหาจากกระบวนการเดิม สามารถทำได้โดยการนำซอฟต์แวร์ Autodesk Robot ช่วยในการเชื่อมโยงข้อมูลจากหลายแหล่งให้เป็นระบบเดียว การอัปเดตข้อมูลทำได้ทันที ลดความล่าช้า และข้อผิดพลาดจากการคำนวณด้วยมือ และการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ช่วยให้การออกแบบและการคำนวณสามารถทำได้พร้อมกัน ในระบบเดียว ลดความผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนข้อมูลที่ผิดหรือการคำนวณผิดพลาด ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บอย่างมีระเบียบและสามารถเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การตัดสินใจในกระบวนการทำงานมีความแม่นยำและรวดเร็วยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทราบแนวทางการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการออกแบบทางวิศวกรรมโครงสร้าง
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานแบบดั้งเดิมกับกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศ
3. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าและความเป็นไปได้ในการปรับใช้ซอฟต์แวร์กับธุรกิจขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านซอฟต์แวร์

- Autodesk AutoCAD (Education license)
- Autodesk Revit (Education license)
- Autodesk Robot (Education license)
- CSI Etabs
- Microsoft Excel

1.3.2 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา

- จังหวัดลำปาง

1.3.3 ด้านแบบที่ใช้ในการศึกษา

- แบบบ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 หลัง ขนาดพื้นที่หลังละไม่เกิน 350 ตารางเมตร

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ได้แนวทางในการนำเทคโนโลยีมาใช้เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและลดข้อผิดพลาดในการออกแบบ
2. ได้ข้อมูลเปรียบเทียบเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกกระบวนการที่เหมาะสม
3. ได้ประสิทธิภาพ ลดเวลา และลดข้อผิดพลาดในการทำงาน

2. ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างบ้านทั่วไปมีความปลอดภัย ค.ส.ล. หรือ คอนกรีตเสริมเหล็ก คือ คอนกรีตเสริมรูปแบบหนึ่ง ที่เพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนัก ด้วยการใช้เหล็กเข้ามาช่วย ซึ่งเป็นวัสดุที่ผสมระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบบ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการออกแบบและก่อสร้างอาคาร โดยการสร้างแบบจำลองอาคาร (Building Model) พร้อมข้อมูลหรือสารสนเทศ (Information) จำลองการก่อสร้างอาคารจริง BIM ถูกนำมาใช้กับงานออกแบบมากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการผนวกการทำงานออกแบบ ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองอาคารและข้อมูลต่างๆ ไปใช้ในการทำงานขั้นต่อไป

2.3 ทฤษฎีความคาดเคลื่อน

ความคาดเคลื่อน เกิดขึ้นได้ในกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉพาะในการวัด การคำนวณ หรือการออกแบบ ส่งผลให้ผลลัพธ์มีความไม่แน่นอน หรืออาจคาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถควบคุมและลดผลกระทบได้ เช่น ความคาดเคลื่อนของเวลา

$$\Delta T = T_{actual} - T_{planned}$$

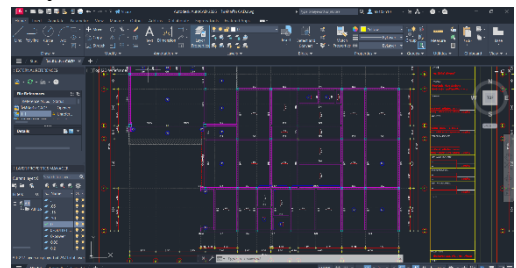
T_{actual} : ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำงานกระบวนการที่ 1

$T_{planned}$: ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำงานกระบวนการที่ 2

2.4 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD (Education license)

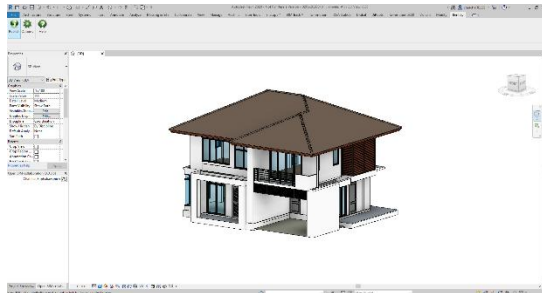
Autodesk AutoCAD เป็นซอฟต์แวร์ CAD สามารถสร้างชิ้นงานแบบกำหนดขนาดที่มีความซับซ้อน และรายละเอียดต่างๆ ได้อย่างเรียบง่ายและสามารถรองรับไฟล์ขนาดใหญ่ได้ดี นำไปสร้างแบบแปลนสำหรับงานก่อสร้าง ในการสร้างและแก้ไขรูปทรงเรขาคณิต 2D และสามารถเปลี่ยนมาทำงาน 3D ได้และมีความสามารถในการใส่คำอธิบายประกอบภาพวาดแบบ และนำเข้าข้อมูลจากไฟล์ PDF เพื่อดึงข้อมูลวัตถุลงในตาราง , 3D, View Port , Customization Menu Options ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD

2.4.2 ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit (Education license)

Autodesk Revit คือ ซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบงานด้านอาคารที่สามารถทำงานได้ทั้งรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น การจำลองอาคาร อีกทั้งยังสามารถสร้างตารางถอดปริมาณงานจากโมเดล ตลอดจนสามารถจัดทำ Shop Drawing ได้จากโมเดล 3 มิติ ดังรูปที่ 3

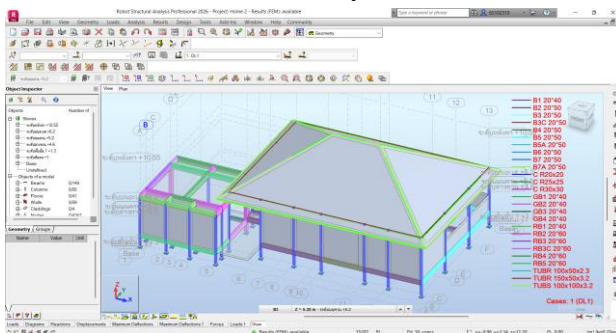


รูปที่ 3 ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

(ที่มา: <https://www.facebook.com/Knowhowskill/>)

2.4.3 ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot (Education license)

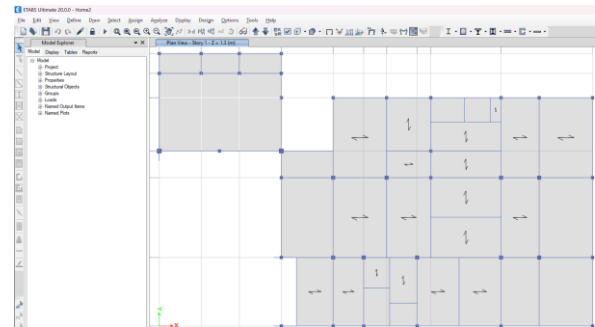
Autodesk Robot เป็นซอฟต์แวร์วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง ซึ่งมีความสามารถในการวิเคราะห์แรงและการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง ซอฟต์แวร์จะจำลองโครงสร้างให้เป็นองค์ประกอบย่อยๆ แล้วคำนวณแรง การเปลี่ยนรูป และความเครียดในแต่ละองค์ประกอบเหล่านั้น เพื่อหาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างและการแสดงผลแบบ 3D และรายงานผล ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot

2.4.4 ซอฟต์แวร์ CSI Etabs

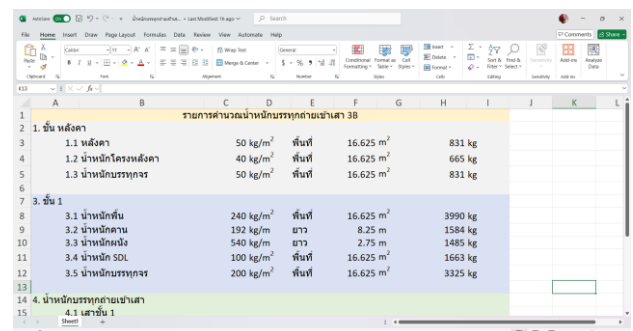
ซอฟต์แวร์ CSI Etabs (Extended Three-dimensional Analysis of Building Systems) เป็นซอฟต์แวร์วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคาร ที่สามารถวิเคราะห์แรงกระทำ เช่น แรงลม แผ่นดินไหว มีระบบช่วยวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ที่แม่นยำและรวดเร็วรองรับมาตรฐานการออกแบบตามกฎหมายหลายประเทศ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ซอฟต์แวร์ CSI Etabs

2.4.5 ซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

Microsoft Excel เป็นซอฟต์แวร์ตารางคำนวณ ใช้บันทึกและคำนวณข้อมูลตัวเลขด้วยสูตรต่าง ๆ สามารถประมวลผล สร้างกราฟ และวิเคราะห์ข้อมูลได้ ในงานก่อสร้าง ใช้คำนวณงบประมาณ ประเมินต้นทุน จัดตารางวัสดุ ใช้เป็นเครื่องมือจัดทำเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนงานก่อสร้าง ดังรูปที่ 6



รายการคำนวณปริมาณวัสดุและค่า 38				
1. ชั้น หลังคา				
1.1 วัสดุ	50 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	831 kg
1.2 ไม้เนื้อไม้	40 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	665 kg
1.3 ไม้เนื้อไม้	50 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	831 kg
2. ชั้น 1				
3.1 ไม้เนื้อไม้	240 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	3990 kg
3.2 ไม้เนื้อไม้	192 kg/m ²	ยาว	8.25 m	1584 kg
3.3 ไม้เนื้อไม้	540 kg/m ²	ยาว	2.75 m	1485 kg
3.4 ไม้เนื้อไม้ SOL	100 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	1663 kg
3.5 ไม้เนื้อไม้	200 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	3325 kg
4. ไม้เนื้อไม้				
4.1 ไม้เนื้อไม้				

รูปที่ 6 ซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายปรเมศวร์ พลรัฐนาสิทธิ (2556) [1]งานวิจัยนี้ได้เสนอการเปรียบเทียบศักยภาพในการจัดทำแบบก่อสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากสองเทคโนโลยีคือ CAD และ BIM ซึ่งศึกษาการเปรียบเทียบการแก้ไขแบบร่างขั้นสุดท้ายเพื่อจัดทำแบบก่อสร้างโดยการสอบถามและศึกษาปัญหาจากสถาปนิกโดยปัจจัยการศึกษาเปรียบเทียบคือปัจจัยด้านระยะเวลา ด้านคุณภาพความถูกต้องแม่นยำ และด้านงบประมาณ ผลที่ได้คือ เทคโนโลยี BIM สามารถบรรลุเกณฑ์วัตถุประสงค์การศึกษายกได้ขอบเขตการศึกษาทั้งหมด การนำเทคโนโลยีเทคโนโลยี BIM มาพัฒนาและประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องกับการทำงานภายในองค์กรจะสามารถเพิ่มความมั่นใจให้กับบุคลากรโดยเฉพาะ การจัดทำแบบก่อสร้างได้มาก ดังรูปที่ 7

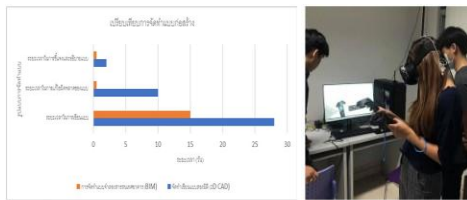


รูปที่ 7 อ้างอิงงานวิจัย การศึกษาเปรียบเทียบการเขียนแบบโดย

เทคโนโลยีคือ CAD และ BIM ในงานก่อสร้าง

(ที่มา: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/thapra/Porramaze_Ponrattanasit/fulltext.pdf)

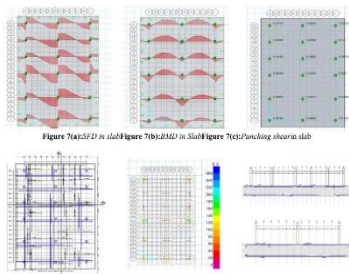
อภิชาติ บัวกล้าและคณะ (2565) [2].งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์การนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร มาใช้ในโครงการก่อสร้างที่พักแพทย์ ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุ จังหวัดเชียงราย และเปรียบเทียบระหว่างการทำงานด้วยระบบเดิมคือการเขียนแบบสองมิติ (2D CAD) กับการทำงานด้วยระบบจำลองอาคารสารสนเทศ (BIM) ใน 3 ด้านพบว่า การทำแบบก่อสร้างด้วยระบบแบบจำลองอาคารสารสนเทศมิติที่สาม ของโครงการ ช่วยให้เวลาในการทำแบบเสร็จเร็วขึ้นร้อยละ 46 ต้นทุนในการก่อสร้างลดลงเนื่องจากการตรวจพบข้อขัดแย้งใน ระบบต่างๆ ก่อนการก่อสร้างจริง และทำให้การสื่อสารเกี่ยวกับ โครงการก่อสร้างทั้งหมดเป็นไปอย่างราบรื่น ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่สามในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักแพทย์ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุ จังหวัดเชียงราย

(ที่มา : <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/EJRD/1099627.pdf>)

Oliver C. Waka และคณะ (2561) [3]. ศึกษาการวิเคราะห์แรงและการตอบสนอง (เช่น lateral displacement, storey drift, shear, bending moments) ของอาคารสูงระดับกลาง ใช้ ETABS จำลองการทำงานกับโหลดทางแรงโน้มถ่วง แผ่นดินไหว และลม พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การเคลื่อนตัวและแรงเฉือนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล ดังรูปที่ 9

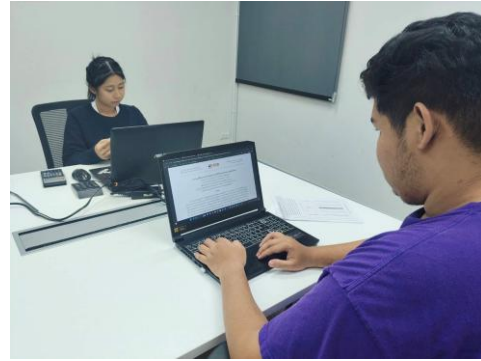


รูปที่ 9 การวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารสูงขนาดกลางโดยใช้ ETABS
(ที่มา: <https://shorturl.asia/Elcza>)

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อการเปรียบเทียบศักยภาพในการจัดทำแบบก่อสร้างของซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD และซอฟต์แวร์ Autodesk Revit รวมถึงหลักการและแนวคิดของเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ของโครงการขนาดเล็ก ในการวิเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และหาแนวทางการทำงานในการกำหนดหัวข้อ และเนื้อหาที่สำคัญที่ต้องการศึกษา



รูปที่ 10 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2 กระบวนการรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลสนับสนุนเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพโดยจะแบ่งได้เป็น ส่วนดังนี้

3.2.1 การสอบถามและการสัมภาษณ์

จัดทำขึ้นเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการออกแบบโครงสร้างในปัจจุบัน การใช้ซอฟต์แวร์ ปัญหาและข้อจำกัดของบริษัท รวมถึงแนวทางการปรับใช้กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศในการออกแบบ

3.2.2 การเก็บข้อมูลด้านเวลา

การเก็บข้อมูลด้านเวลาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการออกแบบ โดยใช้วิธีการบันทึกเวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการ ทั้งในการออกแบบกระบวนการดั้งเดิมและการออกแบบด้วยแบบจำลองสารสนเทศ

ขั้นตอนการบันทึกเวลา ประกอบด้วย

1. ระยะเวลาในการคำนวณแรงปฏิกิริยา (วัน)
2. ระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้าง (วัน)
3. ระยะเวลาในการคำนวณรายการออกแบบ (วัน)
4. ระยะเวลาในการเขียนแบบ (วัน)
5. ระยะเวลาในการการถอดปริมาณ (วัน)
6. ระยะเวลาในการปรับปรุงและแก้ไขแบบ (วัน)

3.2.3 การเก็บข้อมูลด้านต้นทุน

การเก็บข้อมูลด้านต้นทุนจะพิจารณาเพื่อประเมินความคุ้มค่าของการใช้การออกแบบด้วยแบบจำลองสารสนเทศและการออกแบบกระบวนการดั้งเดิม

- ค่าใช้จ่ายของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบ เช่น

Autodesk Revit, Robot Structural Analysis, AutoCAD, ETABS

- ค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ระดับกลางถึงสูง, การ์ดจอ, หน่วยความจำ, และอุปกรณ์ต่อพ่วง)

- ค่าแรงของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาการทำงาน

- ค่าเสียโอกาสจากการแก้ไขแบบหรือการประสานงานล่าช้า

3.3 ดำเนินการเลือกแบบเพื่อจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ

คัดเลือกแบบอาคารที่จะศึกษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 หลัง ขนาดพื้นที่หลังละไม่เกิน 350 ตารางเมตร ในพื้นที่ จ.ลำปาง เพื่อเป็น ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 11 ดำเนินการเลือกแบบเพื่อจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดย 2 ส่วนหลักคือ การออกแบบวิศวกรรมโครงสร้างการทำงานแบบเดิม โดยนำ ข้อมูลที่ได้มาประมวลผล อีกส่วนคือกระบวนการการออกแบบวิศวกรรม ด้วยแบบจำลอง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผล ส่วนสุดท้ายคือการ วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูล

3.5 การออกแบบกระบวนการทำงานเดิม

3.5.1 ขั้นตอนการคำนวณแรงปฏิกิริยาเบื้องต้น ในซอฟต์แวร์

Microsoft Excel

คำนวณน้ำหนักเข้าเสาด้วยวิธี Tributary area รายการคำนวณนี้ อ้างตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และ พ.ศ. 2535 (ฉบับที่ 2) ใช้เหล็กเส้นข้ออ้อย ใช้เกรด SD40 ($f_y = 4000$ ksc) และ เหล็กเส้นกลมใช้ เกรด SR24 ($f_y = 2400$ ksc) อ้างอิงตามมาตรฐาน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พ.ศ.2517

น้ำหนักบรรทุกจรประเภทพื้นที่พักอาศัยและประเภทส่วนหลังคาใช้ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และ 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

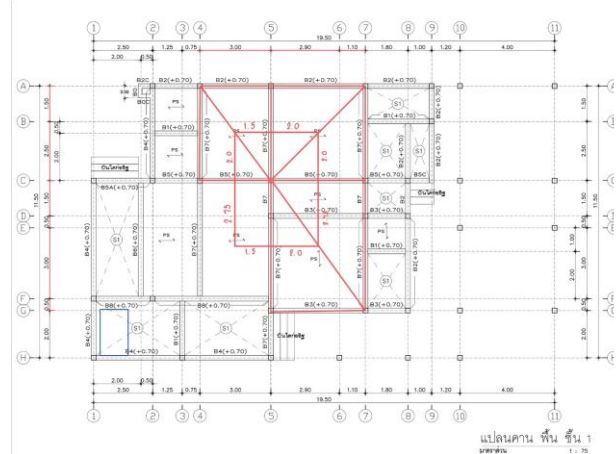
ตามลำดับอ้างอิงจากกฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้าง อาคาร และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566

รายการคำนวณน้ำหนักบรรทุกถ่ายเข้าเสา 3B				
1. ชั้น หลังคา				
1.1 หลังคา	50 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	831 kg
1.2 น้ำหนักโครงสร้างหลังคา	40 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	665 kg
1.3 น้ำหนักบรรทุกจร	50 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	831 kg
3. ชั้น 1				
3.1 น้ำหนักพื้น	240 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	3990 kg
3.2 น้ำหนักคาน	192 kg/m	ยาว	8.25 m	1584 kg
3.3 น้ำหนักผนัง	540 kg/m	ยาว	2.75 m	1485 kg
3.4 น้ำหนัก SDL	100 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	1663 kg
3.5 น้ำหนักบรรทุกจร	200 kg/m ²	พื้นที่	16.625 m ²	3325 kg
4. น้ำหนักบรรทุกถ่ายเข้าเสา				
4.1 เสาชั้น 1				
บรรทุกคงที่				1827 kg
บรรทุกคงจร				831 kg
น้ำหนักบรรทุกปรับค่า Pu				3972 kg
4.2 คอลัมน์				
บรรทุกคงที่				10722 kg
บรรทุกคงจร				4156 kg
น้ำหนักบรรทุกปรับค่า Pu				22076 kg

ภาพที่ 12 การคำนวณหน้าตัดคานโดยพิจารณาแรงเบื้องต้น โดยใช้

ซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

ออกแบบน้ำหนักเข้าเสาด้วยวิธี Tributary area



ภาพที่ 13 รายละเอียดระยะความยาวของพื้นที่ที่จะทำการคำนวณ

น้ำหนักบรรทุกถ่ายเข้าเสา

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณรายการน้ำหนักบรรทุกถ่ายเข้าเสา ใช้ระยะเวลา

รายการคำนวณ	น้ำหนัก (kg/m ²)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนักที่รับได้ชอบ (kg)
1. ชั้น หลังคา			
1.1 หลังคา	50	16.625	831
1.2 โครงหลังคา	40	16.625	665
1.3 บรรทุกจร	50	16.625	831
3. ชั้น 1			
3.1 พื้น	240	16.625	3990
3.2 น้ำหนักคาน	192	8.25	1584
3.3 น้ำหนักผนัง	180	2.75	315
3.4 น้ำหนัก SDL	100	16.625	1663
3.5 น้ำหนักบรรทุกจร	200	16.625	3325
4. น้ำหนักบรรทุกถ่ายเข้าเสา			
ตัวอย่างการคำนวณ			น้ำหนักที่รับได้ชอบ (kg)
4.1 เสาชั้น 1			
บรรทุกคงที่	831+665+2400x0.2x0.2x3.45		1827
บรรทุกคงจร			831
น้ำหนักบรรทุกปรับค่า	(1.4x1827)+(1.7x831)		3972
4.2 คอลัมน์			
บรรทุกคงที่	1827+(3990+1584+315+1663)+2400x0.2x0.2x1.8		9551.8
บรรทุกคงจร	3325+831		4156
น้ำหนักบรรทุกปรับค่า	(1.4x9551.8)+(1.7x4156)		20997.72

การจัดทำ 1 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรประมาณราคา 500 บาทต่อวัน

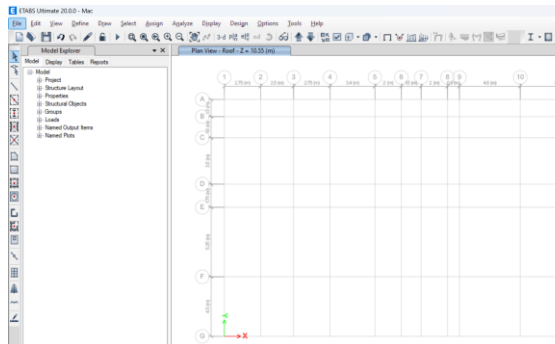
3.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลอง ในซอฟต์แวร์ CSI Etabs

การนำข้อมูลผลการวิเคราะห์จากซอฟต์แวร์ CSI Etabs มาคำนวณต่อในซอฟต์แวร์ Microsoft Excel ที่ใช้จัดทำรายการ ออกแบบและประมาณราคางานก่อสร้าง เพื่อนำมาคำนวณฐานราก และออกแบบเสา รายการคำนวณจะถูกจัดทำและแสดงผลในรูปแบบ ตารางด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้สามารถตรวจสอบความ ถูกต้องของข้อมูลได้อย่างชัดเจน

เมื่อได้ทราบแรงปฏิกิริยาเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำ ข้อมูลเข้าซอฟต์แวร์ CSI Etabs เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ซอฟต์แวร์นี้สามารถประมวลผลแรงภายใน เช่น แรงดัด แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด แต่ผู้ใช้งานต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาใหม่ ซึ่งอาจทำ ให้เกิดความซ้ำซ้อนของงาน และใช้เวลานาน

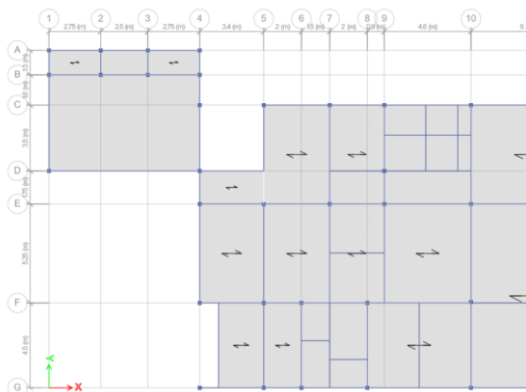
ขั้นตอนที่ 1 ตั้งค่าหน้ากระดาษ ตั้งค่าหน่วย ให้เป็น Metric MKS หรือหน่วย กิโลกรัมต่อเมตร ใช้เหล็กมาตรฐาน

AISC 14 มาตรฐานการออกแบบเหล็ก AISC 360-16 (มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กของสถาบันเหล็กก่อสร้างแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา) และมาตรฐานการออกแบบคอนกรีต ACI 318-14 (สถาบันคอนกรีตอเมริกัน) ต่อมาจัดทำโครงสร้างรูปแบบ Grid lines ระยะห่างระหว่าง Grid โดยวางไว้แบบคร่าวๆ จากนั้นกำหนดความสูงตามแบบสถาปัตยกรรม



ภาพที่ 14 Grid lines

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกำหนด Materials ให้เป็นไปตาม มาตรฐาน จากนั้นทำการสมมุติขนาดหน้าตัดแล้วทำการสร้าง เสา คานและพื้น เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง



ภาพที่ 15 การสร้าง เสา คานและพื้น

ขั้นตอนที่ 3 ทำการใส่ Load เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง โดยจะใช้สูตร $1.4DL + 1.7LL$ กำหนดน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) เช่น น้ำหนักพื้น, ผนัง, หลังคา และกำหนดน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ตามมาตรฐาน (อ้างอิง มยผ.1311/1301)



ภาพที่ 16 วิเคราะห์โครงสร้าง

การจัดทำ 2 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรประมาณราคา 500 บาทต่อวัน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ได้จากกระบวนการทำงานบ้านพักอาศัยหลังที่ 2

บ้านพักอาศัย หลังที่ 1	แรงเฉือนสูงสุด (Kgf)	โมเมนต์สูงสุด (Kgf/m ²)
คาน GB1/GB1C	-2869.20	-594.55
คาน GB2	-1216.72	1061.34
คาน GB3	-6633.44	-4461.69
คาน GB4	-3522.69	-2890.27
คาน B0/B0C	793.58	-209.77
คาน B1	3132.14	-1394.63
คาน B2/B2C	3890.06	-2651.07
คาน B3	6773.25	-3741.51
คาน B4	-5660.78	-4635.41
คาน B5A	-700.22	377.08
คาน B5/B5C	-1824.29	-767.64
คาน B6	7758.88	-6657.44
คาน B7	12200.52	-10762.87
คาน B8	12226.68	-6493.70

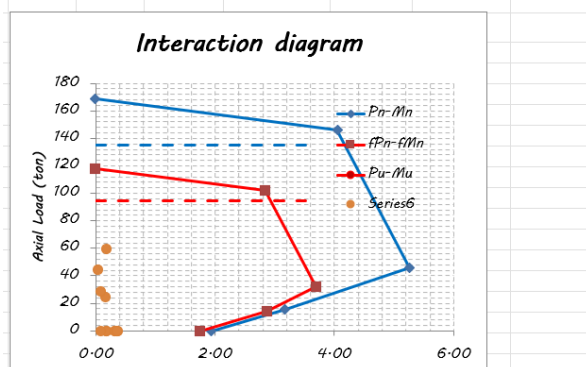
3.5.3 ขั้นตอนการคำนวณรายการออกแบบ ในซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

Footing F2	
Material properties	
fc'	240 ksc
fy	4000 ksc
β_1	0.85
Net soil pressure	
P_DL	4.67 t
P_LL	0.01 t
b	0.8 m
qu	10.24 t/m ²
One way shear strength	
thickness	25 cm
d	17.5 cm
Col Size	20 cm
Vu	1.02 t
ϕV_c	9.77 t
Two way shear strength	
Vu	6.555 t
bo	150 cm
ϕV_c	36.6404 t
Longitudinal reinforcement	
Mu	0.36872 t-m
p	0.00042
pmin	0.0018
As	2.52 cm ²
DB	12 mm
Number	7 bars
Spacing	10.8333 cm

ภาพที่ 17 รายการคำนวณฐานราก

ออกแบบเสา วิธี Interaction diagram โดยใช้ Excel สำเร็จรูป

Point	Pn-Mn		reduction factor	$\phi Pn-\phi Mn$		Pn/(fc'Ag)
	Pn (ton)	Mn (ton-m)		ϕPn (ton)	ϕMn (ton-m)	
A	168.5	0.00	0.70	118.0	0.0	1.12
B	146.3	4.05	0.70	102.4	2.8	0.98
C	46.1	5.27	0.70	32.3	3.7	0.31
D	15.9	3.18	0.90	14.3	2.9	0.11
E	0.0	1.96	0.90	0.0	1.8	0.00
Limit	134.8	0		94.4	0.0	
	134.8	3.51		94.4	3.5	



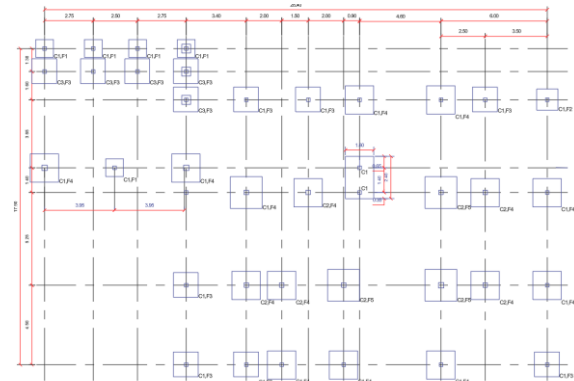
ภาพที่ 18 รายการออกแบบเสา Interaction diagram

การจัดทำ 1 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรประมาณราคา 500 บาทต่อวัน

3.5.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD (Education license)

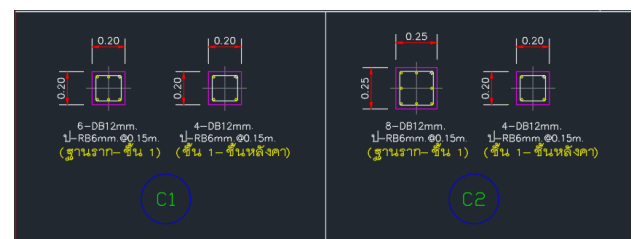
ขั้นตอนต่อมาคือการเขียนแบบด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD แบบแปลนและรายละเอียด โครงสร้างต้องอ้างอิงข้อมูลจากการคำนวณ หากมีการปรับแก้ไขแบบ ผู้เขียนแบบจำเป็นต้องแก้ไขข้อมูลทุกส่วนด้วย ตนเอง ซึ่งอาจทำให้ไม่สอดคล้องกันระหว่างแบบและผลการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1 เปิดซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD และเริ่ม สร้างแบบแปลนโครงสร้าง



ภาพที่ 19 แบบแปลนฐานราก

ขั้นตอนที่ 2 สร้างรูปตัดและรายละเอียดการเสริมเหล็กโดย อ้างอิงจากผลคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ Microsoft Excel และ CSI ETABS

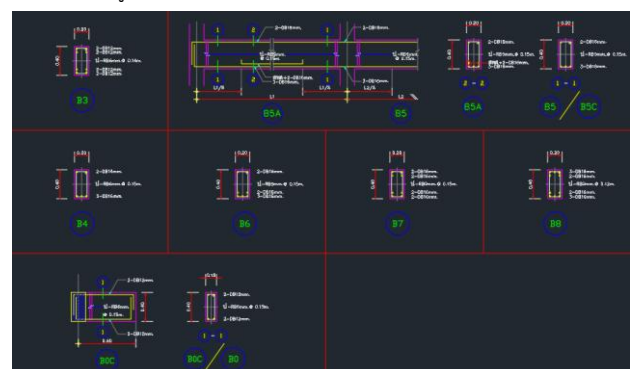


ภาพที่ 20 รูปตัดและรายละเอียดเสริมเหล็ก

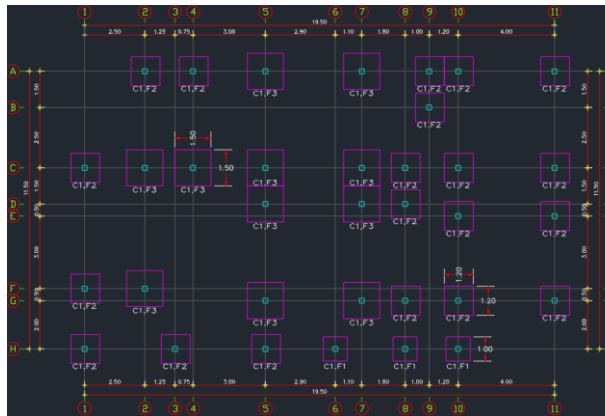
การจัดทำ 3 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรออกแบบ 500 บาทต่อวัน

3.5.5 ขั้นตอนการถอดปริมาณวัสดุด้วยซอฟต์แวร์ Microsoft Excel

หลังจากจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD แล้ว ขั้นตอนถัดมา คือการนำพื้นที่ของโครงสร้างมาคำนวณหาปริมาตรเพื่อ มาจัดทำในซอฟต์แวร์ Microsoft Excel เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุและจัดหมวดหมู่แต่ละงานโครงสร้างเป็น BOQ



ภาพที่ 21 แบบแปลนหน้าตัดก่อสร้าง



ภาพที่ 22 แบบแปลนฐานราก เสาตอม่อ

ตัวอย่าง งานเสาชั้น 1 จากภาพที่ 17 แบบแปลนฐานราก เสาตอม่อ พบว่าเป็นรายละเอียดของเสาชั้น 1 เสามีขนาด 0.2×0.2 ม. จากแบบแปลนหน้าตัดก่อสร้างเสามีความสูง 3 ช่วง ช่วงที่ 1 มีความสูง 3.35 ม. จำนวน 3 ต้น ช่วงที่ 2 มีความสูง 4.40 ม. จำนวน 22 ต้น ช่วงที่ 3 มีความสูง 3.0 ม. จำนวน 5 ต้น สามารถคำนวณปริมาณเสาชั้น 1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเสาคอนกรีตชั้น 1} &= (0.2 \times 0.2 \times 3.35 \times 3) + (0.2 \times 0.2 \times 4.40 \\ &\quad \times 22) + (0.2 \times 0.2 \times 4.40 \times 22) \\ &= 3.40 \text{ ลบ.ม} \end{aligned}$$

หมวดหมู่ : B. งานโครงสร้าง						
ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ค่าวัสดุ	คำนวณ	รวม
				หน่วยละ	จำนวนเงิน	ค่าวัสดุคำนวณ
B. งานโครงสร้าง						
B.1 งานฐานรากและเสาตอม่อ						
1. งานเสาเข็มคอนกรีต						
- งานเสาเข็มคอนกรีต	ลบ.ม.	6.40	399.00	5,130.00	-	5,130.00
- คอนกรีตสายรัด (S _c = 180 sec.)	ลบ.ม.	3.20	1,860.00	5,952.00	-	5,952.00
- คอนกรีตโครงสร้าง (S _c = 240 sec.)	ลบ.ม.	15.50	1,980.00	30,690.00	-	30,690.00
- เหล็กเส้น RB 9 มม. (SR24)	กก.	89.82	23.00	2,245.50	-	2,245.50
- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SR40)	กก.	941.28	24.00	22,590.72	-	22,590.72
2. งานเสาตอม่อ						
- คอนกรีตโครงสร้าง (S _c = 240 sec.)	ลบ.ม.	2.70	1,980.00	5,346.00	-	5,346.00
- เหล็กเส้น RB 6 มม. (SR24)	กก.	111.00	26.00	2,886.00	-	2,886.00
- เหล็กเส้น DB 12 มม. (SR40)	กก.	310.80	24.00	7,459.20	-	7,459.20
- รวมค่าแรงงานโครงสร้างฐานรากและเสาตอม่อ	ตร.ม.	214.29	-	-	500.00	107,145.00
รวมงานฐานรากและเสาตอม่อ					82,289.42	107,145.00
						189,434.42

ภาพที่ 23 รายการถอดปริมาณวัสดุ

การจัดทำ 1 วัน ค่าใช้จ่ายจ้างวิศวกรประมาณราคา 500 บาทต่อวัน

3.6 กระบวนการการออกแบบด้วยแบบจำลองสารสนเทศ

3.6.1 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ในซอฟต์แวร์ Autodesk Robot

การออกแบบด้วยแบบจำลอง (BIM) เป็นการรวมการวิเคราะห์โครงสร้าง การเขียนแบบ และการถอดปริมาณวัสดุให้อยู่ในแพลตฟอร์มเดียว โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot และ Autodesk Revit ช่วยลดความซ้ำซ้อนของงาน ลดข้อผิดพลาด และสามารถปรับแก้ไขแบบได้อย่างรวดเร็ว

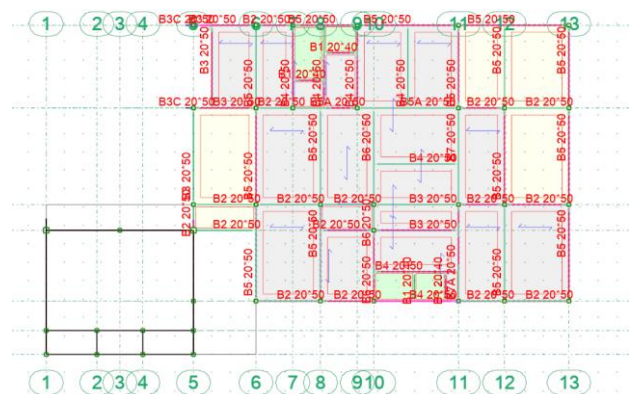
4.2.1 จัดทำแบบจำลองสารสนเทศและวิเคราะห์โครงสร้าง ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Robot (Education license)

ขั้นตอนที่ 1 ตั้งค่าหน้ากระดาษ ตั้งค่าหน่วย ใช้เหล็กมาตรฐาน ASTM A36 มาตรฐานการออกแบบเหล็ก (สมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา) และมาตรฐานการออกแบบ

คอนกรีต Strength 240 KSC กำหนดหน้าตัดเหล็กให้เป็นไปตาม มอก.20-2543 ต่อมาจัดทำโครงสร้างรูปแบบ Grid lines จากนั้นกำหนดความสูงตามแบบสถาปัตยกรรม

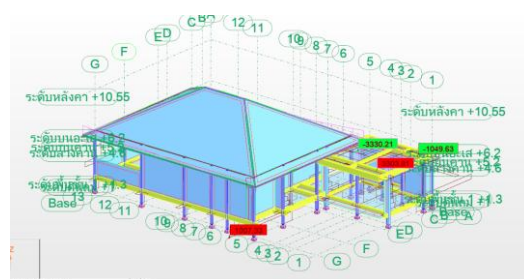
ภาพที่ 24 กำหนดมาตรฐานเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกำหนด Materials ให้เป็นไปตามมาตรฐาน จากนั้นทำการสมมุติขนาดหน้าตัดแล้วทำการสร้างเสา คาน พื้น และหลังคา จากนั้นทำการขึ้นโมเดล



ภาพที่ 25 แปลนคาน พื้นและ เสา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการใส่ Load เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง โดยใช้สูตร $1.4DL + 1.7LL$ กำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ (Dead Load) เช่น น้ำหนักพื้น, ผนัง, หลังคา และกำหนดน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ตามมาตรฐาน (อ้างอิง มยผ. 1311/1301)



ภาพที่ 26 วิเคราะห์โครงสร้าง

ตารางที่ 3 ตัวอย่างค่าแรงเหวี่ยงและโมเมนต์ที่ได้จากกระบวนการทำงาน
บ้านพักอาศัยหลังที่ 2

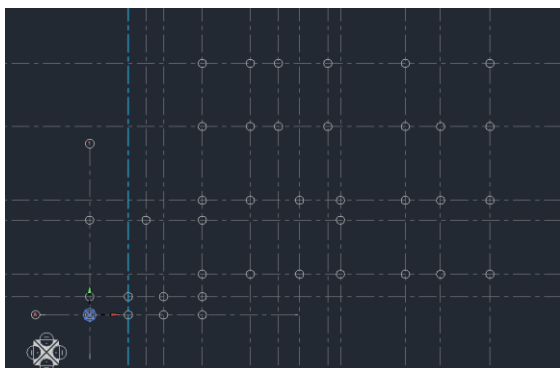
บ้านพักอาศัย หลังที่ 1	แรงเฉือนสูงสุด (Kgf)	โมเมนต์สูงสุด (Kgf/m ²)
คาน GB1/GB1C	-2753.36	-623.47
คาน GB2	-1267.58	1115.94
คาน GB3	-6594.27	-4532.52
คาน GB4	-3635.39	-2965.34
คาน B0/B0C	759.83	-217.98
คาน B1	3046.19	-1442.64
คาน B2/B2C	3923.75	-2598.35
คาน B3	6814.51	-3687.19
คาน B4	-5598.97	-4647.98
คาน B5A	-689.64	359.82
คาน B5/B5C	-1762.48	-731.62
คาน B6	7826.92	-6524.85
คาน B7	12300.78	-10348.61
คาน B8	12365.43	-6285.48

การจัดทำ 3 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรออกแบบ 500 บาทต่อวัน

4.2.2 ถอดปริมาณโดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit (Education are)

ขั้นตอนที่ 1 นำแบบแปลนและผลที่วิเคราะห์โครงสร้างจากซอฟต์แวร์ Autodesk Robot มายัง Autodesk Revit

ขั้นตอนที่ 2 ปรับขนาดคน เสา ตามผลการวิเคราะห์โครงสร้าง
จาก Autodesk Robot



ภาพที่ 27 แบบแปลนจานรอก

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสร้างตารางปริมาณ ได้แก่ ปริมาณ
ฐานราก ปริมาณคานคอนกรีต ปริมาณเสาคอนกรีต เป็นต้น
ทำการเลือกพารามิเตอร์ ได้แก่ Type mark Type Length Count
Volume จากนั้นใช้คำสั่ง Schedule Properties ให้ตัวซอฟต์แวร์

การจัดทำแบบจำลอง 3 มิติของบ้าน คสล. 3 หลัง ภายใน
ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit โดยการใช้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุแต่ละ

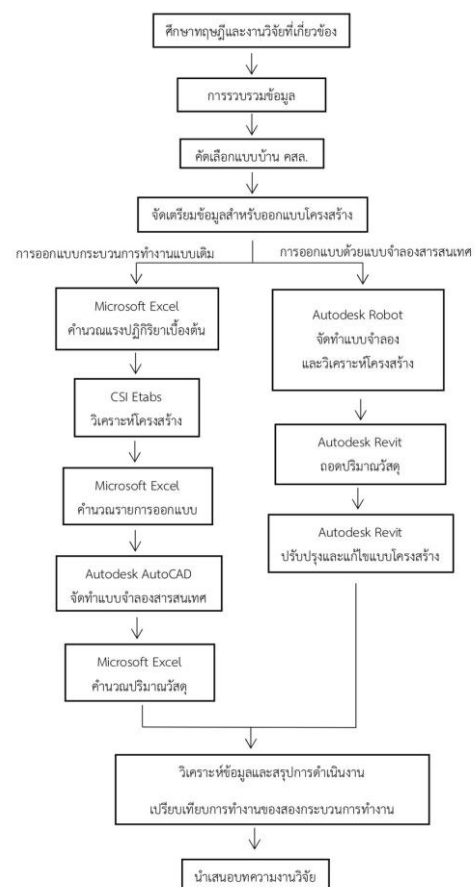
<Structural Column Schedule>							
A	B	C	D	E	F	G	H
Type Mark	Type	Count	System Length	Volume	Top Level	Top Offset	Structural Material
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C1	Typemark_C1_200	1	2.60	0.10 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C2	Typemark_C2_250	1	2.60	0.16 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default
C2	Typemark_C2_250	1	2.60	0.16 m³	ระดับชั้นที่ 1	0.00	Default

ภาพที่ 28 ปริมาณเสาคอนกรีต

การจัดทำ 3 วัน ค่าใช้จ่ายในการจ้างวิศวกรออกแบบ 500 บาทต่อวัน

3.7 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการดำเนินงาน

หลังจากการได้ข้อมูลและการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากทั้งสองกระบวนการ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ การลดระยะเวลาและความผิดพลาด ความสามารถในการประสานงานและเชื่อมโยงข้อมูล ผลการวิเคราะห์นั้นจะ ถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการทำงานใน บริษัทรบบอกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างขนาดเล็กในจังหวัดลำปาง รวมถึงสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับธุรกิจขนาดเล็กอื่น ๆ ที่ต้องการ เพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยี BIM สามารถทำการสรุปโดยมีแผนการ ดำเนินงานเป็นระบบ ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แสดงแผนการดำเนินงาน



4. ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารมิติที่ 3 สำหรับธุรกิจขนาดเล็กทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการแบบเดิมกับการนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร การศึกษานี้ทำเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลา การลดข้อผิดพลาด และต้นทุน เพื่อหาข้อแตกต่างระหว่างการออกแบบกระบวนการเดิมและการออกแบบด้วยแบบจำลองสารสนเทศ

4.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพกระบวนการทำงาน

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 1

บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 1	แรงเฉือน (Kgf)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	3132.14	3046.19	2.82
คาน B2	3890.06	3923.75	-0.86
คาน B3	6773.25	6814.51	-0.61
คาน B4	-5660.78	-5598.97	1.10
คาน B5	-1824.29	-1762.48	3.51
บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 1	โมเมนต์ (Kgf/m ²)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	-1394.63	-1442.64	-3.33
คาน B2	-2651.07	-2598.35	2.03
คาน B3	-3741.51	-3687.19	1.47
คาน B4	-4635.41	-4647.98	-0.27
คาน B5	-767.64	-731.62	4.92

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 2

บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 2	แรงเฉือน (Kgf)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	119.36	125.14	4.84
คาน B2	-839.59	-876.15	4.35
คาน B3	763.51	801.46	4.97
คาน B4	1093.73	1124.97	2.86
คาน B5	-1006.38	-1051.65	4.50
บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 2	โมเมนต์ (Kgf/m ²)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	272.68	265.45	2.72
คาน B2	-728.93	697.26	4.54
คาน B3	-952.57	-914.64	4.15
คาน B4	1274.63	1215.48	4.87
คาน B5	505.63	529.37	4.70

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 3

บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 3	แรงเฉือน (Kgf)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	-2869.20	-2753.36	4.21
คาน B2	-1216.72	-1267.58	-4.01
คาน B3	363.85	354.36	-2.61
คาน B4	300.1	288.68	-3.81
คาน B5	505.63	529.37	4.70
บ้านพัก อาศัยหลัง ที่ 3	โมเมนต์ (Kgf/m ²)		
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ	ผลต่าง (%)
คาน B1	-594.55	-623.47	-4.64
คาน B2	1061.34	1115.94	-4.89
คาน B3	600.62	579.61	3.62
คาน B4	523.01	498.32	4.95
คาน B5	666.91	698.19	-4.48

ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงเฉือนและโมเมนต์ระหว่างสองกระบวนการอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรม

4.2 วิเคราะห์ระยะเวลากระบวนการทำงาน

ผลการเก็บข้อมูลแสดงให้เห็นว่า การใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศ (BIM) ช่วยลดระยะเวลาในการทำงานลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับกระบวนการแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะในขั้นตอนการสร้างแบบ

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบระยะเวลากระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 1

บ้านพักอาศัยหลังที่ 1	ระยะเวลาทำงาน (วัน)	
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ
1. ระยะเวลาในการคำนวณแรงปฏิกิริยา	1.00	-
2. ระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้าง	2.00	1.00
3. ระยะเวลาในการคำนวณรายการออกแบบ	1.00	-
4. ระยะเวลาในการเขียนแบบ	3.00	2.00
5. ระยะเวลาในการถอดปริมาณ	-	1.00
6. ระยะเวลาในการปรับปรุงและแก้ไขแบบ	-	1.00
รวม	7.00	5.00



ตารางที่ 8 เปรียบเทียบระยะเวลากระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 2

บ้านพักอาศัยหลังที่ 2	ระยะเวลาทำงาน (วัน)	
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ
1. ระยะเวลาในการคำนวณแรงปฏิกิริยา	1.00	-
2. ระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้าง	2.00	1.00
3. ระยะเวลาในการคำนวณรายการออกแบบ	1.00	-
4. ระยะเวลาในการการเขียนแบบ	3.00	2.00
5. ระยะเวลาในการการถอดปริมาณ	-	1.00
6 ระยะเวลาในการปรับปรุงและแก้ไขแบบ	-	1.00
ระยะเวลารวม	7.00	5.00

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบระยะเวลากระบวนการทำงานบ้านหลังที่ 3

บ้านพักอาศัยหลังที่ 3	ระยะเวลาทำงาน (วัน)	
	กระบวนการเดิม	กระบวนการสารสนเทศ
1. ระยะเวลาในการคำนวณแรงปฏิกิริยา	1.00	-
2. ระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้าง	2.00	2.00
3. ระยะเวลาในการคำนวณรายการออกแบบ	2.00	-
4. ระยะเวลาในการการเขียนแบบ	3.00	2.00
5. ระยะเวลาในการการถอดปริมาณ	-	1.00
6 ระยะเวลาในการปรับปรุงและแก้ไขแบบ	-	1.00
ระยะเวลารวม	8.00	6.00

กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศ ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการเดิมเฉลี่ย 20-30% เนื่องจากสามารถทำงานแบบบูรณาการในระบบเดียวลดขั้นตอนการถ่ายโอนข้อมูลและลดความซ้ำซ้อนของงานเอกสาร

4.3 วิเคราะห์ต้นทุนกระบวนการทำงาน

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมราคาวิศวกรและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมโครงสร้าง [6] [7]

ตารางที่ 10 ราคาวิศวกรออกแบบและซอฟต์แวร์

ค่าออกแบบหรือซอฟต์แวร์	ราคา(บาท)	อายุการใช้งาน (ปี)	ราคาต่อปี(บาท)	ราคาต่อวัน(บาท)
วิศวกร	500	-	-	500
AutoCAD	46,500	1	46,500	128
Revit	40,812	1	40,812	112
Robot	40,812	1	40,812	112
ETABS	237,168	5	47,434	130
ฮาร์ดแวร์	17,730	3	5910	16

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 1

ต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 1	การออกแบบกระบวนการเดิม (บาท)	กระบวนการทำงานแบบจำลองสารสนเทศ (บาท)	ผลต่าง
1.ค่าแรง	3500.00	2500.00	1000.00
2.ซอฟต์แวร์	642.13	559.08	83.06
3.ฮาร์ดแวร์	113.34	80.96	32.38
รวม	4255.47	3140.04	1115.44

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 2

ต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 2	การออกแบบกระบวนการเดิม (บาท)	กระบวนการทำงานแบบจำลองสารสนเทศ (บาท)	ผลต่าง
1.ค่าแรง	3500.00	2500.00	1000.00
2.ซอฟต์แวร์	642.13	559.08	83.06
3.ฮาร์ดแวร์	113.34	80.96	32.38
รวม	4255.47	3140.04	1115.44

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 3

ต้นทุนบ้านพักอาศัยหลังที่ 3	การออกแบบกระบวนการเดิม (บาท)	กระบวนการทำงานแบบจำลองสารสนเทศ (บาท)	ผลต่าง
1.ค่าแรง	4000.00	3000.00	1000.00
2.ซอฟต์แวร์	642.13	670.89	-28.76
3.ฮาร์ดแวร์	129.53	97.15	32.38
รวม	4771.67	3768.04	1003.62

ต้นทุนรวมของกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศ ต่ำกว่ากระบวนการเดิมเฉลี่ยประมาณ 1,000 บาทต่อโครงการ เนื่องจากลดเวลาทำงานและการแก้ไขแบบซ้ำ

ตารางที่ 14 ค่าเสื่อมของฮาร์ดแวร์ 20 % ต่อตัวหลังจากการขายฮาร์ดแวร์

อุปกรณ์	ราคา(บาท)	ค่าเสื่อม 20 % (บาท)	ราคาขาย (บาท)
CPU (ซีพียู)	3690.00	738.00	2952.00
MAINBOARD (เมนบอร์ด)	2190.00	438.00	1752.00
VGA(การ์ดจอ)	4790.00	958.00	3832.00
RAM (แรม)	1590.00	318.00	1272.00
M.2 (เอสเอสดี)	770.00	154.00	616.00
PSU (อุปกรณ์จ่ายไฟ)	1390.00	278.00	1112.00
CASE (เคส)	1090.00	218.00	872.00
MOUSE (เมาส์)	220.00	44.00	176.00
KEYBOARD (คีย์บอร์ด)	250.00	50.00	200.00
MONITOR (จอมอนิเตอร์)	1750.00	350.00	1400.00
รวม	17730.00	3546.00	14184.00

4.4 ข้อจำกัดของซอฟต์แวร์

- ถ้าใส่ข้อมูลที่ผิดหรือเขียนรูปแบบสูตรผิดในซอฟต์แวร์ Microsoft Excel จะทำให้ข้อมูลผิดทั้งหมด
- ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ในการประมวลผลสูงของซอฟต์แวร์ CSI Etabs
- ซอฟต์แวร์ Autodesk Robot มีปัญหาการเชื่อมโยงข้อมูลไปยังซอฟต์แวร์ Autodesk Revit อาจมีปัญหาในการเชื่อมโยงข้อมูลผิดพลาดใช้ฮาร์ดแวร์สูงในการประมวลผล
- Autodesk Revit เมื่อเชื่อมโยงข้อมูลมาจากซอฟต์แวร์ Autodesk Robot ชื่อรายการวัสดุใหม่อีกครั้ง ก่อนถอดปริมาณ

5. สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการออกแบบบ้านพักอาศัย ค.ส.ล. 3 หลัง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานแบบดั้งเดิมกับกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าและความเป็นไปได้ในการปรับใช้ซอฟต์แวร์กับธุรกิจขนาดเล็ก จากการเก็บรวบรวมข้อมูลพบว่า

สามารถนำเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เข้ามาช่วยในกระบวนการออกแบบได้จริงทำให้เห็นภาพรวมของงานชัดเจนขึ้น ลดความซ้ำซ้อนของแบบ และลดข้อผิดพลาดในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านแรงเหวี่ยง โมเมนต์ ระยะเวลา และต้นทุนพบว่า การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารใช้เวลาในการทำงานน้อยลงประมาณ

20-30% และผลลัพธ์ของแรงเหวี่ยง-โมเมนต์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 1-5% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรม

การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารช่วยออกแบบมีต้นทุนถูกกว่าเล็กน้อยและช่วยลดระยะเวลา เพิ่มความถูกต้อง และทำให้งานมีคุณภาพมากขึ้นจึงถือว่ามีความคุ้มค่าและเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผู้ที่สนใจศึกษาวิจัยนี้ต้องมีความรู้พื้นฐานความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรมระดับหนึ่ง
2. ควรมีการจัดอบรมการใช้ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มทักษะและความชำนาญในการประยุกต์ใช้กับงานจริง
3. ควรมีการจัดทำคู่มือแนวทางปฏิบัติ เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการเรียนรู้ และเพิ่มโอกาสในการนำเทคโนโลยี BIM ไปใช้ในวงกว้าง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ฤทธิ์หยุด ก้อนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิจัย และทุนการวิจัยที่ได้รับจากทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำวิจัยในครั้งนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และติดตามความก้าวหน้า ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ จนงานวิจัยฉบับนี้เสร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] นายปรเมศวร์ พลรัฐธนาสิทธิ์ (2556) การศึกษาเปรียบเทียบการเขียนแบบโดยเทคโนโลยีคือ CAD และ BIM ในงานก่อสร้าง.
- [2] อภิชาติ บัวกล้าและคณะ (2565) การศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่ สามในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักแพทย์ ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุ จังหวัดเชียงราย.
- [3] Oliver C. Waka และคณะ (2561) Behavior Analysis of a Medium High-Rise Building, Using ETABS.
- [4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาโรจน์ คำรงค์ (2559) การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน REINFORCED CONCRETE DESIGN (Working Stress Design : WSD).
- [5] กระทรวงมหาดไทย (2566) กฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. ๒๕๖๖.
- [6] Computers and Structures, Inc. (2568) CSI PRODUCT PRICING.
- [7] Autodesk Inc. (2568) Autodesk AutoCAD: Design and drafting software trusted by millions.