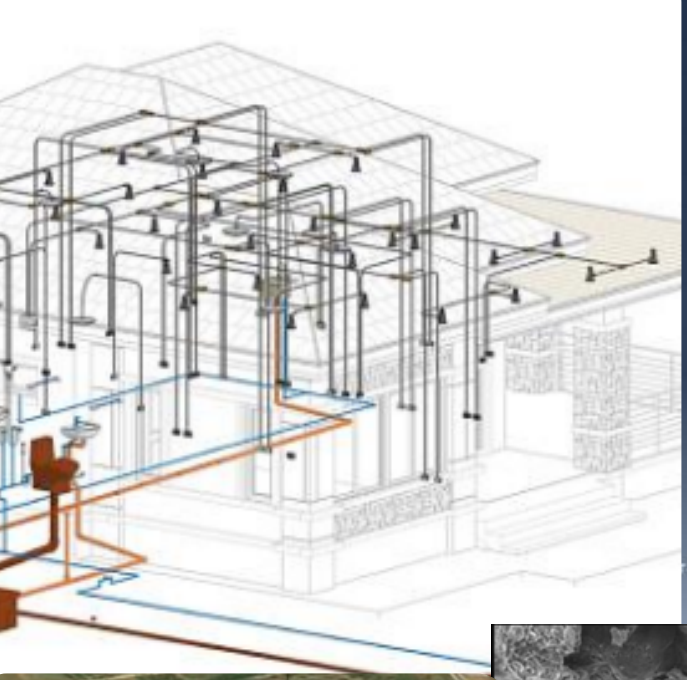
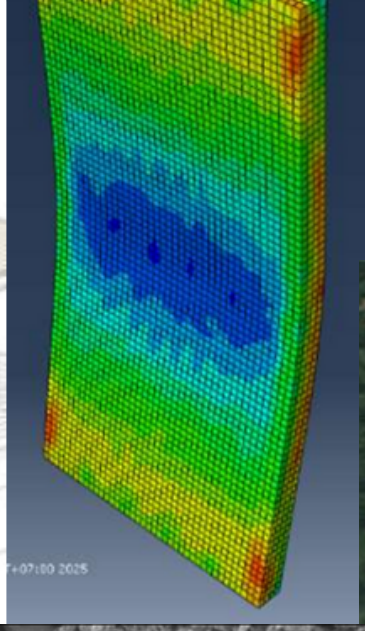
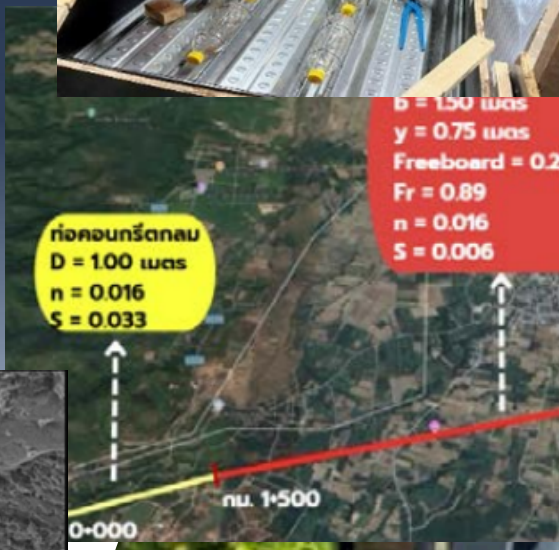
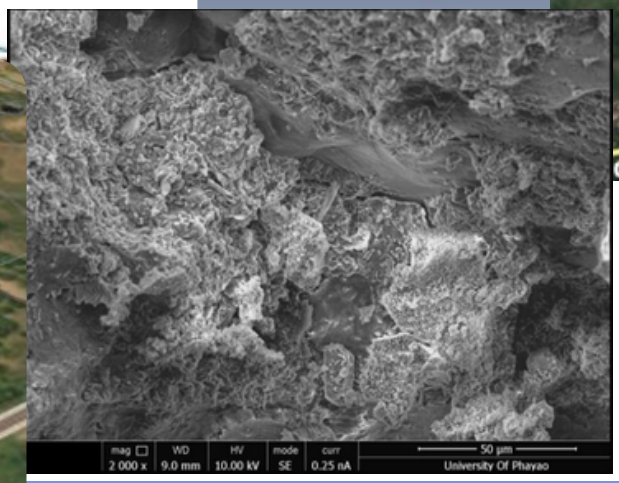
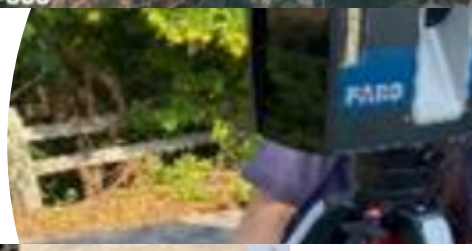
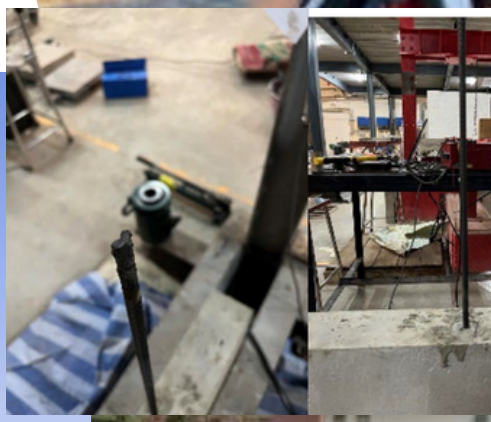
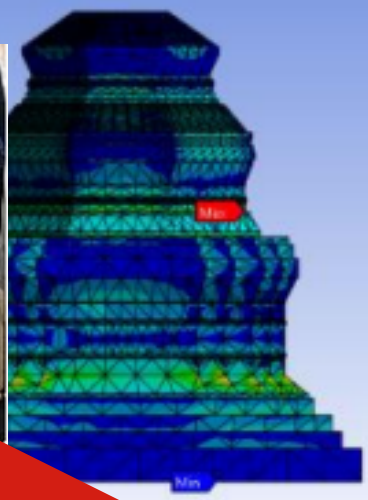








โครงงานทางวิศวกรรมโยธา
รวมบทความประจำปีการศึกษา พ.ศ. 2567

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
SCHOOL OF ENGINEERING UNVERSITY OF PHAYAO

โครงงานทางวิศวกรรมโยธา ประจำปีการศึกษา 2567

วิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering : STR)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงกันระเบิดที่ถูกเสริมด้วยแผงดูดซับแรงระเบิด ก้องภพ สุขสานติ์, วีรภัทร สีทำมา, ธณัฐชา ศรีวิบูลย์, ธรรศธนพล จงศรีวัฒนพร	รศ.ดร.สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน
พฤติกรรมการรับแรงดัดของแผ่นพื้นคอนกรีตบนพื้นเหล็กสำเร็จรูปที่มีช่องกลวงโดยใช้ขวดพลาสติกและใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล อนุชา ยศเกตุ, สุทธิพงษ์ สว่างพงษ์, ณัฐชา กันชาติ, สุชานาถ ดวงทับ	รศ.ดร.สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน
การสั่นไหวของอาคารที่มีโครงสร้างค้ำยันเพื่อสลับความถี่ธรรมชาติ ณรงค์ โยธา, ธนกฤต วงศ์ดี, ธนทัต ศรีสงค์ใจ, พีระพัฒน์ ปลอดโปร่ง	รศ.ดร.สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน
การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กเส้น GFRP วรพงศ์ หน่อแก้ว, แสงหล้า มีนา, อนันต์ ชมชอบไพรพณา, สุทิวัส สืบชมภู	รศ.ดร.สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน
การศึกษาพฤติกรรมการเลื่อนไถลของเหล็กเดือยฝันในท่อลอนลูกฟูก จีรโชค มะโนวงศ์, ณัฐพนธ์ วิชาเร็ว, กุลพัชร จันทร์งาน, ภาณุวัฒน์ ไชยวรรณ	รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน
พฤติกรรมต้านแรงดัดของเสาเข็มเสริมเศษลวดอัดแรง ณัฐพล จันทอง, ธนัญภัทร ศรีสวัสดิ์, สุนิษา หอมพรหมมา, ทัตพงศ์ วงค์หาร	รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเจดีย์โบราณสถานเวียงลอ นุชนารถ จับกลอง, รจนา หัตถะมา, ณัฐรินีย์ สิงห์คีะ	รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน
กำลังการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมกำลังของด้วยพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว สุทธิพงศ์ กิจพิทักษ์, หล่อพัง เชอมือ, จิรวรรณ เรียนภาร, วรรณิกา พรมนิมิตร	ดร.ธีรพจน์ ศุภวิริยะกิจ
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยใช้ฉนวนกันความร้อนที่แตกต่างกัน เจตนิพัทธ์ กิจงาม, เจษฎาภรณ์ ใจแก้ว, นครินทร์ ชัยวงศ์สิริ, แพงเพชร แสนโซ้ง	ดร.ธีรพจน์ ศุภวิริยะกิจ

วิศวกรรมแหล่งน้ำ (Water Resource Engineering : WRE)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสำหรับการออกแบบระบบระบายน้ำ **ภัทรกร พึ่งตนเอง, ธนชล ยศแสง, วรเมธ แก้วพลตรัง**	ดร.อนุจิตร ภูมิพันธ์
การจัดการน้ำเสียจากพื้นที่ชุมชนรอบกว๊านพะเยา ฐานัส แก้วเทพ, ธนัชพร อินโต, น้ำทิพย์ คุ้มไพรฑูรย์, มูฮัมมัดนัศรูน เจ๊ะดือเร๊ะ	ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์
การวิเคราะห์สมดุลน้ำเพื่อการบริหารจัดการน้ำ : กรณีศึกษาพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา ณัฐวัตร หนูขาว, ปาวีณา โพธิ์วัด, สุรสิทธิ์ กุลชนก, นันทพงศ์ กาพย์ไชย	ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์
การออกแบบระบบผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกว๊านพะเยา ภาณุพงษ์ ชาวส้าน, ปฐมพร ขานนาม, จันทิมา เรืองวิเชียร, วาสนา ญาณะรพิเชฐ	ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์

วิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering : GTE)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของส่วนผสมหินโรยทางรถไฟและเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการงานโดยเครื่องมือ Los Angeles Abrasion test และภาพถ่ายแบบ 3 มิติ เจษฎา สีตะวัน, ภาวิณี ธรรมอักษร, จิรภัทร ปัญญาวิชา	รศ.ดร.สุริยาวุธ ประอ้าย
สมบัติของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง กนกอร สาหินกอง, นันภัสส์ พิศาลคุณาวัฒน์, ฟ้ารุ่ง วงศ์เทพ, สุวรรณษา สุธาพจน์	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
สมบัติของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน นวพล บุญสุขนิกร, วุฒิไกร จันทร์พรม, นภสร แบนเพชร, อลงกต ธิน้อมธรรม	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง อมรรัตน์ ขุนทะวาด, ณัฐกฤตา พาพันธ์, พรไพลิน ดีเทียน	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
พฤติกรรมด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ ก้องภพ คำน้อย, ณัฏฐณิชา แก้วทอง, โสภิตา เสือเมือง	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์
การปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน เปรมยุดา ศิริสาร, นรีนุช แก่นใจ, สุภกิณห์ แก่นนาค ศฤงคาร นาคสินธุ์	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์

พฤติกรรมแรงดัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด **ณัฐกรณ์ ทิพย์โพธิ์, นันทวัฒน์ ธิชาญ, เปเฟอร์ สาวิวิทธิ์, ธราดล ดวงแก้ว**	รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์

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

- ไม่มี -

วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (Construction Material Engineering : MAT)

ชื่อเรื่อง	**อาจารย์ที่ปรึกษา**
การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน ชยพัทธ์ วงศ์แก้ว, ชลสิทธิ์ พูลสมบัติ, ณัฐธัญ มะลิกร, คมสันต์ ทัดแก้ว	รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง
การศึกษากำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน ชนัญญ นันตา, ณัฐนนท์ นาปรัง, สุกฤษฎิ์ กรีอินทอง, อัญชิสา ก้อนนาค	รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง
การศึกศากำลังดัดของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน พงศกร คุณโน, โอชิษฐ์ ยาวิไชย, ชานนท์ ซื่อใส, สรัญญา นิลมณี	รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง
การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถาถ่านหินในสภาวะอายุเริ่มต้น นันทนากร เมืองวงค์, ปฏิวัติ พินิจ, วันวิสา จันโสดา	ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้ากันเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน **จิณณวัตร พิษเมืองพรหม, ธนกร อุทธโยธา, วรายุส ผิวขำ**	ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ
การศึกษาความแตกต่างของการหดตัวแห้งระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและสูงภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่าง ธนกร เต็มตันนา, ณัฐวีร์ คุณเมือง, ฉัตรมงคล มณีวรรณ์	ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้ากันเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน ณัฐธิดา วงค์คม, ศศิธร ศรีวิเศษ, อัษฎา แซ่มศิริ	ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ

วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Survey and Geographic Information System Engineering : SGI)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การใช้เทคโนโลยีสำรวจป่าไม้เพื่อเก็บข้อมูลคาร์บอนเครดิตปีที่ 1 กรณีศึกษาพื้นที่ศูนย์อนุรักษ์นกยูง มหาวิทยาลัยพะเยา ชัยธวัช เครือวัลย์, กฤตภาส ชาลีกันหา, อารียา จาปัญญะ, ศิริพร มาเยอะ	ผศ.ดร.อภิชาต บัวกล้า
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสำรวจ เพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาน กรณีศึกษาวัดหล่ายพัฒนา จังหวัดพะเยา ติณณภพ บุญศาสตร์, ธีรภัทร์ อัครโชคทรัพย์, พรปวีณ์ ชัยแก้ว, พัชราภา อุตุภรณ์	อ.ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง

วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Engineering and Management : CEM)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การศึกษาความเป็นไปได้เมืองสูงวัยสู่มเมืองวัฒนธรรมโลก ปุญญพัฒน์ จงเจริญ, วัชรพล ศรีนรงค์, ณภัทร อุปะละ, อรยา อภิวงศ์	ดร.ธีรพจน์ ศุภวิริยะกิจ
การศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวการลงทุนอสังหาริมทรัพย์แนวราบ กรณีศึกษา พื้นที่จังหวัดพะเยา ปพิชญา แหนคำ, อนุชา สอนใจ	อ.ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง

การประยุกต์ใช้ BIM สำหรับงานวิศวกรรมโยธา (BIM For Civil Engineering : BIM)

ชื่อเรื่อง	อาจารย์ที่ปรึกษา
การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานระบบประปาของธุรกิจก่อสร้างขนาดเล็ก ปิยนันท์ สุธรรม, อรณิชา คชสีห์, ภัทรานิษฐ์ ไหมเหลี่ยม	อ.ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง
การศึกษาความเป็นได้ในการใช้แบบจำลองทางวิศวกรรมโยธาเพื่อใช้ในงานก่อสร้างฝายชะลอน้ำกรมชลประทาน วัชรากร ข่ายสุวรรณ์, วิราชินี สมงอน, ศุมารินทร์ อินทนนท์	ผศ.ดร.อภิชาต บัวกล้า
การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคาร กรณีศึกษา อาคารเรียน 4 ชั้น กฤษณพัฒน์ รัฐวัช, ธิเบต เดชบุญมี, กิตติศักดิ์ พูลเพิ่ม, ธีรภัทร์ มูลละออ	ผศ.ดร.อภิชาต บัวกล้า

กำลังการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมกำลังของด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

Compressive strength of reinforced concrete columns with Glass Fiber Reinforced Polymer

นาย สุทธิพงศ์ กิจพิทักษ์[1] นาย หล่อพัง เชอมือ[2] นางสาวจิรวรรณ เรียนภาร[3] นางสาววรรณิกา พรมนิมิตร[4] และดร.ธีรพจน์ ศุภวิริยะกิจ[5]

[1,2,3,4] นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[5] อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64103891@up.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced polymer, GFRP) โดยรายละเอียดของเสาที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดหน้าตัด 210 มม. ความสูงของเสา 800 มม.และการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced polymer, GFRP) มีการเพิ่มอัตราการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วตั้งแต่ 1 - 4% และกำลังคอนกรีตที่แตกต่างกัน 25, 32, 37, 41 MPa

เพื่อนำค่าการรับกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบความสามารถรับแรงที่มีประสิทธิภาพ จากการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced polymer, GFRP) และการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในรูปแบบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นโดยไม่คำนึงการหักของเส้นใยพอลิเมอร์

จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) แบบ Static พบว่า การเพิ่มกำลังของคอนกรีตสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างได้ เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะทนทานต่อแรงอัดและแรงดึงได้ดีขึ้น โดยการเพิ่มกำลังคอนกรีตในทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ทำให้ความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างดีขึ้นและจากการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มขนาดของเส้นใยโพลิเมอร์ (GFRP) ไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มความสามารถในการรับแรงมากนักต่างจากการเสริมคอนกรีตด้วยเหล็ก (Steel Reinforced Concrete) ซึ่งมีการเพิ่มความสามารถในการรับแรงได้ชัดเจนเมื่อขนาดของเส้นเหล็กเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ GFRP ไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดเส้นใย เพราะการใช้ขนาดเส้นใยที่มีอัตราส่วนการเสริมที่ 1% ก็เพียงพอต่อการรับแรง และช่วยลดต้นทุนพร้อมยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้

Abstract

The objective of this research is to study the compressive strength capacity of concrete columns reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). The details of the columns used in the analysis include a cross-sectional size of 210 mm and a column height of 800 mm. The analysis of concrete columns reinforced with GFRP involved varying the reinforcement ratio of GFRP from 1% to 4%, as well as considering different concrete strengths of 25, 32, 37, and 41 MPa. The compressive strength values obtained were compared to evaluate the effectiveness of GFRP reinforcement and the impact of increasing concrete strength in different forms as mentioned, without considering the failure of the polymer fibers.

From the static finite element analysis (FEA), it was found that increasing concrete strength enhances the structural load-bearing capacity, as high-strength concrete is more resistant to both compressive and tensile forces. The results showed that increasing the concrete strength in both steel-reinforced concrete and GFRP-reinforced concrete produced similar outcomes, improving the load-bearing capacity of the structure. Additionally, the analysis revealed that increasing the size of the GFRP fibers did not significantly impact the ability to bear load, in contrast to steel-reinforced concrete, where increasing the steel bar size clearly increased the load-bearing capacity. Therefore, in designing structures with GFRP, it is unnecessary to increase the fiber size, as using a 1% fiber reinforcement ratio is sufficient for load-bearing capacity. This can help reduce costs while extending the lifespan of the structure.

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อเสียของเหล็กนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับ ความชื้นในอากาศและออกซิเจนนำมาซึ่งการเกิดสนิมเหล็กได้ การเกิดสนิมเหล็กส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลงหมายถึงการสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงที่เกิดขึ้น ปัจจุบันวัสดุทางเลือกที่สามารถ ทดแทนข้อเสียดังกล่าวรู้จักกันในชื่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced polymer, GFRP) สามารถ

ขึ้นรูปให้เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ในชิ้นส่วนโครงสร้างเช่น งานเสา,งานพื้น หรือ งานผนังเป็นต้น GFRP มีน้ำหนักที่เบาสามารถรับแรงดึงได้ดี [1] แต่ในขณะเดียวกันสามารถรับแรงอัดได้ต่ำ ชิ้นส่วนโครงสร้างแนวราบอย่างพื้น จึงเหมาะสมกับการเสริมกำลังด้วยวัสดุชนิดนี้ GFRP มีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงสามารถต้านทานการเกิดสนิม และปฏิกิริยาอื่นๆ ได้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น โครงสร้างในน้ำทะเล ที่มีคลอไลด์ไอออนหรือภาวะความเป็นกรดสูง องค์ประกอบของแท่ง GFRP ประกอบด้วยเส้นใยโพลิเมอร์ชนิดต่างๆและถูกห่อหุ้มด้วยเรซินที่ทำหน้าที่ยึดเส้นใยทุกเส้นให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งองค์ประกอบในเส้นใยแต่ละชนิดให้ คุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวิเคราะห์ผลของแรงที่มีผลต่อเสาคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ในอัตราส่วนการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว 1 – 4% ที่กำลังรับแรงอัด 25, 32, 37 และ 41 MPa โดยผลลัพธ์จากการศึกษานำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเสาสั้น เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อเสาคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ปัจจัยที่ผลต่อการรับแรงของเสาคอนกรีต เมื่อมีระยะการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิน 200 มม.จะเกิดการวิบัติ ทำให้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีกำลังการรับแรงอัดที่น้อยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Edvard P.G. Bruun [5].

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์การรับกำลังอัดของเสาคอนกรีตแบบเสริมเหล็กและเสริมด้วย GFRP

1.2.2 เปรียบเทียบการรับกำลังอัดของเสาจากการเพิ่มกำลังคอนกรีตและเหล็กขนาดที่แตกต่างกัน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบการรับกำลังอัดของเสาเสริมด้วย GFRP แต่ละ reinforcement ratio เปอร์เซ็นต์ต่อขนาดของเสา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1.ศึกษาการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ขนาดหน้าตัด 210 มม. ความสูง 800 มม. ที่กำลังของคอนกรีตต่างกันโดยมีอัตราการเสริม 1 เปอร์เซ็นต์

1.3.2. ศึกษาการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก,พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ขนาดหน้าตัด 210 มม. ความสูง 800 มม. ที่กำลังคอนกรีตต่างกันและอัตราการเสริมวัสดุต่างกัน

1.3.3.งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของเสาสี่เหลี่ยมขนาดสั้นเท่านั้น อาจไม่สามารถนำผลไปใช้กับเสาที่มีขนาดยาว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. เพื่อเพิ่มความเข้าใจพฤติกรรมของเสาคอนกรีตภายใต้แรงอัดทั้งกรณีที่เสริมด้วยเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP)

1.4.2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรงของคอนกรีตที่เสริมด้วย GFRP ในอัตราส่วนการเสริมที่แตกต่างกัน

1.4.3. สามารถกำหนดสัดส่วนการเสริมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม ช่วยลดการใช้วัสดุเกินความจำเป็น เช่น GFRP โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดเส้นใยเกินความจำเป็นและลดต้นทุนในระยะยาว

1.5 แผนการทำงาน

ขั้นตอน	เดือน							
	6	7	8	9	10	11	12	1
1.ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยและข้อมูลอ้างอิงต่างๆ								
2.ศึกษาการใช้โปรแกรม Abaqus ที่ใช้ในการทดสอบ								
3.ทำการทดสอบโดยโปรแกรม Abaqus								
4.สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ								
5.จัดทำรูปเล่มและนำเสนอรายงานผลการทดสอบ								

2.ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Abaqus

Abaqus เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองและวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น อาคาร เครื่องจักร รถยนต์ และเครื่องบิน โดยใช้หลักการขององค์ประกอบไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Analysis – FEA) เพื่อศึกษาความแข็งแรง การเสียรูป และพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำ โปรแกรมนี้ช่วยให้วิศวกรสามารถทดสอบโครงสร้างได้เสมือนจริง โดยไม่ต้องสร้างต้นแบบจริงเพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาทดลองการใช้งาน Abaqus ต้องอาศัยความรู้ด้านวิศวกรรมและกลศาสตร์โครงสร้างเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ [4]

2.2 แบบจำลองคอนกรีต

Mander et al. (1988) ได้เสนอแบบจำลองความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่ถูกหุ้มโดยเหล็กเสริมด้านข้าง และอยู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกนเดียว รูปแบบการหุ้มที่แตกต่างกัน เช่น เกลียว (spiral), วงกลม (circular), สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular) (ทั้งแบบมีและไม่มีเหล็กเสริมขวาง) สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เหล็กเสริมขวางสามารถสร้างแรงกดล้อมรอบที่เท่ากันหรือไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางได้ สมการความเค้น-ความเครียดสามารถนำเสนอในรูปของสมการเดียว โดยพิจารณาผลกระทบของปัจจัยการหุ้มประเภทต่างๆ ผ่านการกำหนด ความเค้นกดล้อมรอบที่มีประสิทธิภาพ (Effective Lateral Confining Stress) ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของเหล็กเสริมด้านข้างและเหล็กเสริมขวาง ตามสมการดังนี้ [7]

$$f_c = \frac{f'_c xr}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}[1 + 5\left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1\right)] \quad (3)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (4)$$

$$E_c = 4730\sqrt{f'_{co}}\ MPa \quad (5)$$

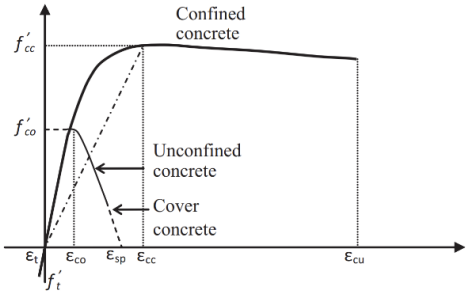
$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (6)$$

f_c= ความเครียดของคอนกรีตตามยาว

f'_{cc}=ความเค้นสูงสุดของคอนกรีต

E_c=โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

E_{sec}=โมดูลัสซีแคนต์ของคอนกรีตที่ถูกกักขัง ณ ความเค้นสูงสุด



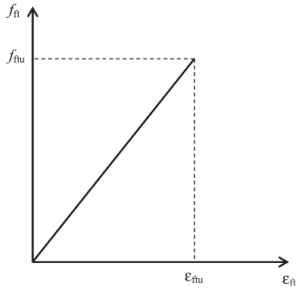
รูปที่ 1 แบบจำลองความเค้น – ความเครียดแบบโมโนโทนิกของคอนกรีต

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการวิเคราะห์

compressive strength (MPa)	25	32	37	41
Elastic young's Modulus (MPa)	23650	26757	28771	30287
Poison ratio	0.2	0.2	0.2	0.2
Strain	0.002	0.002	0.002	0.002

2.3 พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)

เหล็กเสริม GFRP มีลักษณะเปราะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดแตกหักเมื่อรับแรงดึงในการศึกษานี้ การตอบสนองของความเค้นและความเครียดจริงของเหล็กเสริม GFRP ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2 เมื่อรับแรงอัดพฤติกรรมของเหล็กเสริม FRP จะได้รับอิทธิพลจากการวิบัติรวมถึงการวิบัติจากการดึงตามขวาง การโก่งตัวของเส้นใยหรือการวิบัติจากการเฉือน [1] ดังนั้น จึงไม่มีวิธีการทดสอบแรงอัดแนวแกนมาตรฐานสำหรับพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) จำเป็นต้องกำหนดพฤติกรรมของเหล็กเสริม FRP ในแรงอัดเพื่อให้สามารถออกแบบเสาคอนกรีตเสริม FRP ได้มีรายงานว่าความแข็งแรงในการอัดของเหล็กเสริม FRP ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความแข็งแรงในการดึง[5]



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)

คุณสมบัติGFRP	RB10	DB12	DB16	DB20
Density (kton/m^3)	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
Young's modulus (MPa)	40000	40000	40000	40000
Rein 01 Yield Strength (MPa)	980	870	744	716

2.4 เหล็ก (Steel)

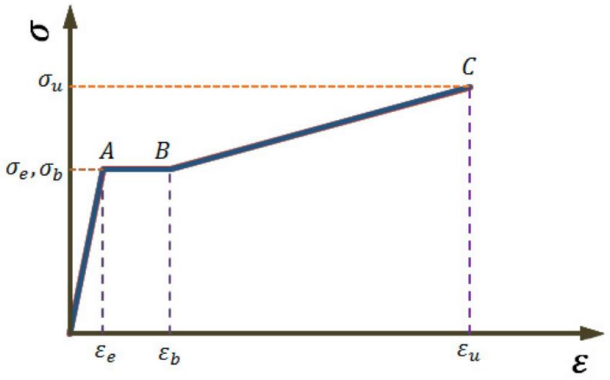
การศึกษานี้ใช้กราฟความเค้น-ความเครียดแบบทวิภาค(bilinear) ซึ่งอธิบายการแข็งตัวของความเครียดในรูปแบบที่เรียบง่าย

$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \quad (7)$$

$$k = \frac{\sigma_e - \sigma_b}{\varepsilon_u - \varepsilon_b} \quad (8)$$

$$\Delta\varepsilon_b = \varepsilon_b - \varepsilon_e \quad (9)$$

โครงสร้างของแรงดึงของเหล็กโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic stage), ช่วงแนวราบของการยอมให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (yielding platform stage) และช่วงการแข็งตัว (hardening stage) รวมถึงช่วงลดลง (descending stage) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ 3 ช่วงแรกของเหล็กเส้นเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองความสัมพันธ์แรงดึงแบบสามเส้นตรง (trilinear tensile constitutive model) ตามที่แสดงในรูปที่. 3 จุดสำคัญ A (ε_e, σ_e), B (ε_b, σ_b) และ C (ε_u, σ_u) คือ จุดเปลี่ยนรูปถาวรของแรงดึง (tensile yield point), จุดสิ้นสุดของช่วงแนวราบ (yielding platform) และจุดสิ้นสุดของช่วงการแข็งตัว (hardening stage) ตามลำดับ จุดเหล่านี้สามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์ทางโครงสร้างของเหล็กเส้นที่ไม่ผุกร่อน (uncorroded steel bar) โดยที่ ε_e, ε_bและ ε_u, คือ ค่าความเครียดในช่วงเกิดการเปลี่ยนรูป (yield strain), ช่วงการแข็งตัว (hardening strain) และช่วงสูงสุด (ultimate strain) ส่วน σ_e, σ_b และ σ_u) คือ ค่าความเค้นที่สอดคล้องกับช่วงเหล่านี้ตามลำดับ[3]



รูปที่ 3 แสดงภาพแผนผังของ แบบจำลองความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตในสภาวะอัด

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเหล็กตามมาตรฐานACI[2]

คุณสมบัติเหล็ก	RB10	DB12	DB16	DB20
Density (kton/m^3)	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
Young's modulus (MPa)	200000	200000	200000	200000
Rein 01 Yield Strength (MPa)	326	540	560	574

3.วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบไฟไนต์อิเลเมนต์

3.1.1 คอนกรีต กำลังอัดประลัยออกแบบตามตารางที่ 1 โดยอ้างอิงจากคุณสมบัติของMander [7]

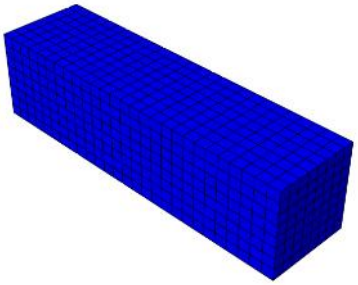
3.1.2 เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง10 มม. ชั้นคุณภาพ SR24 ตามมาตรฐาน ตามมาตรฐานACI[2]

3.1.3 เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง12 มม. ชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน ตามมาตรฐานACI[2]

3.1.4 พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ผิวตามความยาวของเส้นมีลักษณะเป็นบั้งหรือปล้องหรือครีบเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง10 มม. และ 12 มม.

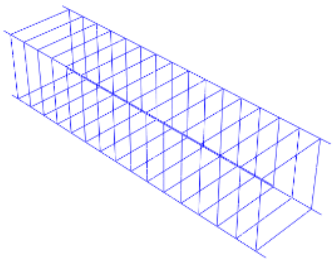
3.2 ออกแบบจำลองเสาคอนกรีต

ขนาดหน้าตัด 210 x 210 มม. ความสูง 800 มม.โดยกำหนดระยะอัดที่ 6 มม.ดังแสดงในตารางที่ 1



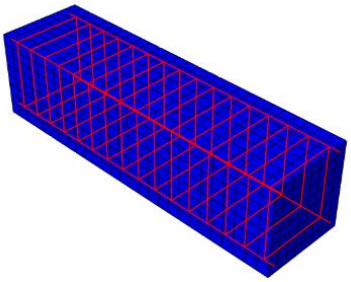
รูปที่ 4 แบบจำลองของคอนกรีต

3.3 ออกแบบจำลองเหล็กและพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP) ดังแสดงในตารางที่ 2, 3

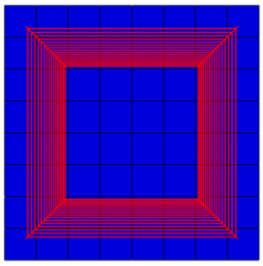


รูปที่ 5 แบบจำลองเหล็กและพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP)

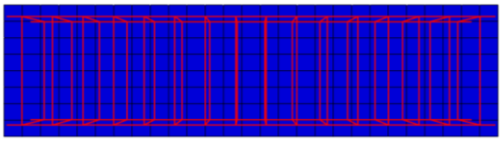
3.4 ทำการรวมแบบจำลองคอนกรีตและแบบจำลองเหล็ก, พอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ระยะการหุ้มคอนกรีต17.5 มม. ตามรูปที่ 4,5



(a)

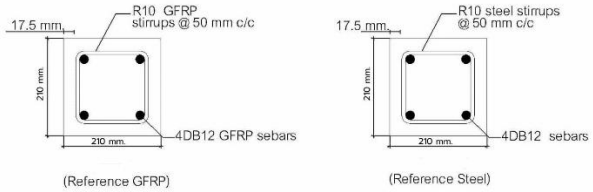


(b)



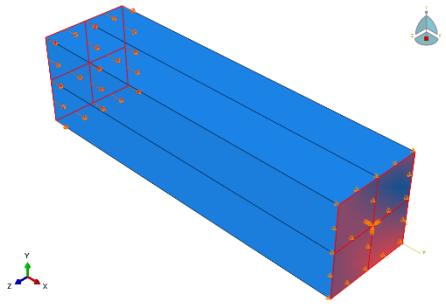
(c)

รูปที่ 6 แบบจำลองคอนกรีตและวัสดุเสริม(เหล็ก,พอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP)) ;(a),(b),(c)



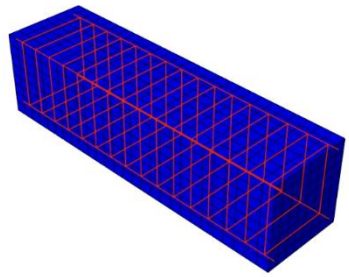
รูปที่ 7 แปลนแบบจำลองรายละเอียดการเสริมเหล็ก

3.5 ออกแบบจำลองการโหลดระยะการหดตัว (Displacement) ของแบบจำลองคอนกรีตที่ระยะการหดตัว 6 มม.เพื่อหาแรงที่ได้จากการอัดแบบจำลอง

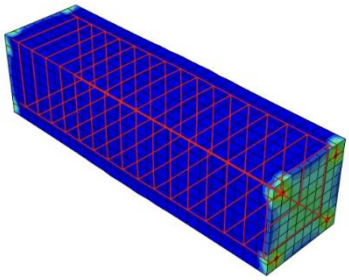


รูปที่ 8 แบบจำลองทิศทางแรงอัด

3.6 ทำการวิเคราะห์กำลังอัดคอนกรีตแบบไฟไนต์อิเลเมนต์ 3มิติ และเก็บข้อมูลแรงที่ได้จากการอัดแต่ละอัดตราการเสริมเหล็ก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) กำลังรับแรงอัดที่ต่างกัน



(a)



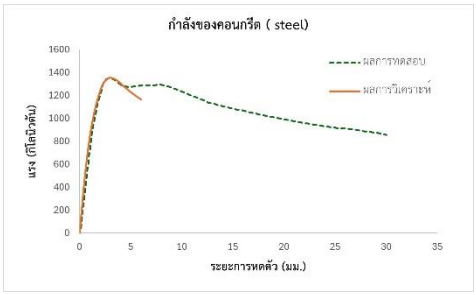
(b)

รูปที่ 9 เปรียบเทียบแบบจำลองก่อนอัด (a) และหลังอัด (b) ของเสาคอนกรีต

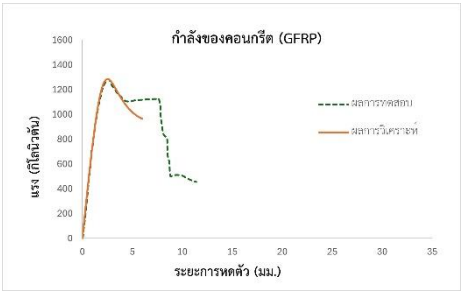
4. ผลวิเคราะห์ และอภิปรายผล

4.1.ผลการวิเคราะห์

4.1.1 เปรียบเทียบแรงสูงสุด (Maximum Load) ระหว่างการทดสอบจริงของ Jim Youssef, Muhammad N.S. Hadi [8] กับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์แรง (Force) กับระยะการหดตัว (Displacement) -ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว



(a)

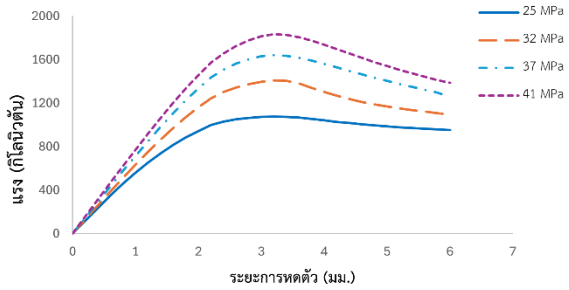


(b)

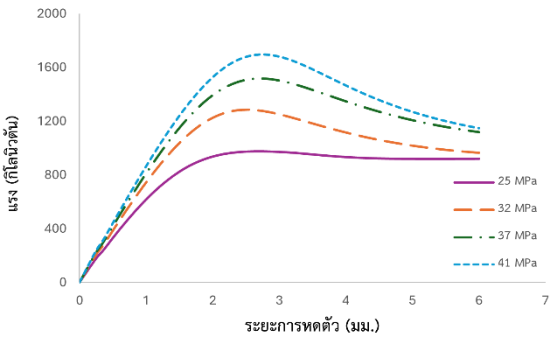
รูปที่ 10 .กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโหลด(Load) กับระยะการหดตัว (Displacement)ของการทดสอบจริงเทียบกับแบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) : (a) กลุ่มเหล็ก , (b) กลุ่ม GFRP

กราฟแสดงความสัมพันธ์โหลด(Load) กับระยะการหดตัว (Displacement) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, พอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) การทดสอบและการวิเคราะห์พบว่าโหลดและระยะการหดตัวที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง โดยเฉพาะในเรื่องของกำลังรับแรงสูงสุดและระยะการหดตัว ที่แสดงถึงลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันของวัสดุทั้งสองประเภท (โดยศึกษาเฉพาะกำลังรับแรงสูงสุดและระยะการหดตัวของคอนกรีตเสริมเหล็ก, พอลิเมอร์เสริมใยแก้ว)

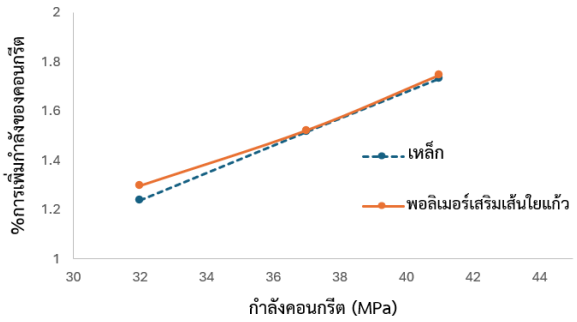
4.1.2. การวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก,พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่กำลังคอนกรีตต่างกัน อัตราส่วนการเสริม 1 %



(a)



(b)

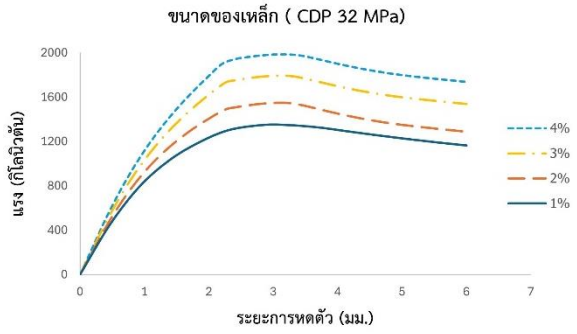


(c)

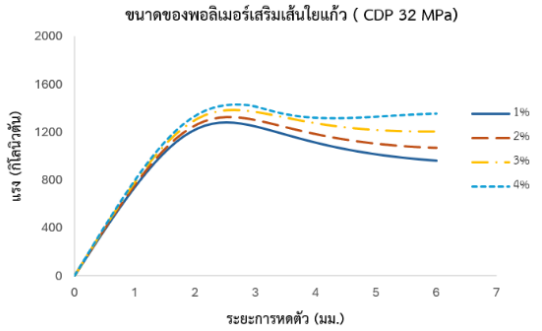
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโหลด(Load) กับระยะการหดตัว (Displacement) ของคอนกรีตที่อัตราส่วนการเสริมเหล็กและพอลิเมอร์ เสริมใยแก้ว (GFRP) ที่1 % : (a) กลุ่มเหล็ก , (b) กลุ่มGFRP ,(c) ผลเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังคอนกรีต

จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) พบว่า การเพิ่มกำลังคอนกรีตทำให้ความสามารถรับแรงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะทนทานต่อแรงอัดและแรงดึงได้ดีขึ้น โดยผลการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) จะช่วยจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างในสภาวะต่างๆ จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มกำลังคอนกรีตระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(GFRP) ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 11.

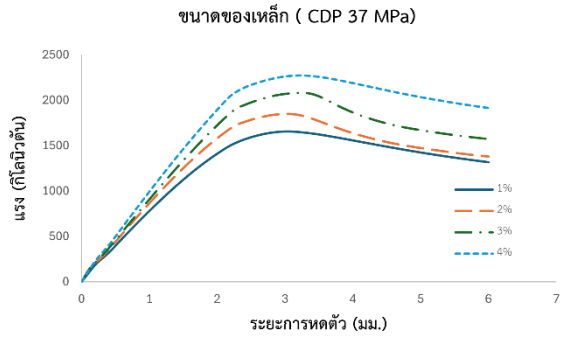
4.1.3 การวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่อัตราส่วนการเสริมเหล็ก 1%, 2% , 3% และ4% ที่กำลังคอนกรีต 32 , 37 และ 41 MPa



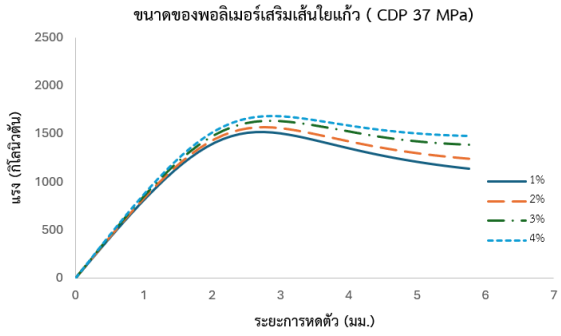
(a)



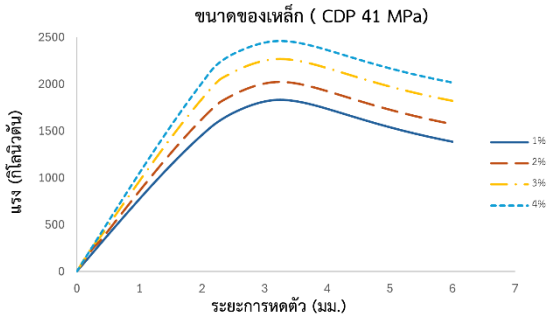
(b)



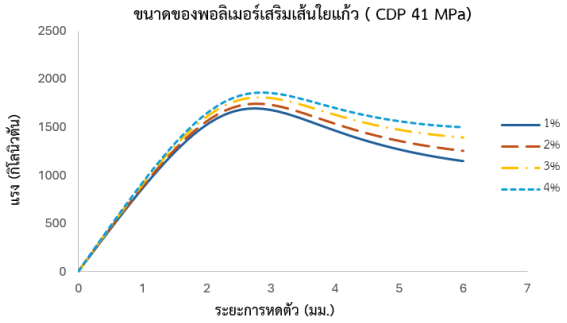
(C)



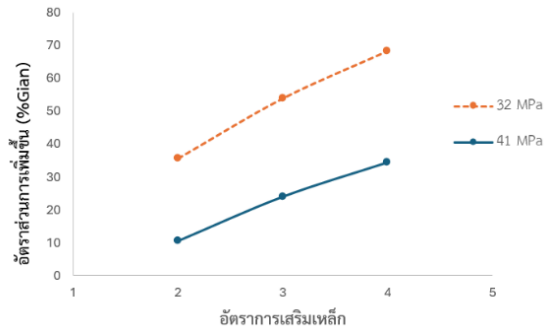
(d)



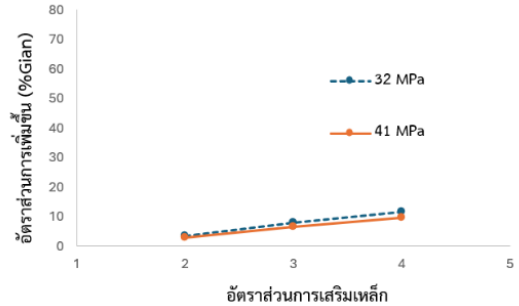
(e)



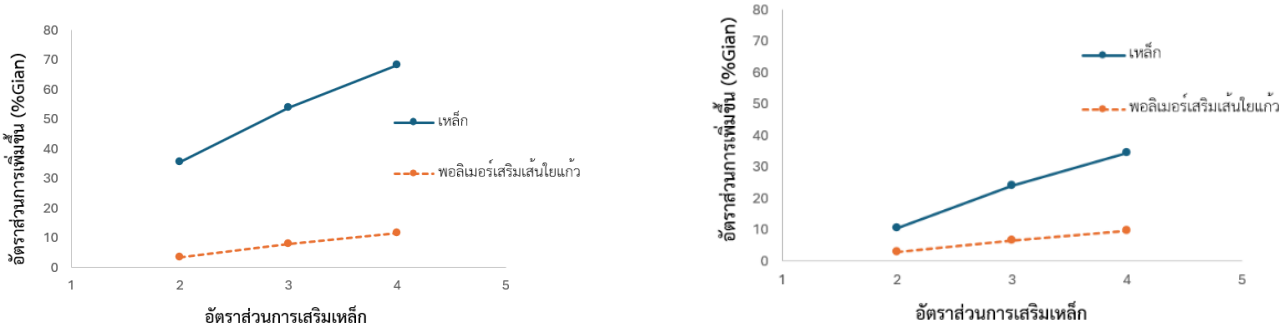
(f)



(g)



(h)



(i) (j)

รูปที่ 12 กราฟผลวิเคราะห์ไฟต์ไนต์อิเลเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก,พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่กำลังคอนกรีตต่างกันและอัตราส่วนการเสริมเหล็ก, พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ; (a) SteelCDP32, (b) GFRPCDP32, (c) SteelCDP37, (d) GFRPCDP37, (e) SteelCDP41, (f) GFRPCDP41, (g) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น (%Gian) ของเหล็ก, (h) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น (%Gian) ของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, (i) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น (%Gian) ของเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) CDP32, (j) กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น (%Gian) ของเหล็กและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) CDP41

ตารางที่ 4. ผลการทดสอบการรับโหลดที่กำลังคอนกรีตและอัตราส่วนเหล็กต่างกัน (Steel)

กำลังคอนกรีต (MPa)	อัตราส่วนการเสริมเหล็ก (%)	Maximum load (kN)	Axial displacement (mm)	% Gain
32	1	1349	3.00	0
	2	1545	3.10	35.60
	3	1792	3.14	53.88
	4	1985	3.20	68.28
37	1	1654	3.10	0
	2	1846	3.13	11.61
	3	2068	3.18	24.98
	4	2271	3.20	37.24
41	1	1832	3.20	0
	2	2024	3.24	10.47
	3	2271	3.25	23.94
	4	2462	3.26	34.39

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการรับโหลดที่กำลังคอนกรีตและอัตราส่วนเหล็กต่างกัน (GFRP)

กำลังคอนกรีต (MPa)	อัตราส่วนการเสริมGFRP (%)	Maximum load (kN)	Axial displacement (mm)	% Gain
32	1	1284	2.58	0
	2	1328	2.60	3.46
	3	1388	2.64	8.09
	4	1435	2.66	11.73
37	1	1516	2.76	0
	2	1565	2.79	3.22
	3	1629	2.83	7.48
	4	1678	2.88	10.72
41	1	1698	2.77	0
	2	1744	2.79	2.87
	3	1807	2.85	6.57
	4	1858	2.88	9.59

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และ ระยะการหดตัว สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน (CDP 32 MPa, CDP 37 MPa และCDP 41 MPa) โดยพิจารณาผลกระทบของปริมาณเหล็กเสริม ที่แตกต่างกัน (1%,2%,3% และ4%) จะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นจาก1- 4% กราฟจะแสดงค่าการรับน้ำหนักสูงสุด ทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ดังรูปที่ 12; (a), (c), (e), (g). และผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) การเพิ่มขึ้นของแรงที่รับได้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีตที่เสริมเหล็ก (Steel Reinforced Concrete) โดยทั่วไป แล้วการรับน้ำหนักของคอนกรีตที่เสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ไม่แตกต่างจากการเสริมเหล็ก สังเกตได้ว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4 บ่งชี้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว การรับกำลังอัดของวัสดุภายใต้สภาวะกำลังอัดที่ต่างกันนั้นไม่ได้แสดงความแตกต่างที่ชัดเจนในด้านความสามารถในการรับแรง จากรูปที่ 12; (b), (d), (f), (h).

เมื่อนำผลการวิเคราะห์กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่ม(%Gain) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(GFRP) ที่อัตราการเสริม1- 4% สังเกตุได้ว่าอัตราการเสริมเหล็กมีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงที่รับได้มากกว่าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(GFRP) จากรูปที่12; (i), (j).

4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) แบบบStatic การเพิ่มกำลังของคอนกรีตสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างได้ เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีความทนทานต่อแรงอัดและแรงดึงที่ดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) พบว่าการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในทั้งสองประเภทมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน จึงมีความสามารถรับแรงของโครงสร้างได้ดีขึ้น

จากการวิเคราะห์กำลังอัดคอนกรีตเสริมเหล็กและเสริมใยโพลิเมอร์ (GFRP) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) แบบบStatic พบว่าการเพิ่มขนาดของเส้นใยโพลิเมอร์ (GFRP) ในการเสริมคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น ซึ่งต่างจากการเสริมคอนกรีตด้วยเหล็ก (Steel Reinforced Concrete) ที่มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเพิ่มขนาดของเส้นเหล็ก ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP)เนื่องจากประสิทธิภาพในการรับแรงของวัสดุไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามขนาดของเส้นใยที่ใช้ เนื่องจากการใช้ขนาดที่อัตราส่วนการเสริมที่ 1 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลลัพธ์ที่เพียงพอต่อการรับแรงของเสาสั้นซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

5.เอกสารอ้างอิง

[1] ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015.

[2] ACI PRC-439.4-09 Report on Steel Reinforcement - Material Properties and U.S. Availability (Reapproved 2017)

[3] Chaoqun Zeng, Cheng Xiong: The Constitutive Relationship for Corroded Steel Bars: Model and Analysis. 2019

[4] Dassault Systems 2002.” การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต ,”[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/

[5] Edvard P.G. Bruun, GFRP Bars in Structural Design: Determining the Compressive Strength versus Unbraced Length Interaction Curve,2014.

[6] fib Model Code (2010), First complete draf, (125 pages, ISBN 978-2-88394-095-6, March 2010)

[7] J. B. Mander,1 M. J. N. Priestley,2 and R. Park,3 Fellow, ASCE Theoretical Stress-Strain model for confined concrete., 1988. 9

[8] Jim Youssef, Muhammad N.S. Hadi Axial load-bending moment diagrams of GFRP reinforced columns and GFRP encased square columns, 2016.

[9] Mufti, A. A., Banthia, N., Benmokrane, B., Boulfiza, M., and Newhook, J. P. (2007). Durability of GFRP composite rods. Concrete international, 29(2), pp.37-42.

[10.] Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., and Nanni, A. (2017). Precast concrete tunnel segments with GFRP reinforcement. Journal of Composites for Construction, 21(5), 04017020

[11] T. Kachlakev, D. I.; Miller, “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates,” Oregon Department of Transportation Research Group & Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, p. 113, 2001.

[12] กำลังรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยแก้วภายหลังสภาวะเพลิงไหม้ Flexural Strength of GFRP-Reinforced Concrete Slab after Fire Exposure ศุภวิชญ์ ไทรวิมาน* ชนะชัย ทองโฉม และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยใช้ฉนวนกันความร้อนที่แตกต่างกัน

Influence of temperature on reinforced concrete beams strengthening with Carbon Fiber Reinforced Polymer using different insulations.

เจตนิพัทธ์ กิจงาม[1] เจษฎาภรณ์ ใจแก้ว[2] นครินทร์ ชัยวงศ์สิริ[3] แพงเพชร แสนโซ้ง[4] และธีรพจน์ ศุภวิริยะกิจ[5]
1,2,3,4 นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
5 อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
* E-mail address: 64103633@up.ac.th,64103037@up.ac.th,64101721@up.ac.th,64102014@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยใช้ฉนวนกันความร้อนที่แตกต่างกัน โดยศึกษาผ่านการรับกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งมีการเพิ่มฉนวนกันความร้อนเพื่อช่วยลดการเกิดผลกระทบจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ด้วยการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) ขนาด 450 x 200 มม. มีความยาว 4000 มม. และเสริมเหล็กเสริมด้านล่างขนาด 12 มม. เหล็กเสริมด้านบนและเหล็กปลอกขนาด 8 มม. ระยะจัดเรียงของเหล็กปลอกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ช่วงรองรับมีระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 100 มม. ช่วงกลางคานมีระยะจัดเรียงของเหล็กปลอกเท่ากับ 250 มม. ทั้งหมด 21 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกไม่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนจำนวน 1 ตัวอย่าง กลุ่มถัดมามีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนโพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam, PU foam) ความหนาแตกต่างกันจำนวน 3 ตัวอย่าง และกลุ่มสุดท้ายมีการติดตังฉนวนกันความร้อนแผ่นยิปซัม (Gypsum board) ความหนาแตกต่างกันจำนวน 3 ตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดจะได้รับการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 3 ระดับที่กำหนดไว้ ได้แก่ 25 องศาเซลเซียส, 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์การทดสอบนี้พบว่า การเสริมฉนวนกันความร้อนสามารถส่งผลให้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถรับกำลังได้เมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และการเสริมฉนวนกันความร้อนสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนได้

Abstract

This research investigates the influence of temperature on the load-bearing capacity of reinforced concrete beams strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), employing various thermal insulation materials. The study aims to mitigate the impact of elevated temperatures by applying thermal insulation and analyzing the resulting load capacity of the concrete beams. The experimental setup involved 21 reinforced concrete beam specimens, each measuring 450 x 200 mm with a length of 4000 mm. The beams were reinforced with 12 mm diameter bottom rebars, 8 mm diameter top rebars, and stirrups. The stirrup spacing was varied, with 100 mm spacing in the support regions and 250 mm spacing in the mid-span. The specimens were divided into three groups: a control group with no thermal insulation (1 specimen), a group with varying thicknesses of polyurethane foam (PU foam) insulation (3 specimens), and a group with varying thicknesses of gypsum board insulation (3 specimens). All specimens were subjected to three temperature conditions: 25°C, 50°C, and 70°C. The analysis of the test results demonstrated that the application of thermal insulation significantly improved the load-bearing capacity of the concrete beams at elevated temperatures. Furthermore, the thermal insulation effectively reduced the temperature within the concrete beams.

1.บทนำ

1.1 *ที่มาและความสำคัญ*

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Concrete: CFRC) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมก่อสร้างและวิศวกรรมโครงสร้าง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อน และอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่ต้องการลดน้ำหนักขององค์อาคาร เช่น สะพาน อาคารสูง และโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ อย่างไรก็ตามปัจจัยด้านอุณหภูมิ เป็นตัวแปรสำคัญที่อาจส่งผลต่อสมบัติทางกลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยเฉพาะเมื่อคานต้องสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในหลายพื้นที่ อาคารและโครงสร้างพื้นฐานต้องเผชิญกับสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันตลอดทั้งวันตัวอย่างเช่น ในเขตร้อนชื้น อุณหภูมิอาจเพิ่มสูงขึ้นในช่วงกลางวันและลดลงในช่วงกลางคืน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของวัสดุคอนกรีตและเส้นใยคาร์บอน ส่งผลให้เกิดรอยร้าว ความเครียดภายใน และการลดลงของความแข็งแรงเชิงกลของโครงสร้างเมื่อเวลาผ่านไป แม้ว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก จะมีคุณสมบัติดีกว่าคอนกรีต

เสริมเหล็กแบบเดิม แต่ก็ยังคงมีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน [1,2]

หนึ่งในแนวทางที่ใช้เพื่อลดผลกระทบจากอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก คือ การใช้ฉนวนกันความร้อน ซึ่งสามารถช่วยรักษาคุณสมบัติทางกลของคานให้คงที่ยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามฉนวนแต่ละประเภทอาจมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุและความหนาของฉนวนที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 25 - 70°C ต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนโดยใช้ฉนวนกันความร้อน โพลียูรีเทนโฟม (PU Foam) และแผ่นยิปซัม (Gypsum board) ที่มีความหนาต่างกัน และฉนวนทั้งสองติดตั้งได้ง่าย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฉนวนทั้งสองประเภทในการลดผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมบัติทางกลของคาน[3,4]

ปัจจัยด้านอุณหภูมิ เป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การใช้ฉนวนกันความร้อนเป็นแนวทางที่สามารถช่วยลดผลกระทบของอุณหภูมิและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้วัสดุฉนวนจำเป็นต้องพิจารณาถึง ประสิทธิภาพของวัสดุ ความหนาที่เหมาะสมและความง่ายในการติดตั้ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เมื่อใช้ฉนวนโพลียูรีเทนโฟม และแผ่นยิปซัมที่มีความหนาต่างกัน โดยผลลัพธ์จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบโครงสร้างที่สามารถรับมือกับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากอุณหภูมิ

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของฉนวน

1.2.3 เพื่อพัฒนาแนวทางออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และฉนวนกันความร้อน โดยคำนึงถึงการรับน้ำหนักของคาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

1. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ใยคาร์บอน (CFRP) ขนาด 450 x 200 มม. มีความยาว 4000 มม.กำลังอัดคอนกรีตมีค่า 23.5 เมกะปาสคาล (ลูกบาศก์)

2. เหล็กเสริมบนขนาดเหล็กเสริมด้านล่างขนาด 12 มม. ค่าความเค้นสูงสุดที่เหล็กเสริมขนาด 12 มม. สามารถรับได้คือ 560 เมกะปาสคาล

4. เหล็กเสริมด้านบนและเหล็กปลอกขนาด 8 มม. ค่าความเค้นสูงสุดที่เหล็กเสริมขนาด ขนาด 8 มม. สามารถรับได้คือ 400 เมกะปาสคาล

5. เส้นใยคาร์บอน ขนาด 8 มม. มีค่าค่าความเค้นสูงสุดที่เส้นใยคาร์บอน ขนาด 60 มม.^{2} สามารถรับได้คือ 2800 เมกะปาสคาล

ฉนวนกันความร้อน

1. ฉนวนกันความร้อนโพลียูรีเทนโฟม(Polyurethane Foam, PU foam) มีความหนา 12.5 มม. , 25 มม. และ 50 มม.

2. ฉนวนกันความร้อนแผ่นยิปซัม(Gypsum board) มีความหนา 0.9 cm , 1.8 cm และ 5 cm

อุณหภูมิ

1.ทดสอบผลกระทบเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เมื่อเผชิญกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2. สามารถเข้าใจพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของฉนวน

3. สามารถเป็นแนวทางออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และฉนวนกันความร้อน โดยคำนึงถึงการรับน้ำหนักของคาน

2.ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สร้างแบบจำลองคานเสริมเส้นใยคาร์บอน (Gider)[5]

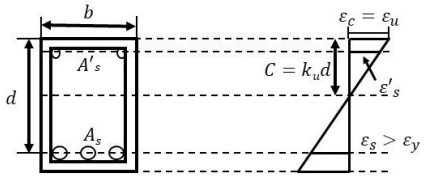
การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้งที่มีฉนวนกันความร้อนและไม่มีฉนวนกันความร้อน เพื่อทดสอบการเสื่อมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

2.2 การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ Atena[5]

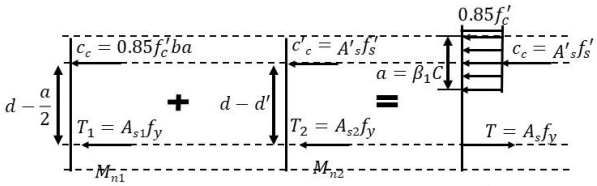
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์แบบสถิตสามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างขณะรับแรงกระทำ เช่น หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างในระยะการโก่งตัว เป็นต้น และการวิเคราะห์แบบการถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายพฤติกรรมของอุณหภูมิที่กระทำต่อโครงสร้าง

2.3 การออกแบบคารคอนกรีต กรณีเหล็กต่ำกว่าสมดุล (Under reinforce)[6]

$M_c > M_s$ คานนี้เรียกว่าเป็นคานที่มการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล ซึ่งหมายความว่า เมื่อรับโมเมนต์ M (โดยที่ $M = M_s$)กระทำต่อคาน ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดในเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงอัดที่เกิดในคอนกรีตยังไม่ถึงค่าหน่วยแรงที่ยอมให้



รูปที่ 1 รูปที่ 2



รูปที่ 3 รูปที่ 4 รูปที่ 5

กำลังต้านโมเมนต์ดัดสูงสุด (Mn) พิจารณาจาก 2 ส่วน คือ Mn_1 และ Mn_2 โดยที่ Mn_1 เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานที่มีรูปตัดเปรียบเสมือนเป็นคานที่มีแต่เหล็กเสริมรับแรงดึง อย่างเดียว ดังรูปที่ 1-5 ดังนั้นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดพิจารณาได้จากแรงอัดในส่วนของคอนกรีตหรือ จากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ A_{s_1} ส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด Mn_2 เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่ได้จากแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A's หรือจากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีพื้นที่หน้าตัด A_{s_2}
ดังรูปที่ 5 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{n1} = 0.85 f'_c ba(d - \frac{a}{2})$$

$$M_{n2} = A'_s f'_s (d - d')$$

ดังนั้น กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

นั้นคือ

$$M_n = 0.85 f'_c ba(d - \frac{a}{2}) + A'_s f'_s (d - d')$$

และโมเมนต์ดัดที่ใช้ออกแบบคือ ϕMn โดยที่ตัวคูณลดกำลัง ϕ เท่ากับ 0.9[6]

2.4 พอลิเมอร์เสริมเส้นใย[2]

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยนิยมเป็นการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น มักนิยมมาใช้สำหรับเสริมแรงในงานก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งมีหลากหลายประเภทให้เลือกใช้

2.2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐาน 2 ชนิดที่นำมาพัฒนาให้คุณสมบัติเหนือกว่าชนิดใดชนิดหนึ่งประกอบหลักสำคัญอยู่ 2 ส่วนหลัก ส่วนหนึ่งเป็นเมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งตัวเสริมแรงมักหมายถึงเส้นใยโดยมากใช้บทที่เยื่อบางมากสำหรับการเลือกเส้นใยจะแบ่งเป็นเส้นใยเดี่ยว (Fiber) โดยขนาดเส้นใย หรือคุณสมบัติต่าง ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะวัสดุที่ใช้เสริมแรง ลิขิตวัสดุของเส้นใยเสริมแรงที่มีผล และการกระจายตัวของเส้นใย และความแข็งแรงของเส้นใยเองจะกลายเป็นผลสะท้อนในองค์ประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งองค์ประกอบสามารถทำหน้าที่เสริมเสถียรภาพเชิงกลของชิ้นงานได้

พอลิเมอร์เมทริกซ์โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมเซต (Thermoset) โดยพอลิเมอร์อยู่ถาวรเมื่อผ่านกระบวนการหล่อหลอมหนึ่งครั้ง และมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทานเปลี่ยนแปลงไม่ได้เนื่องจากการเชื่อมโยงกันของโครงสร้างพอลิเมอร์โครงสร้างของพอลิเมอร์เชื่อมโยงกันเป็นแบบตาข่าย (Crosslinking) ส่งผลให้คงรูปไม่หลอมละลายอีกเมื่อได้รับความร้อน จึงทำให้พอลิเมอร์เทอร์โมเซตเหมาะสำหรับผลิตชิ้นส่วนถาวร ตัวอย่างที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ อีพ็อกซี พอลิเอสเตอร์ ฟีนอลิก ส่วนอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) พอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถขึ้นรูปได้เมื่อได้รับความร้อนและสามารถหลอมละลายซ้ำได้ และพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบโซ่ไม่เชื่อมโยงกัน โดยสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นพลาสติกกึ่งผลึกเซมิคริสตัลไลน์ (Semi-Crystalline) และกลุ่มที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous Thermoplastics) หรือพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้าง (Crosslinking) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบโซ่ยาวไม่เป็นระเบียบ ซ้อนซ้อนกัน และทำให้เกิดโมเลกุลที่ยุ่งเหยิง เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และ พอลิสไตรีน เป็นต้น

เป็นส่วนที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่โครงสร้าง ซึ่งมีหลากหลายประเภท อาจอยู่ในรูปแบบ แผ่น เส้นใย หรืออนุภาค ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเสริมแรงที่อยู่ในลักษณะเส้นใย โดยเส้นใยที่นิยมใช้ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เส้นใยบะซอลต์ (Basalt fiber) และเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ โดยหน้าที่หลักของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต คือเพิ่มความแข็งแรงให้แก่พอลิเมอร์คอมโพสิต รับแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยแรงที่กระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปยังเส้นใยเสริมแรง โดยลักษณะที่ดีในการเป็นเส้นใยเสริมแรงที่ดี คือ เส้นใยมีค่าศูนย์กลางที่เล็ก อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูง มีความโค้งงอและยืดหยุ่นที่ดี และมีค่าดัชนีของดูดซึมและค่าความแข็งแรงที่สูง

จาก [3] พอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยแรงดึงสูงที่ยึดติดกับพื้นผิวโดยใช้ของเหลวที่ระเหยงตัวอยู่ในพอลิเมอร์คอมโพสิต จึงเป็นวิธีการเสริมกำลังที่มีประสิทธิภาพสำหรับโครงสร้างคอนกรีตในหลายกรณี การใช้เส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้รับความนิยมไปสู่การใช้งานในทางกว้างอาจต้องตรวจสอบสำหรับการใช้งานที่เหมาะสมของโครงสร้างในงานวิศวกรรม รวมถึงการพัฒนาวัสดุผสมดังกล่าวว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับวิศวกร มีข้อสังเกตว่าความสำเร็จของการเสริมความแข็งแรงของ FRP นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย FRP ได้รับการทดสอบในหลายรูปแบบ เช่น การรับแรงดึง การรับแรงเฉือน การทดสอบการยึดติดของพื้นผิว และการทดสอบกำลังรับแรงกด ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบเพื่อช่วยให้การใช้วัสดุ FRP ประสบความสำเร็จ

2.2.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความต้านทานไฟของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงป้องกันไฟเสริมด้วยคาร์บอนเสริมแรงภายนอกโพลีเมอร์เสริมไฟเบอร์ในระดับการใช้งานเต็มรูปแบบ โดย PiotrTurkowski [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบความต้านทานไฟของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมกำลังภานนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้งที่มีฉนวนกันความร้อน และไม่มีฉนวนกันความร้อนจำนวน 10 ตัวอย่าง ภายใต้ภาวะไฟต่างๆ โดยงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การสูญเสียการรับน้ำหนักของโพลีเมอร์เสริมไฟเบอร์เนื่องจากความร้อน ส่งผลต่อต่อการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังด้วยโพลีเมอร์เสริมไฟเบอร์ การป้องกันคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน จากการเผชิญไฟจึงมีความสำคัญ ในการรักษาความสามารถในการรับน้ำหนักของคาน

ผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อคุณสมบัติเชิงกลแรงดึงของแผ่นโพลีเมอร์เสริมใยคาร์บอนทิศทางเดียวโดย Yongqiang Zhang , al. [8]ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเส้นใยคาร์บอน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงแบบทิศทางเดียว ภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 20°C ถึง 600°C ในการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ 68% และ 16% เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิ 200°C และ 600°C ตามลำดับ และโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเหลือประมาณ 29% เมื่ออยู่ภายไต้อุณหภูมิที่ 200°C ส่งผลให้เห็นว่าเมื่อเส้นใยคาร์บอนอยู่ภายได้อุณหภูมิสูง เส้นใยคาร์บอนมีการรับแรงดึงที่ลดลง

การศึกษาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมแรงด้วย เส้นใยคาร์บอน ภายใต้อุณหภูมิสูงโดย J.C.P.H. Gamage, M.B. Wong and R. Al-Mahaidi [9]จากการศึกษาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ภายใต้อุณหภูมิสูง ทดสอบผ่านตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาด 130 x 130 มม. x มีความยาว 300 มม. ที่มีการติดตั้งเส้นใยคาร์บอนแบบไม่เสริมกำลังโครงสร้าง พบว่าปัญหาสำคัญที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เสื่อมสภาพลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ผลการทดสอบพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิถึงช่วง 60°C , 70°C แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูญเสียความแข็งแรงอย่างรวดเร็ว การลอกของแผ่นเส้นใยคาร์บอน เกิดขึ้นเนื่องจาก อีพอกซี่อยู่ภายไต้อุณหภูมิที่มากกว่า 60°C

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมความแข็งแรงแบบยืดหยุ่นด้วยด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยErnst-Lucas Klamer [10]ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิต่อคานเสริมเส้นใยคาร์บอนได้มีการศึกษากลไกการสูญเสียของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอน ภายได้อุณหภูมิ 20°C, 50°C และ 70°C มีการทดสอบแบบทั้ง แบบการทดสอบจริง และการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบครึ่งคาน โดยตัวอย่างการทดสอบผ่านตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทั้งหมด 4 ตัวอย่างมีขนาด 450 x 200 มม. มีความยาว 4000 มม. โดยแบ่งออกเป็นคาน Aเกรดของคอนกรีต C 20/25 เสริมเส้นใยคาร์บอนมีความหนา 50 มม. คาน B เกรดของคอนกรีต C 45/55 เสริมมเส้นใยคาร์บอนมีความหนา 80 มม. คาน C เกรดของคอนกรีต C 45/55 เสริมมเส้นใยคาร์บอนมีความหนา 80 มม. โดยมีระยะการเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าน้อยกว่าคานทดสอบอื่น ๆ และคาน D เกรดของคอนกรีต C 20/25 เสริมมเส้นใยคาร์บอนที่มีความหนา 150 มม. จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิ 50°C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงหรือการสูญเสียของแรงยึดเหนี่ยว เมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ทดสอบที่ 20°C และเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิ 70°C พบการการสูญเสียของแรงยึดเหนี่ยว เมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ทดสอบที่ 20°C ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อพฤติกรรมการหลุดล่อนของเส้นใยคาร์บอน

Note จากงานวิจัยอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมความแข็งแรงแบบยืดหยุ่นด้วยด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน [*] พบว่าการสูญเสียการรับกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน อันเนื่องมาจากวัสดุผสานเสื่อมกำลังจากการได้รับอุณหภูมิ จึงได้ศึกษาเรื่องการติกตังฉนวนกันความร้อนให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

3.วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยใช้ฉนวนกันความร้อนที่แตกต่างกัน โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนรวมรวมข้อมูลและงานวอจัยก่อนหน้า ขั้นตอนการวิเคราห์ตัวอย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

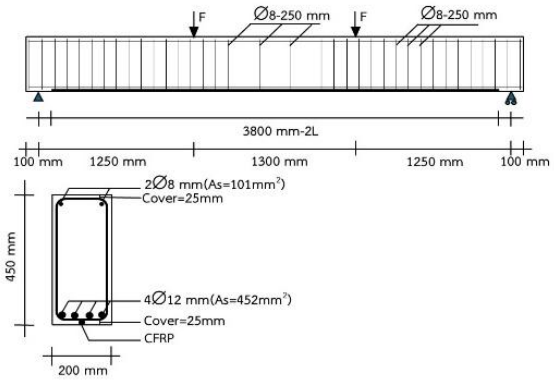
3.1 การรวบรวมข้อมูล และงานวิจัยก่อนหน้า

3.1.1 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมเส้นใยคาร์บอน พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคาน และเส้นใยคาร์บอน ทำให้ประสิทธิภาพการรับน้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริม ลดลง

3.1.2 จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน พบว่าการสูญเสียกำลังการรับน้ำหนักของคานดังกล่าวขึ้นอยู่กับวัสดุผสานที่เชื่อมระหว่างคอนกรีตและเส้นใยคาร์บอน

3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบที่มีขนาด 450 x 200 มม. มีความยาว 4000 มม. และเสริมเหล็กเสริมด้านล่างขนาด 12 มม. เหล็กเสริมด้านบน และเหล็กปลอกขนาด 8 มม..ระยะเรียง 200 มม. เสริม เส้นใยคาร์บอน เป็นแบบเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



รูปที่ 6 ขนานของคานทดสอบ

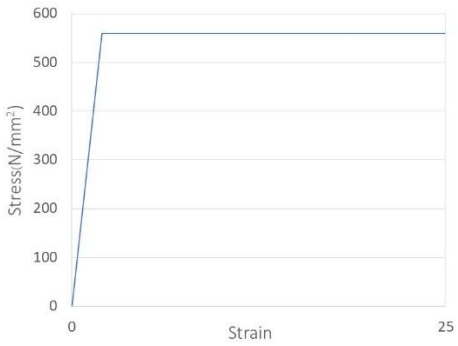
3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

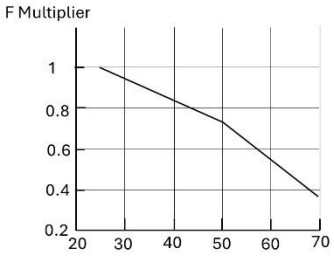
คุณสมบัติ	คานทั้งหมด
Young's modulus (MPa)	20,000
Poison ratio (-)	0.2
Tensile strength (MPa)	1.7
Compressive strength (MPa)(Cubic)	23.5
Strength value (MPa)	27.7

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเหล็ก และเส้นใยคาร์บอน

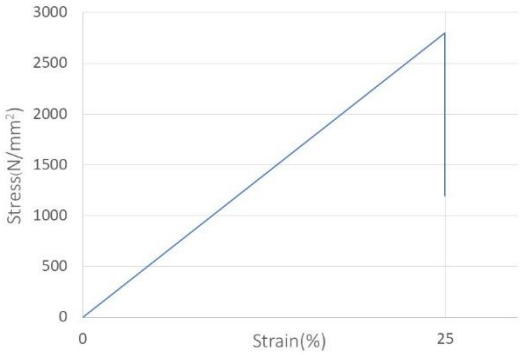
คุณสมบัติ	เหล็กเสริม DB 12 มม.	เหล็กเสริม DB 8 มม.	เส้นใยคาร์บอน 60 มม.
Density (kton/m^3)	0.00785	0.00785	0.0016
Young's modulus (MPa)	200000	200000	165000



รูปที่ 7 รูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ใช้ของเหล็กเสริม



รูปที่ 8 รูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ใช้ของวัสดุผสานเมื่อผ่านอุณหภูมิ



รูปที่ 9 รูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ใช้ของรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ใช้ของวัสดุผสานเมื่อผ่านอุณหภูมิ

3.2.2 การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิต

การวิเคราะห์แบบสถิตโดยทั่วไปใช้ในการศึกษาการกระจายความเค้น ความเครียด และการเสียรูปของโครงสร้างในสภาวะสมดุลการศึกษานี้ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทั้งหมด 21 ตัวอย่าง โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองได้ดังนี้

3.2.3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์แบบถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปใช้ศึกษาการกระจาย และการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุหรือโครงสร้าง ในการทดสอบเป็นการทดสอบแบบถ่ายเทความร้อนผ่านฉนวนสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองได้ดังนี้

ตารางที่ 3 อุณหภูมิ และระยะเวลา

อุณหภูมิ (℃)	เวลา (sec)
25	-
50	21660
70	108060

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของโพลียูรีเทนโฟม

คุณสมบัติ	
Young's modulus (MPa)	2000
Poison ratio (-)	0.3
Yield strength (MPa)	0.1
Hardening modulus (MPa)	10
Rho-density (g/cm^3)	0.352

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางความร้อนของโพลียูรีเทนโฟม มีความหนา 12.5 , 25 มม. และ 50 มม. [5]

คุณสมบัติ	
Thermal condUctivity , k (W/Cm)	0.0628
Spacific heat capacity.,.c (kN/m^{2}c)	477.52

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของแผ่นยิปซัม

คุณสมบัติ	
Young's modulus (MPa)	2000
Poison ratio (-)	0.35
Yield strength (MPa)	0.1
Hardening modulus (MPa)	10
Rho-density (g/cm^3)	0.352

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางความร้อนของแผ่นยิปซัมมีความหนา 0.9 , 1.8 cm และ 5 cm [7]

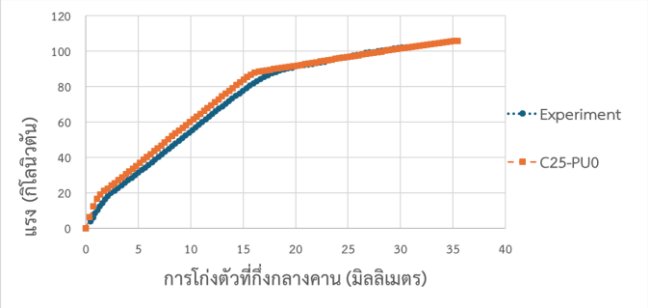
คุณสมบัติ	
Thermal conductivity , k (W/Cm)	0.282
Spacific heat capacity , c (kN/m^{2}c)	872

3.2.3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิตร่วมกับการถ่ายเทความร้อน

เป็นการนำผลการวิเคราะห์จากการถ่ายเทความร้อนนมาวิเคราะห์ร่วมกับการวิเคราะห์แบบสถิต โดยกำหนดช่วงของการวิเคราะห์ออกเป็นสองช่วง ได้แก่ช่วงแรกเป็นการวิเคราะห์ผลการถ่ายเทความร้อน และช่วงที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบสถิตโดยมีอุณหภูมิเข้าร่วม ซึ่งจะได้ค่าการรับน้ำหนักของคานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยต่างค่าการเสื่อมของตัวผสานตามรูปที่ 7 (b)

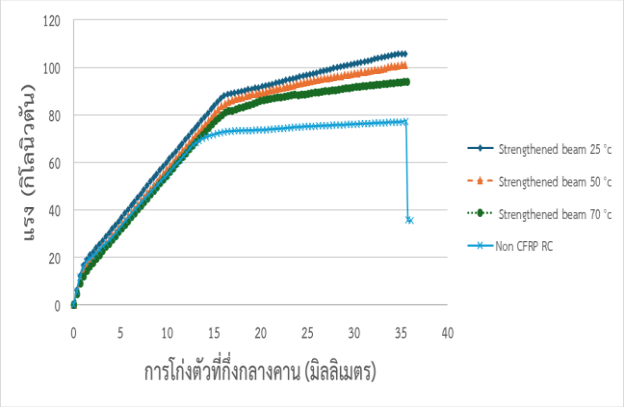
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลและสรุปผล

4.สรุปผลการทดลอง



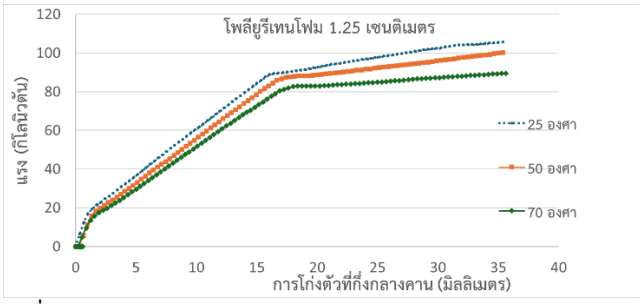
รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนัก และการโก่งตัว

จากการสร้างแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3มิติ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ามีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวอยู่ในระนาบใกล้เคียงกับการทดลองจริงเมื่อเทียบจากการทดสอบของ Ernst-Lucas Klamer [1] (จากความสัมพันธ์ที่มีการเบี่ยงเบนของกราฟ เกิดเนื่องจากการทดสอบจริงมีอาจมีปัจจัยภายนอกเกิดขึ้น) **ดังรูปที่ 17**

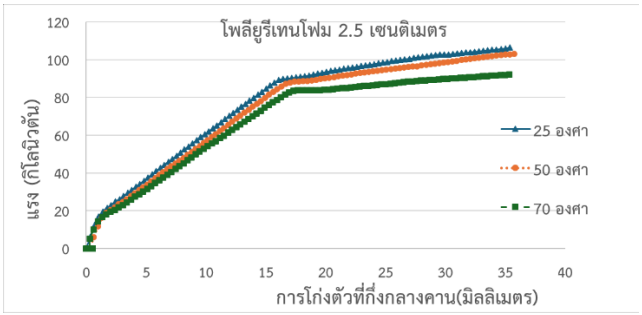


รูปที่ 18 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ70°C

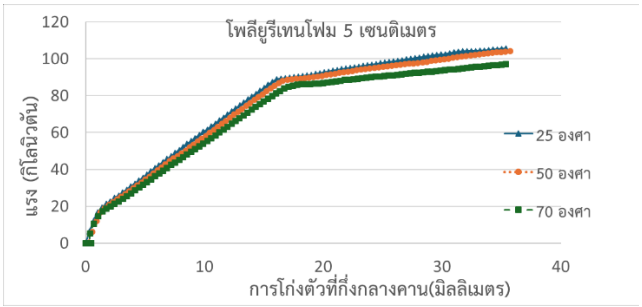
จากการสร้างแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ไม่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนพบว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อการรับกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักลดลงเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น จากกการทดสอบพบว่าการโก่งตัวที่ 36 มม.พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการสูญเสียกำลังในการรับแรง จึงเลือกทำการทดสอบถึงช่วงการโก่งตัวที่ 35 แต่กราฟยังคงมีความชันมากกว่าคานคอนกรีตเสริมไม่เสริม เส้นใยคาร์บอน ดังรูปที่ 18



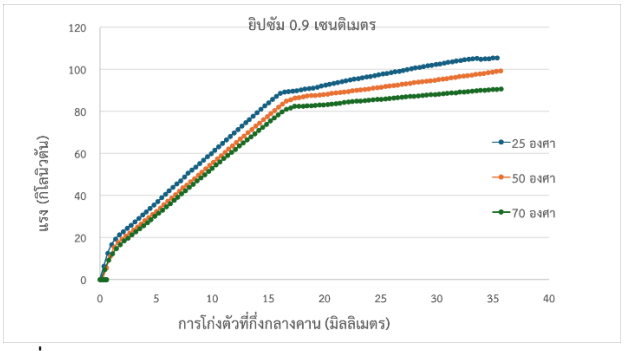
รูปที่ 19 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 12.5 มม. ที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 12.5 มม. เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่เสริมฉนวนกันความร้อน ในอุณหภูมิที่ 50°C และ 70°C สรุปได้ดัง ตารางที่ 12



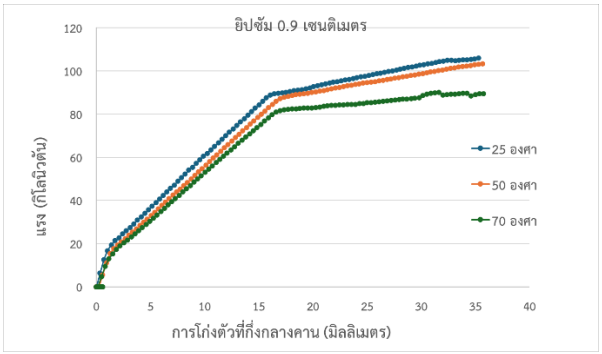
รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 25 มม. อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 25 มม. เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่เสริมฉนวนกันความร้อน ในอุณหภูมิที่ 50°C และ 70°C สรุปได้ดัง ตารางที่ 12



รูปที่ 21 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 50 มม. อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 50 มม. เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สามารถรับน้ำหนักได้เพลดลง เมื่อเทียบกับคานติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่บางกว่า ในอุณหภูมิที่ 25°C, 50°C และ 70°C สรุปได้ดังตารางที่ 12

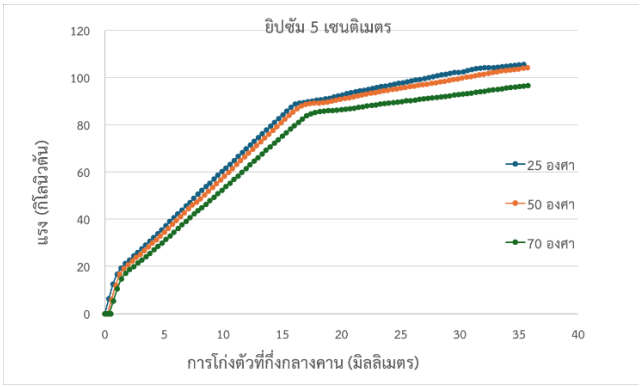


รูปที่ 22 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนแผ่นยิปซัม 0.9 cm ที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนแผ่นยิปซัม 0.9 cm เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่เสริมฉนวนกันความร้อน ในอุณหภูมิที่ 50°C และ 70°C
สรุปได้ดัง ตารางที่ 12

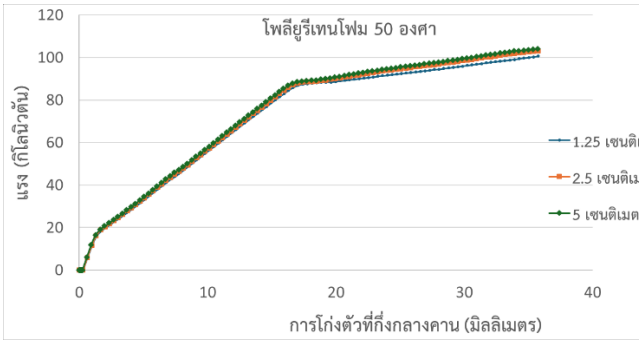


รูปที่ 23 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนแผ่นยิปซัม 1.8 cm ที่อุณหภูมิ 25°C , 50°C และ 70°C

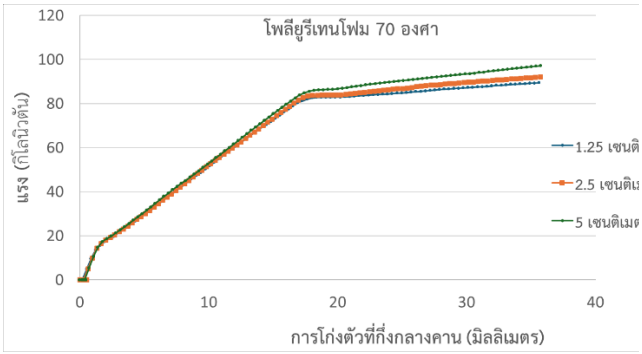
จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนแผ่นยิปซัม 0.9 cm เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่เสริมฉนวนกันความร้อน ในอุณหภูมิที่ 50°C และ 70°C
สรุปได้ดัง ตารางที่ 12



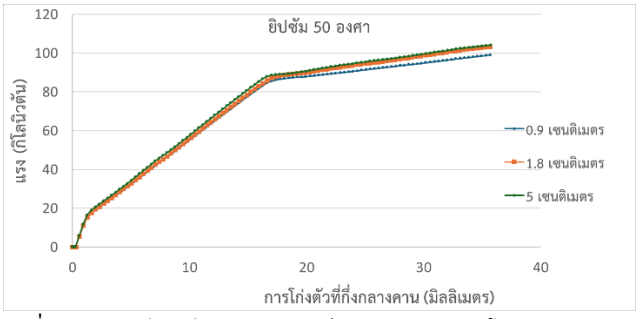
รูปที่ 24 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 50 มม. อุณหภูมิ 25°C ,
และ 70°C
จากการทดสอบ การเพิ่มฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 50 มม. เพื่อป้องกันอุณหภูมิ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สามารถรับน้ำหนักได้เพลดลง เมื่อเทียบกับคานติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่บางกว่า ในอุณหภูมิที่ 25°C, 50°C และ 70°C สรุปได้ดังตารางที่ 12



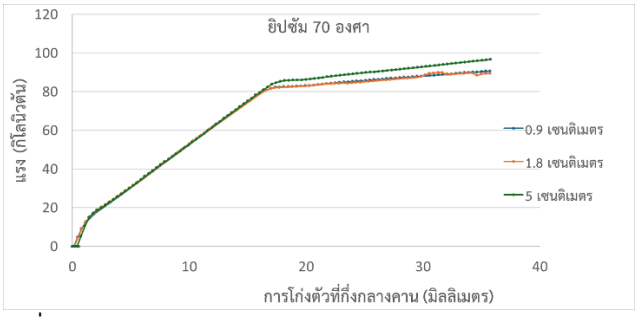
รูปที่ 25 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม ที่มีความหนาต่างกับ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันที่ 50°C



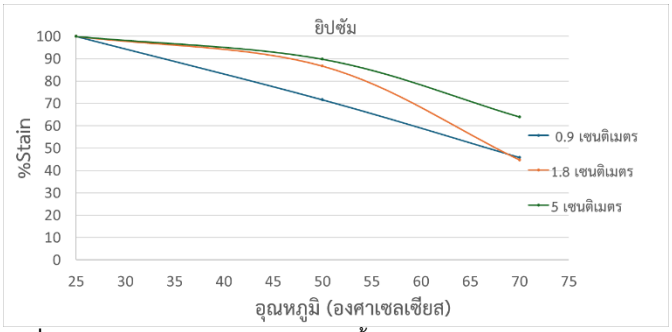
รูปที่ 26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนโพลียูรีเทนโฟม ที่มีความหนาต่างกับ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน 70°C



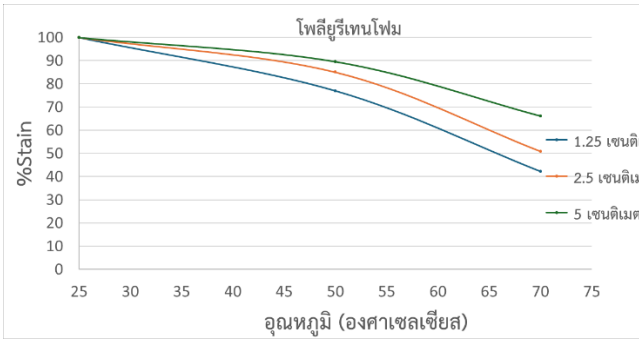
รูปที่ 27กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนแผ่นยิปซัม ที่มีความหนาต่างกับ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันที่ 50°C



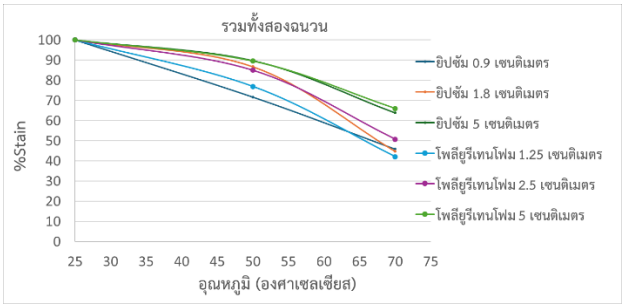
รูปที่ 28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโกงตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ติดตั้งฉนวนแผ่นยิปซัม ที่มีความหนาต่างกับ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันที่ 70°C



รูปที่ 29 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริม CFRP ที่มีความหนาของฉนวนแผ่น ยิปซัม ที่ต่างกัน



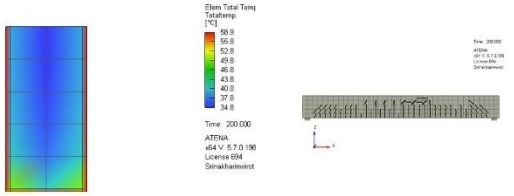
รูปที่ 30 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริม CFRP ที่มีความหนาของฉนวนแผ่น PU Foam ที่ต่างกัน



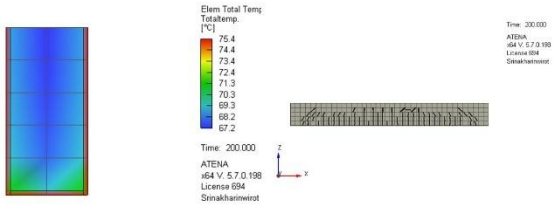
รูปที่ 31 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็ก เสริม CFRP ที่มีความหนาของฉนวนแผ่น ยิปซัม และPU Foam ที่ต่างกัน

ตารางที่ 12 แสดงการรับแรงที่มากที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

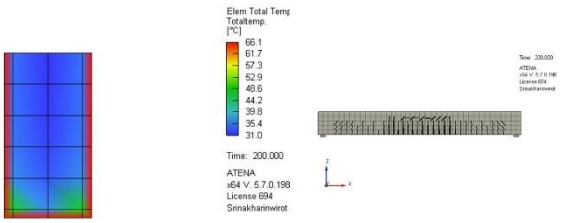
คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	(KN)
C25-PU0	105.69
C50-PU0	96.79
C70-PU0	91.76
C25-PU12.5	105.66
C50-PU12.5	105.06
C70-PU12.5	104.93
C25-PU25	106.46
C50-PU25	105.45
C70-PU25	104.96
C25-PU50	106.21
C50-PU50	104.15
C70-PU50	102.46
C25-GS0.9	105.46
C50-GS0.9	104.87
C70-GS0.9	105.72
C25-GS1.8	105.93
C50-GS1.8	104.98
C70-GS1.8	106.12
C25-GS5	105.65
C50-GS5	104.36
C70-GS5	99.67



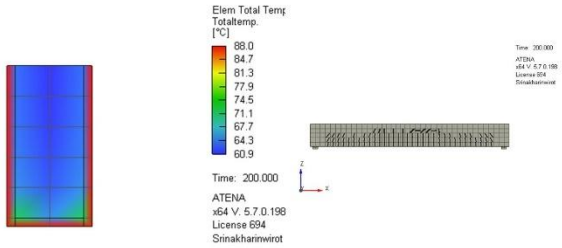
รูปที่ 28 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวนโพลียูรีเทนโฟม 12.5 มม. ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50 °C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 43-49°C



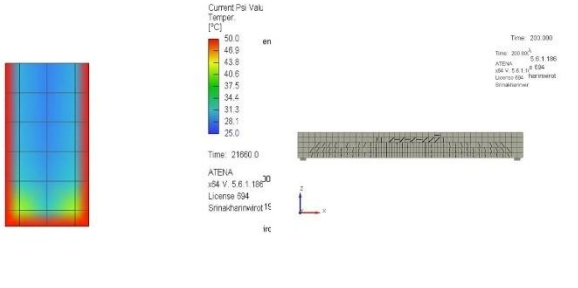
รูปที่ 32 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน โพลียูรีเทนโฟม 12.5 มม. ที่ได้รับอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 70-72°C



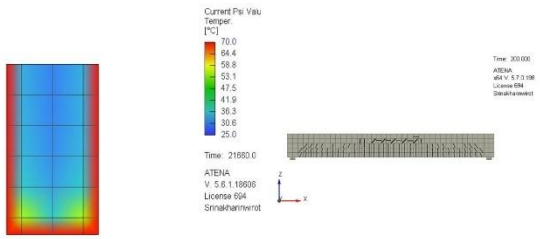
รูปที่ 33 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน โพลียูรีเทนโฟม 25 มม. ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50 °C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 44-52°C



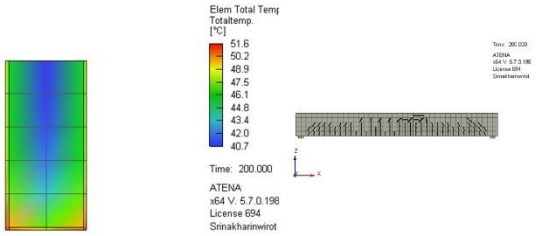
รูปที่ 34 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน โพลียูรีเทนโฟม 25 มม. ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 71-77°C



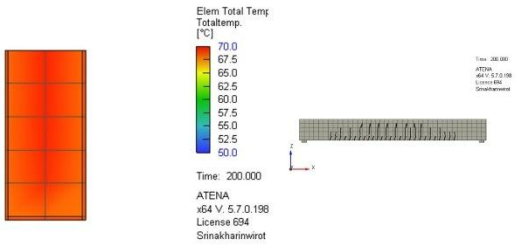
รูปที่ 35 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน โพลียูรีเทนโฟม 50 มม. ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 49-50°C



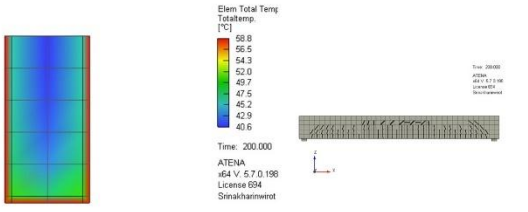
รูปที่ 36 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน โพลียูรีเทนโฟม 50 มม. ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 58-64°C



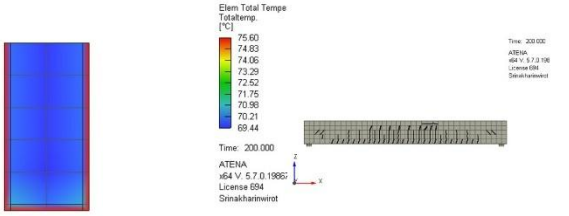
รูปที่ 37 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 0.9 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 47-50°C



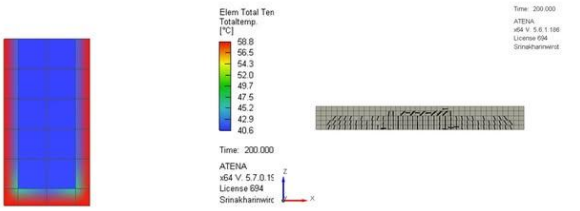
รูปที่ 38 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 0.9 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 67-70°C



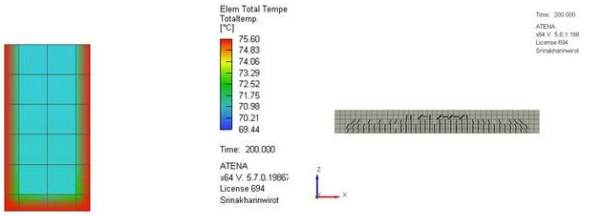
รูปที่ 39 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 1.8 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 49-52°C



รูปที่ 40 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 1.8 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 69-70°C



รูปที่ 41 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 5 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 50°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 56-58°C



รูป

รูปที่ 42 รูปแสดงถึงผลกระทบของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพิ่มฉนวน แผ่นยิปซัม 5 cm ที่ได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิ 70°C
อุณหภูมิที่ถ่ายเทเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สูงสุดอยู่ในช่วง 74-79°C

สรุปผลการทดสอบ

1.คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็กเสริม CFRP นั้นมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2.ความหนาที่เหมาะสมในการติดตั้งฉนวนเพื่อป้องกันความร้อน สำหรับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โฟมโพลียูรีเทนความหนา 2.5 , 5 ซม. และแผ่นยิปซัมความหนา 1.8 , 5 ซม. สำหรับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โฟมโพลียูรีเทนความหนา 5 ซม. และแผ่นยิปซัมความหนา 5 ซม. สามารถป้องกันไม่ให้ความร้อนส่งผลให้ วัสดุผสานเสื่อมสภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอบคุณ ดร.ธีระพจน์ ศุภวิริยะกิจ ที่ให้คำปรึกษา และนำตลอดจนตรวจแก้ไขข้อมูล ๆ มาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

[1] Vijayan, D. Sivalinga, A. Sivasuriyan, P. Devarajan, A. Stefańska, Ł. Wodzyński, and E. Koda. "*Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application-A Comprehensive Review*." *Buildings* 13, no. 6 (2023): 1509.
[2] ชานน อนันต์ศุภมงคล. (2565). "*พฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน.*" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
[3] ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการคำนวณ และการรับรองผลการตรวจประเมินในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. ๒๕๖๔. (2564, 24 ธันวาคม). ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 138 ตอนพิเศษ 315 ง หน้า 9-30
[4] Hobbs, M. L., & Lemm.on, G. H. (2004). "*Polyurethane foam response to fire in practical geometries*" *Polymer Degradation and Stability*, Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, United States,84(2), 183–197
[5] ATENA Science. n.d. ATENA Science GiD Tutorial 1-1. Accessed March 10, 2025.
[6] อานนท์ วงษ์แก้ว, (2558). "*พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด*" *มหาวิทยาลัยบูรพา,* 6
[7] Turkowski, P. (2023) "*Fire Resistance of Fire-Protected Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Reinforcement CarbonFibre-Reinforced Polymers at the Full Utilisation Degree*" , Materials, MDPI, Basel, Switzerland,1-12.
[8] Zhang, Y., Li, Y., Zhang, J., Pan, J., Zhang, L., Tan, F., Wei, H., & Zhang, W. (2021). "*High-Temperature Effect on the Tensile Mechanical Properties of Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates. Materials*" 14(7214). Materials, MDPI, Basel, Switzerland, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China, High Velocity Impact Dynamics Lab, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 1-11.

[9] Gamage, J. C. P. H., Wong, M. B., & Al-Mahaidi, R. (2005). "*Performance of CFRP strengthened concrete members under elevated temperatures" Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005),* International Institute for FRP in Construction, 113–118.
[10] Klamer, E.L. (2009).*"Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP"*Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 250 p.

.

การศึกษาความเป็นไปได้เมืองสูงวัยสู่เมืองวัฒนธรรมโลก

International Silver Age Heaven Estate to World Culture City (ISHEtoWCC)

ปุญญพัฒน์ จงเจริญ[1] วัชรพล ศรีณรงค์[2] ณภัทร อุปะละ[3] และ อรยา อภิวงค์[4]

[1,2,3,4] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64103958@up.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (International Silver Age Heaven Estate: ISHE) เป็นโครงการที่มุ่งพัฒนาที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ซึ่งมีศักยภาพด้านทำเลที่ตั้งและค่าครองชีพที่ต่ำ โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเมืองที่รองรับผู้สูงอายุจากนานาประเทศ พร้อมสิ่งอำนวยความสะดวกครบครันและบริการทางการแพทย์ที่ได้มาตรฐาน การศึกษานี้วิเคราะห์อุปสงค์และอุปทานของตลาดผู้สูงอายุชาวต่างชาติ ศักยภาพทางเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อ GDP ของประเทศ รวมถึงการวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าการลงทุน

จากการศึกษาพบว่าโครงการมีศักยภาพที่จะเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการพำนักระยะยาว โดยการวิเคราะห์ทางการเงินแสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยเฉพาะเมื่ออัตราการเข้าพักอยู่ที่ 75% และ 100% ซึ่งจะสร้างรายได้ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปีจากการใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือนของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (ISHE) เป็นโครงการที่ออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการที่อยู่อาศัยระยะยาวสำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตหลังเกษียณในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ซึ่งมีสภาพแวดล้อมและวัฒนธรรมที่เหมาะสม โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ และส่งเสริมให้ไทยเป็นจุดหมายปลายทางสำหรับผู้สูงอายุที่ต้องการใช้ชีวิตในต่างแดน

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ โดยมีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับอัตราการเข้าพักที่ 50%, 75%, และ 100% และคำนวณผลตอบแทนทางการเงินผ่านเครื่องมือต่างๆ เช่น Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), และ Benefit-Cost Ratio (BCR) การวิเคราะห์ทางการเงินใช้ข้อมูลจากไฟล์เอกเซลที่ประกอบด้วยสมมติฐานเกี่ยวกับรายได้และค่าใช้จ่ายของโครงการ รวมถึงการคำนวณกระแสเงินสดสำหรับระยะเวลา 20 ปี

จากการวิเคราะห์ทางการเงินพบว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่ออัตราการเข้าพักอยู่ที่ 75% และ 100% โดยมีค่า NPV เป็นบวก และค่า BCR มากกว่า 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงการสามารถสร้างผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับต้นทุนการลงทุน นอกจากนี้ โครงการยังมีศักยภาพในการสร้างรายได้และกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านการใช้จ่ายของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

คำสำคัญ: เมืองสูงวัยนานาชาติ, ที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุ, การลงทุน, การท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ

Abstract

The "International Silver Age Heaven Estate" (ISHE) project is aimed at developing residential areas for foreign elderly individuals in Thailand, particularly in Phayao Province, which has potential in terms of location and low living costs. This project aims to establish a city that accommodates elderly individuals from various countries, offering comprehensive amenities and standardized medical services. This study analyzes the demand and supply of the foreign elderly housing market, economic potential, and impact on the country's GDP, along with financial analysis to assess investment feasibility.

Findings indicate that the project has the potential to become a hub for health tourism and long-term residency for foreign retirees. Financial analysis shows that the project is cost-effective, particularly when the occupancy rates reach 75% and 100%, generating an estimated annual revenue of approximately 3.9 billion baht from an average monthly expenditure of 65,000 baht per foreign retiree.

The "International Silver Age Heaven Estate" (ISHE) project is designed to meet the long-term housing needs of foreign retirees seeking post-retirement life in Thailand, especially in Phayao Province, which offers a suitable environment and cultural setting. The primary objectives of this project include stimulating Thailand's economy through foreign retirees, creating a model city for an international aging society, and promoting Thailand as a preferred destination for elderly expatriates.

This study employs financial analysis to evaluate the project's investment feasibility, utilizing assumptions on occupancy rates of 50%, 75%, and 100%, and financial metrics such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Benefit-Cost Ratio (BCR). The financial analysis relies on an Excel file containing revenue and expenditure assumptions, along with cash flow calculations over a 20-year period.

The financial analysis results indicate that the project is financially viable when occupancy rates reach 75% and 100%, with a positive NPV and a BCR greater than 1, demonstrating that the project can yield substantial returns compared to the investment cost. Additionally, the project holds potential to generate revenue and boost Thailand's economy through the spending of foreign retirees.

Keywords: International Senior City, Elderly Housing, Investment, Health Tourism

1. บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ที่มาและความสำคัญ โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (IsHE) เกิดขึ้นจากแนวคิดการพัฒนาเมืองสำหรับผู้สูงอายุระดับนานาชาติ โดยเน้นให้เป็นสถานที่พำนักระยะยาวสำหรับชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตวัยเกษียณในประเทศไทย ซึ่งมีค่าครองชีพต่ำ และมีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยเฉพาะใน จังหวัดพะเยา ซึ่งมีศักยภาพด้านสภาพแวดล้อมและวัฒนธรรมที่เหมาะสม

โครงการนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อ แนวโน้มประชากรโลกที่เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ซึ่งส่งผลให้เกิดความต้องการที่อยู่อาศัยที่รองรับผู้สูงอายุระยะยาว โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญดังนี้

กระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ เมืองไทยไม่ได้ต้องการเป็นเพียง "เมืองสูงวัยชาวไทย" เท่านั้น แต่ต้องการดึงดูดชาวต่างชาติที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจให้เข้ามาใช้ชีวิตหลังเกษียณ คาดการณ์ว่า 5,000 คน ที่พำนักในโครงการนี้จะสร้างรายได้ ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปี จากการใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือน สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ พัฒนาเมืองพิเศษที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกครบครัน เช่น ศูนย์สุขภาพ สวนสาธารณะ และพื้นที่ทำกิจกรรมสำหรับผู้สูงอายุ ออกแบบที่อยู่อาศัยตามสถาปัตยกรรมของแต่ละชนชาติ เช่น ชุมชนเกาหลี ชุมชนญี่ปุ่น และชุมชนยุโรป เพิ่มขีดความสามารถของไทยในการแข่งขันระดับโลก ประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ชะลอตัวและไม่สามารถแข่งขันกับประเทศเพื่อนบ้านได้ การสร้างเมืองสูงวัยนานาชาติจะช่วยเพิ่ม GDP และทำให้ไทยเป็นจุดหมายปลายทางสำหรับผู้สูงอายุที่ต้องการใช้ชีวิตในต่างแดน ส่งเสริมการพัฒนาชุมชนและวัฒนธรรมระดับโลก นอกจากการเป็นที่พักอาศัย โครงการนี้ยังเน้นการผสมผสานวัฒนธรรมระหว่างประเทศผ่านกิจกรรมทางสังคมและประเพณีของแต่ละชนชาติ สร้างสังคมที่เปิดกว้างและเอื้อต่อการใช้ชีวิตร่วมกันของชาวต่างชาติและคนไทย - การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์และพัฒนาโครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (International Silver Age Heaven Estate: IsHE) ซึ่งเป็นแนวคิดในการสร้างที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุระดับนานาชาติ โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ประเทศไทย โครงการนี้มุ่งเน้นให้เป็นสถานที่พำนักระยะยาวสำหรับชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตวัยเกษียณในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ค่าครองชีพต่ำ และมีบริการที่ครบวงจร รวมถึงการแพทย์ที่ได้มาตรฐาน การศึกษาครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์อุปสงค์และอุปทานของตลาดผู้สูงอายุชาวต่างชาติ ศักยภาพทางเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อ GDP ของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้านการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน พบว่าโครงการมีศักยภาพที่จะเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการพำนักระยะยาว วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือการกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ และเพิ่มขีดความสามารถของไทยในการแข่งขันระดับโลก โดยการพัฒนาเมืองพิเศษที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกครบครัน ออกแบบให้เหมาะกับแต่ละชนชาติ เช่น ชุมชนเกาหลี ชุมชนญี่ปุ่น และชุมชนยุโรปการศึกษานี้ยังใช้หลักทฤษฎีด้านวิศวกรรม การออกแบบเมือง และเศรษฐศาสตร์ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ต้นทุน การลงทุน อัตราผลตอบแทน และระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้มั่นใจว่าโครงการสามารถดำเนินการได้อย่างยั่งยืนและเป็นประโยชน์ต่อทั้งเศรษฐกิจไทยและกลุ่มเป้าหมาย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 กระตุ้นเศรษฐกิจและเพิ่มเม็ดเงินหมุนเวียนในประเทศ คาดการณ์ว่าจะมีเงินหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปี จากค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือนต่อคน

1.2.2 เพิ่มโอกาสการลงทุนและพัฒนาอุตสาหกรรมอสังหาริมทรัพย์ กระตุ้นตลาดอสังหาริมทรัพย์และการก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดการจ้างงานในภาคแรงงานและธุรกิจที่เกี่ยวข้อง

1.2.3 ยกระดับไทยเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการเกษียณอายุ ทำให้ประเทศไทยเป็น **Retirement Destination** สำหรับชาวต่างชาติ

1.2.4 กระจายรายได้และพัฒนาเศรษฐกิจระดับภูมิภาค เพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับชุมชนท้องถิ่น เช่น การค้าปลีก บริการทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมอาหาร

1.2.5 ส่งเสริมวัฒนธรรมและการแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศ การตั้งถิ่นฐานของชุมชนต่างชาติในไทยช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนวัฒนธรรมและความร่วมมือระหว่างประเทศ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ตารางที่ 1. สมมติฐานของการวิจัย

ต้นทุนโครงการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคาสุทธิ (บาท) (เอกชน)	ราคาสุทธิ (บาท) (รัฐบาล)
ค่าก่อสร้างบ้าน	6,700ตร.ม.	15,000	100,500,000	100,500,000
ค่า Landscape	250ตร.ม.	400	100,000	100,000
ค่าเซอร์เวย์พื้นที่	-	-	10,000	10,000
ค่าซัพพลาย	-	-	10,000	10,000
ค่าพื้นที่อเนกประสงค์	100 ตร.ม.	2,000	200,000	200,000
ค่าที่จอดรถ+ถนน	6000 ตร.ม.	150	900,000	900,000
ค่าดินขุดดินถม	16000 ตร.ม.	80	1,280,000	1,280,000
ค่าออกแบบและควบคุม	-	-	3,090,000	3,090,000
รวม	-	-	106,090,000	106,090,000

ตารางที่ 1.สมมติฐานต้นทุนของโครงการ ที่อัตราการเข้าพัก 75%เปรียบเทียบระหว่างเอกชนลงทุนกับรัฐบาลลงทุน

	อัตราการเข้าพัก		
	50%	75%	100%
เอกชน	✓	✓	✓
รัฐบาล	✓	✓	✓

ตารางที่ 2. แบ่งออกเป็น 2 Case คือ เอกชนลงทุนและรัฐบาลลงทุน ตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการกู้มีอัตราการเข้าพักที่ 50% 75% และ100%

การใช้อัตราการเข้าพักที่ 50%, 75% และ 100% ในการวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการ ไม่ได้เป็นตัวเลขตายตัว แต่เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) เพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการเข้าพักที่แตกต่างกันต่อผลตอบแทนของโครงการ โดยทั่วไปจะใช้ 50%, 75%, 100% เป็นมาตรฐาน

-ในธุรกิจโรงแรม รีสอร์ท และ อสังหาริมทรัพย์ระยะยาว นิยมใช้กันในการวิเคราะห์จะช่วยให้เห็นภาพชัดเจนของสถานการณ์ 3 ระดับ (แย่-ปกติ-ดีที่สุด) โดยไม่ต้องมีค่าหลายระดับจนทำให้การวิเคราะห์ซับซ้อนเกินไป การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านการลงทุนของโครงการ จะวิเคราะห์ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV , Net present value) โดยใช้สมมติฐาน อัตราผลตอบแทนที่คาดหวังอยู่ที่7.33% เนื่องจากอัตราการเข้าพักที่75%ของเอกชนเป็น(กรณีปกติ)ผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)=1.003 แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน ดังนั้นจึงใช้ผลตอบแทนที่คาดหวัง7.33% ในการคำนวนเปรียบเทียบระหว่างเอกชนลงทุนและรัฐบาลลงทุน ที่อัตราการเข้าพัก50%(กรณีแย่ที่สุด), 75%(กรณีปกติ) และ100%(กรณีดีที่สุด) และหากค่าอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน(IRR, Initial rate of return) มากกว่า7.33% แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าในลงทุน หลังจากการประเมินการลงทุนอสังหาริมทรัพย์ เมื่อผ่านขั้นตอนการคำนวณต่าง ๆ แล้วผลที่ได้รับจะเป็นความคุ้มค่าต่อการลงทุน และสามารถนำตัวอย่างไปดัดแปลง เพื่อใช้ในงานอสังหาริมทรัพย์ด้านอื่น ๆ ได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ด้านระยะเวลาในการศึกษา เริ่มต้นศึกษาหาข้อมูลเดือนพฤษภาคม 2567 - เดือนพฤษจิกายน 2567

1.4.2 สมมติฐานอัตราส่วนการเข้าพักคือ 50% 75% 100% ตามลำดับ

1.4.3 คิดผลประกอบการเป็นระยะเวลา 20 ปี

1.4.4 อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (MLR+3) คือ 7.5%

1.4.5 อัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง คือ 7.33%

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ตอบสนองความต้องการของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

1.5.2 เกิดเป็นแหล่งศึกษาวัฒนธรรมในแต่ละประเทศ

1.5.3 สามารถเข้าใจเรื่องของกฎหมายที่ต้องใช้เมื่อต้องการสร้างอาคาร บ้าน โรงแรม หรืออะไรก็ตามที่เกี่ยวข้องในงานด้านอสังหาริมทรัพย์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ทฤษฎีและแนวคิดในการพัฒนาโครงการ"การประเมิณความคุ้มค่าในการลงทุนบ้านพักผู้สูงอายุ "(International Silver Age Heaven Estate - IsHE) มีหลายทฤษฎีที่สามารถนำมาใช้เป็นกรอบแนวคิดสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์โครงการในเชิงวิศวกรรม การออกแบบเมือง และการพัฒนาเศรษฐกิจ โดยสามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่หลักได้ดังนี้

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิศวกรรมและการออกแบบเมือง

2.1.1ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Design Theory)

Principles of Sustainable Infrastructure (ISI): แนวทางการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความยั่งยืน และ ลดผลกระทบต่อธรรมชาติ

Universal Design Theory (Ron Mace, 1985): แนวคิด ออกแบบเมืองที่เหมาะสำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ เช่น พื้นที่เข้าถึงได้ ง่าย ทางเดินกว้าง ไม่มีสิ่งกีดขวาง

2.1.2 ทฤษฎีระบบพลังงานและสิ่งแวดล้อม (Energy & Environmental Engineering Theories)

Green Building Concept (LEED & BREEAM): ระบบมาตรฐานการออกแบบอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน

Smart City Framework (ISO 37122:2019): การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการบริหารจัดการเมือง เช่น ระบบ Smart Grid และ IoT สำหรับเมืองอัจฉริยะ

2.1.3 ทฤษฎีระบบขนส่งและโลจิสติกส์เมือง (Urban Transportation & Logistics Theory)

Transit-Oriented Development (TOD) (Calthorpe, 1993): แนวคิดพัฒนาเมืองรอบระบบขนส่งสาธารณะ เพื่อให้ผู้สูงอายุสามารถเดินทางได้สะดวก

Walkability Theory (Jeff Speck, 2012): แนวคิดการออกแบบเมืองให้เดินได้สะดวก มีระบบทางเท้าที่ปลอดภัยสำหรับผู้สูงอายุ

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์และการลงทุนโครงการ

2.2.1 ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์เมือง (Urban Economics Theories)

Growth Pole Theory (Perroux, 1950): แนวคิดการพัฒนาเมืองให้เป็นศูนย์กลางการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดย "เมืองสูงวัยนานาชาติ" จะเป็นศูนย์กลางที่ดึงดูดการลงทุนด้านสุขภาพและการท่องเที่ยว

Aging Economy Theory (Bloom et al., 2011): ทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของประชากรสูงวัยต่อเศรษฐกิจ และแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มนี้

2.2.2 ทฤษฎีการลงทุนและความเป็นไปได้ของโครงการ (Project Investment & Feasibility Theories)

Net Present Value (NPV) & Internal Rate of Return (IRR) (Ross et al., 2010): ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินของโครงการ

Cost-Benefit Analysis (CBA) (Mishan & Quah, 2007): เครื่องมือสำหรับการประเมินความคุ้มค่าของโครงการในระยะยาว

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับประชากรศาสตร์และพฤติกรรมผู้สูงอายุ

2.3.1 ทฤษฎีประชากรศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากร (Demographic Transition Theory)

Population Aging Theory (UN, 2019): ทฤษฎีที่อธิบายถึงแนวโน้ม

การเพิ่มขึ้นของประชากรสูงอายุทั่วโลก และผลกระทบต่อโครงสร้างเศรษฐกิจและสังคม

2.3.2 ทฤษฎีคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ (Quality of Life & Aging Theories)

ประชากร (Demographic Transition Theory)

Active Aging Framework (WHO, 2002): แนวคิดที่สนับสนุนให้ผู้สูงอายุมีคุณภาพชีวิตที่ดี มีส่วนร่วมในกิจกรรมทางสังคม และเข้าถึงบริการสุขภาพ

Triple Constraint Model (PMBOK Guide, PMI): แนวคิดเกี่ยวกับข้อจำกัดของโครงการในด้านงบประมาณ เวลา และขอบเขตงาน

2.4 เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เศรษฐศาสตร์ หมายถึง การศึกษาถึงวิธีการนำเอาทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้อย่างประหยัด หรือยังมีประสิทธิภาพเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม หมายถึง การนำเอาเศรษฐศาสตร์ประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรม เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ กับงานด้านวิศวกรรมอย่างประหยัด หรือใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.1 การวิเคราะห์การตัดสินใจในโครงการต่างๆด้วยเศรษฐศาสตร์

การศึกษาว่าโครงการได้น่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจำเป็นต้องทราบขั้นตอนการวิเคราะห์รูปแบบของปัญหาค้าที่เป็นเครื่องวัดในการตัดสินใจ และแหล่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้ 7 ข้อดังนี้

2.4.1.1 กำหนดรูปแบบของปัญหา โดยจะต้องศึกษาข้อมูลขั้นต้นก่อนว่าอะไรเป็นสิ่งที่กำหนดให้เป็นปัญหา อะไรเป็นผลลัพธ์ และอะไรเป็นสิ่งที่ต้องตัดสินใจ เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการเข้าใจตรงกัน

2.4.1.2 สร้างบรรทัดฐานในการประมาณค่าที่ใช้วัด การวิเคราะห์ทางเลือกหลาย ๆ ทาง นั้นจะต้องสร้างเกณฑ์ในการวัด เช่น จะใช้ค่าใช้จ่าย กำไร และความสูญเสียเป็นเกณฑ์ในการวัดเป็นต้น

2.4.1.3 สร้างทางเลือกหลาย ๆ ทางเลือก และไม่ควรด่วนสรุปก่อนที่จะมีการตัดสินใจอย่างรัดกุม

2.2.1.4 ทำการประเมินผลลัพธ์ของแต่ละทางเลือก โดยประเมินเป็นค่าใช้จ่าย ผลกำไรที่ได้รายได้อรรถประโยชน์ (Utility) เป็นต้น แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเศรษฐศาสตร์

2.4.1.5 เลือกทางเลือกที่ชอบมากกว่าทั้งเรื่องอื่น ถ้าในกรณีที่ได้ผลลัพธ์ของ 2 โครงการ เท่ากันก็ต้องทำ ข้อที่ 2.2.1.7 ต่อไป

2.4.1.6 การวิเคราะห์ความไวเพื่อดูผลกระทบของโครงการว่าเป็นอย่างไร ถ้าค่าที่ประมาณไว้เปลี่ยนแปลงไป เช่น อัตราดอกเบี้ย รายได้เป็นแปลง เป็นต้น

2.4.1.7 ตัดสินใจลงทุน โดยมีการแสดงเหตุผลสนับสนุนการลงทุนด้วย

2.4.2 รูปแบบของปัญหาที่ใช้ตัดสินใจมี 2 แบบ แต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

2.4.2.1 การตัดสินใจภายใต้ความแน่นอน (Certainty) เป็นรูปแบบของปัญหาที่เกิดขึ้นได้แน่นอนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ถือว่าสมบูรณ์ แน่นอน ความคลาดเคลื่อนจากค่าต่าง ๆ ที่ประมาณไว้ถือว่าน้อยมาก และ ไม่มีความเสี่ยงเกิดขึ้นดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาแบบนี้จึงตรงไปตรงมา

2.4.2.2 การตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอน (Uncertainty) รูปแบบของปัญหามีข้อมูลไม่ครบต่อการวิเคราะห์ หรือไม่สามารถกำหนดค่าความน่าจะเป็นได้ บางครั้งไม่ทราบว่าจะเกิดเหตุการณ์ใดบ้าง การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า 2 แบบแรก

2.4.3 แหล่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

2.4.3.1 ข้อมูลฝ่ายการตลาดเพื่อพยากรณ์ปริมาณการขายและกำหนดเป็นรายได้ต่อเดือน หรือต่อปี เป็นต้น

2.4.3.2 ข้อมูลจากฝ่ายวิศวกรรม เป็นการศึกษาด้านการผลิตเชลล์ข้างต้น ความสามารถในการผลิต เครื่องมือเครื่องใช้ในการผลิต วัตถุดิบในการผลิต เป็นต้น ในบางครั้งต้องทำโครงการนำร่อง (Pilot project) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านวิศวกรรมก่อน นอกจากนี้ยังต้องศึกษาด้านสาธารณูปโภค การขจัดของเสียที่เกิดขึ้นเป็นต้น

2.4.3.4 ข้อมูลด้านการเงิน ได้แก่ แหล่งลงทุน ต้นทุนการผลิต อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ค่าภาษี เป็นต้น

2.4.3.5 ข้อมูลจากฝ่ายบริหารโดยกำหนดอัตราผลตอบแทนที่สนใจต่ำสุด ข้อมูลจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นต้น

การวิเคราะห์และการตัดสินใจลงทุน

รูปแบบการวิเคราะห์ด้านการเงินมี 2 วิธี

วิธีที่ 1 : วิธีวัดมูลค่าการลงทุนแบบดั้งเดิม (Traditional measures of investment worth)

(1) Payback period (ระยะเวลาคืนทุน)

(2) Rate of return (อัตราผลตอบแทน) or IRR (Interest rate of return)

วิธีที่ 2 : วิธีวัดมูลค่าการลงทุนในรูปแบบค่าเงินปัจจุบัน

(1) NPV (PV), FV

(2) BCR

การคำนวณแบบดั้งเดิม

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับในแต่ละปี}}$$

(สมการที่ 1)

$$\text{อัตราผลการตอบแทนทางบัญชี} = \frac{\text{กำไรสุทธิหลังหักค่าเสื่อมราคาเฉลี่ยรายปี}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับในแต่ละปี}}$$

(สมการที่ 2)

ต้นทุนเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted averrage cost capital, WACC)

WACC = WeKe + WdKd (1-Tax)

เมื่อ We = สัดส่วนเงินลงทุนจากผู้ประกอบการ
Ke = ต้นทุนเงินทุนของผู้ประกอบการ
Wd = สัดส่วนเงินลงทุนจากการกู้ยืม
Kd = ต้นทุนเงินทุนจากการกู้ยืมเงิน
Tax = อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล

การคำนวณหามูลค่าปัจจุบัน (NPV) โครงการโรงแรม

$$\text{NPV} = \frac{B_1 - C_1}{1+\text{WACC}^1} + \frac{B_2 - C_2}{1+\text{WACC}^2} + \ldots\ldots + \frac{B_n - C_n}{1+\text{WACC}^n}$$

(สมการที่ 3)

NPV = (+) แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน
NPV = 0 แสดงว่าโครงการยังมีความน่าสนใจจะลงทุน
NPV = (-) แสดงว่าโครงการอาจไม่มีความน่าสนใจจะลงทุน

โดย NPV = มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิที่เพิ่มขึ้นตลอดอายุโครงการ
B_t = มูลค่าของผลได้ที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t
C_t = มูลค่าของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t
r = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
t = ปีของโครงการ คือ ปีที่ 1, 2, 3,..., n
n = อายุของโครงการ

การคำนวณหาผลตอบแทนภายใน (IRR) โครงการโรงแรม

$$IRR = \frac{B_1-C_1}{(1+r)^1} + \frac{B_2-C_2}{(1+r)^2} + ... + \frac{B_n-C_n}{(1+r)^n}$$

(สมการที่ 4)

โดย IRR = อัตราผลตอบแทนภายในการลงทุน

B_t = มูลค่าของผลได้ที่เพิ่มขึ้นในปี ที่ t

C_t = มูลค่าของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t

r = อัตราดอกเบี้ย

t = ปีของโครงการคือปีที่ 1, 2, 3,..., n

n = อายุของโครงการ

การคำนวณหาอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) โครงการ

$$BCR = \frac{\frac{B_1}{1+W\ \ 1}}{\frac{C_1}{1+WACC^1}} + \frac{\frac{B_2}{1+WACC^2}}{\frac{C_2}{1+W\ \ 2}} + ... + \frac{\frac{B_n}{1+WAC\ \ n}}{\frac{C_n}{1+WAC\ \ n}}$$

(สมการที่ 5)

BCR = +1 แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน

BCR = 1 แสดงว่าโครงการยังมีความน่าสนใจจะลงทุน

BCR = -1 แสดงว่าโครงการไม่มีความน่าสนใจจะลงทุน

โดย B_t = รายได้/ผลประโยชน์จากโครงการในปีที่ t

C_t = ค่าใช้จ่ายหรือเงินลงทุนของโครงการในปีที่ t

r = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม

N = อายุโครงการ (Project life)

t = ปีของโครงการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

(NPV กับ B/C สอดรับกันถ้าเป็น NPV = 0 แล้ว B/C จะมีค่าเท่ากับ 1)

$$\text{ราคาหุ้นตลาด} = \frac{\text{มูลค่าโครงการ}}{\text{จำนวนหุ้น}}$$

(สมการที่ 6)

โดยที่ มูลค่าโครงการ = เงินลงทุน (ทุนจดทะเบียน) + NPV

1) หาโดยกำหนดราคาหุ้นจดทะเบียน (PAR)

จำนวนหุ้น = เงินลงทุน (ทุนจดทะเบียน) / ราคา PAR

2) โดยกำหนดจำนวนหุ้นไว้แน่นอน

ราคาหุ้น(จดทะเบียน)= เงินลงทุน(ทุนจดทะเบียน) / จำนวนหุ้น

ส่วนล้ำมูลค่าหุ้น = ราคาหุ้น(ตลาด) – ราคาหุ้น (จดทะเบียน)

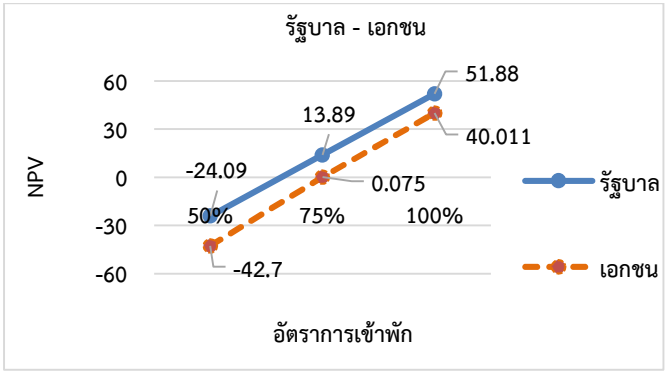
3. การคำนวณงานวิจัย

สมมติฐานของการวิจัย ค่าเช่าบ้านพัก 99 ห้อง , ค่าเช่าบ้านพัก 15,000 บาท/หลัง/เดือน, ราคาที่ดินโครงการ 240,000 บาท/ปี (หากเอกชนเป็นคนลงทุน), ค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 103,000,000 บาท, โฆษณา 0%, ค่าใบขออนุญาต และค่าใช้จ่ายพิเศษ 0%, ออกแบบ และคุมงาน 3%

ตารางที่ 1. สรุปผลตอบแทนที่คาดหวัง (NPV)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล(ล้านบาท)	เอกชน(ล้านบาท)
50%	-24.098	-42.705
75%	13.893	0.075
100%	51.885	40.011

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

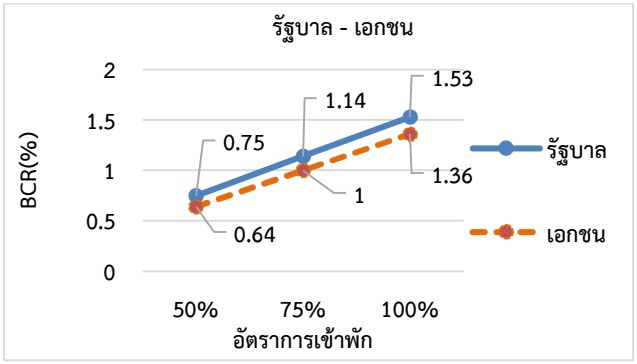


รูปที่ 1. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนที่คาดหวัง (NPV) ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 2. สรุปผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	0.76	0.64
75%	1.15	1.003
100%	1.53	1.366

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

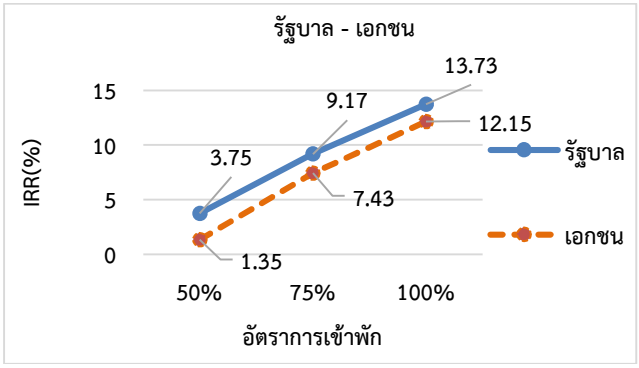


รูปที่ 2. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)
การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 3. สรุปผลตอบแทนภายใน (IRR)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	3.75	1.35
75%	9.18	7.43
100%	13.74	12.15

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

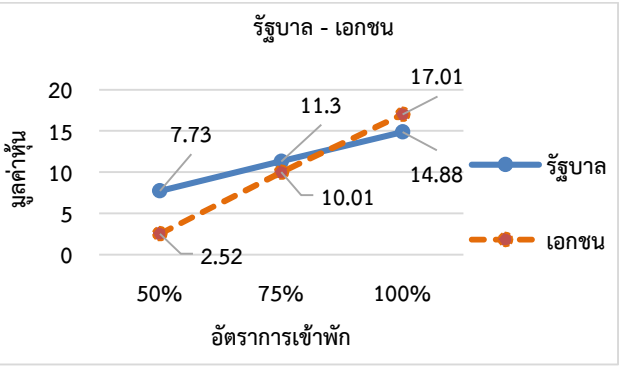


รูปที่ 3. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนภายใน (IRR)
อัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 4. สรุปมูลค่าหุ้น

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	7.73	2.52
75%	11.31	10.01
100%	14.89	17.01

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240เดือน)]

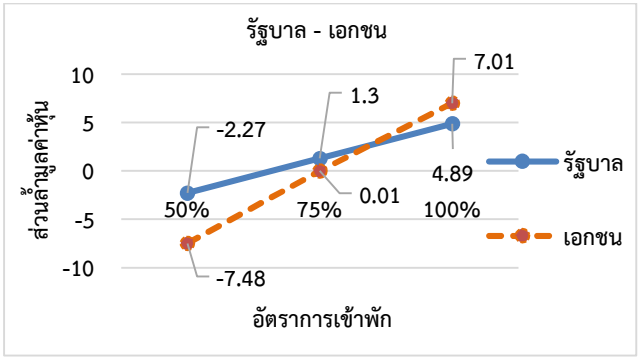


รูปที่ 4. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนมูลค่าหุ้น
ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 5. สรุปส่วนล้ำมูลค่าหุ้น

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	-2.27	-7.48
75%	1.31	0.01
100%	4.89	7.01

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]



รูปที่ 5. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนส่วนล้ำมูลค่าหุ้น ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางสรุปผลจาก MARR = 7.33%

รายการ		กรณีแย่ที่สุด	กรณีปกติ	กรณีดีที่สุด
อัตราการเข้าพัก		50%	75%	100%
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	รัฐบาล	-24,098,068	13,893,548	51,885,164
	เอกชน	-42,705,601	75,621	40,011,754
ระยะเวลาคืนทุน	รัฐบาล	ไม่คืนทุน	12ปี7เดือน	10ปี3เดือน
	เอกชน	ไม่คืนทุน	15ปี8เดือน	12ปี
สรุปผล	รัฐบาล	ไม่คุ้มต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน
	เอกชน	ไม่คุ้มต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน

สรุป จากตารางที่ 1 ,2 ,3 ที่อัตราการกู้ที่ 50% 75% และ100% ที่อัตราการเข้าพัก 50% พบว่า ค่า NPV ติดลบ ค่า BCR น้อยกว่า 1 และค่า IRR มีค่าน้อยกว่าอัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง (15%) จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ที่อัตราการเข้าพัก 75% และ100% พบว่า ค่า NPV เป็นบวก ค่า BCR มากกว่า 1 และค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง (15%) จึงคุ้มค่าต่อการลงทุน

4.สรุปความเป็นไปได้ของโครงการ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในด้านต่างๆของโครงการ โดยโครงการศึกษามีลักษณะ เป็นรูปแบบ Retirement Housing สำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่มีกลุ่มเป็นหมายหลักเป็นผู้สูงอายุ ชาวต่างชาติแบบพำนักระยะยาว (Long-stay) โดยจากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน และการลงทุนพบว่า โครงการศึกษานั้นมีความน่าสนใจในการลงทุนเนื่องจากมีอัตราผลตอบแทนที่น่า พอใจเมื่อเทียบกับมูลค่าของต้นทุนรวมถึงโครงการศึกษามี มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่มากกว่า 0 และยังมีผลตอบแทนที่สามารถสร้างกำไรได้ในอนาคต โดยที่ผู้ที่จะลงทุนในรูปแบบของโครงการศึกษานั้นควร มีความเชี่ยวชาญและบริหารจัดการโครงการอย่างรอบครอบและรัดกุม รวมถึงการ กำหนดราคาขายและต้นทุนการประกอบกิจการให้เหมาะสม เพื่อให้โครงการนั้นประสบความสำเร็จอย่างราบรื่น มั่นคง และยั่งยืน

5. ข้อเสนอแนะ

- การหาทำเลที่ตั้งมีผลต่ออัตราการเข้าพัก ผู้ลงทุนควรศึกษาเกี่ยวกับการหาทำเลที่ตั้งก่อนที่จะทำการก่อสร้าง
- ถ้ามีอัตราการเข้าพักต่ำกว่า 50% คือทำเลที่ทำให้โรงแรมนั้นไม่มีความน่าสนใจในการลงทุน

6.เอกสารอ้างอิง

เกษมศรี ปูชนียวงศ์. (2558). การตระหนักรู้และพฤติกรรมการออมเพื่อเตรียมตัวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ของกลุ่มบุคคลช่วงอายุระหว่าง 25 – 35 ปี.(ปริญญานิพนธ์เศรษฐศาสตร์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ฉัตรชัย วีระเมธีกุล. (2560). แนวทางการพัฒนาที่อยู่อาศัย สำหรับผู้สูงอายุในอนาคต ศึกษาเฉพาะ กรณีที่อยู่อาศัยแบบสร้างสรรค์ของภาคธุรกิจเอกชน. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร, กรุงเทพฯ.

ภราดร ตรรกพฤฒิพันธุ์. (2558). การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาที่พักอาศัย สำหรับผู้สูงอายุ ชาวต่างชาติที่เกษียณอายุ และนักท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ ในจังหวัดเชียงราย. (ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กรมการกงสุล. (2560). วีซ่าเกษียณอายุ 1 ปี Non-Immigrant "O-A". ค้นหาจาก www.consular.go.th

ศูนย์ข้อมูลข่าวสารอาเซียน กรมประชาสัมพันธ์. (2560). Medical Hub ยกระดับไทยสู่ศูนย์กลางสุขภาพโลก. ค้นหาจาก http://www.aseanthai.net/sub_convert.php?nid=7631

ศูนย์วิจัยธนาคารกสิกรไทย. (2561). ธุรกิจดูแลผู้สูงอายุในไทย. ค้นหาจาก https://kasikornbank.com/international-business/th/Thailand/IndustryBusiness/Documents/201811_Thailand_Elderly_ TH.pdf

Mild Home Elderly Care Resort : https://www.thaielder.com/nursinghome/view/514/mild_home_elderly_care_resort

Carrera. (2010), Lunt. (2010), Sigh. (2013). Health Tourism: Conceptual Framework and Insights from the Case of a Spanish Mature Destination.

DESA, U. (2019). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2019: Highlights.

Huguet, J. W., & Chamratrithirong, A. (2014). Thailand migration report 2014: United Nations Thematic Working Group on Migration in Thailand Bangkok.

Wu, S. & Green, A. (2010). Projection of Chronic Illness Prevalence and Cost Inflation. RAND Corporation.

Articles

Connell, J. (2013). Contemporary medical tourism: Conceptualisation, culture and commodification. Tourism management, 34, 1-13.

Shirley, A. (2019). The Wealth Report 2019: The Global Perspective on Prime Property and Wealth (Vol. 13): Knight Frank

Lee, S. C., Barker, S., & Kandampully, J. (2003). Technology, service quality, and customer loyalty in hotels: Australian managerial perspectives. Managing Service Quality: An International Journal.

Padilla-Meléndez, A., & Del-Águila-Obra, A.-R. (2016). Health Tourism: Conceptual Framework and Insights from the case of a Spanish mature destination. Tourism & Management Studies, 12(1), 86-96.

Yu, J. Y., & Ko, T. G. (2012). A cross-cultural study of perceptions of medical tourism among Chinese, Japanese and Korean tourists in Korea. Tourism management, 33(1), 80-88.

Porter, M. E. (1989). How competitive forces shape strategy. In Readings in strategic management (pp. 133-143): Springer.

Fritsch, T. (2007). A strategic analysis of US development opportunities for spectrum seniors housing. Faculty of Business Administration-Simon Fraser University,

Bart Van den Mooter. (2017, 2 November). Medical Tourism in Asia-Pacific Growing

Rapidly. Retrieved from http://www.brinknews.com/medical-tourism-in-asiapacific-growing-rapidly/

Worldometer. (2019). Current World Population. Retrieved from https://www.worldometers.info/world-population/

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสำหรับการออกแบบระบบระบายน้ำ

Application of unmanned aerial vehicle technology for drainage system design

ภัทรกร พึ่งตนเอง[1] ธนชล ยศแสง[2] วรเมธ แก้วพลตรัง[3] และ ดร. อนุจิตร ภูมิพันธ์[4,*]
[1,2,3,4] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64103846@up.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาน้ำท่วมและน้ำขังเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อชุมชนและโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบระบบระบายน้ำโดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการเก็บข้อมูลภูมิประเทศ พร้อมทั้งนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape เพื่อสร้างแบบจำลองภูมิประเทศเชิงดิจิทัล (Digital Elevation Model: DEM) และแผนที่ ภาพถ่ายทางอากาศ (Orthophoto)

ข้อมูลดังกล่าวถูกนำไปวิเคราะห์การไหลของน้ำโดยใช้ Autodesk Civil 3D เพื่อศึกษาทิศทางการระบายน้ำ พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำท่วม และวางแผนออกแบบโครงสร้างรางระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคโนโลยี UAV สามารถช่วยให้การเก็บข้อมูลพื้นที่ทำได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ลดระยะเวลาในการสำรวจสนามและเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบระบายน้ำให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริง และสามารถช่วยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการวางแผนป้องกันและบรรเทาปัญหาน้ำท่วมในอนาคต

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, ระบบระบายน้ำ, การวิเคราะห์เชิงพื้นที่

Abstract

Now flooding and waterlogging are significant issues that impact communities and infrastructure, particularly in rapidly developing areas. This research aims to study and design drainage systems using unmanned aerial vehicle (UAV) technology to collect topographic data. The collected data is processed using Agisoft Metashape software to generate a digital elevation model (DEM) and an orthophoto map.

The processed data is then analyzed using Autodesk Civil 3D to study water flow patterns, identify flood-prone areas, and design efficient drainage structures. The study results indicate that UAV technology enables precise and rapid data collection, reducing field survey time while enhancing the accuracy of the generated models.

The findings from this study can serve as a guideline for designing and developing drainage infrastructure that aligns with real-world environmental conditions. Additionally, they can assist relevant agencies in planning flood prevention and mitigation strategies for the future.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Drainage System, Spatial Analysis.

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันปัญหาน้ำท่วมขังเป็นปัญหาที่พบบ่อยมากในพื้นที่ราบลุ่ม ที่มีความชันสูง น้ำท่วมมักเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ฝนตกหนัก และระบบระบายน้ำไม่เพียงพอ ไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวันยังก่อให้เกิดปัญหาน้ำขังเน่าเหม็นในพื้นที่ต่างๆ อุบัติเหตุทางจราจร และการผุพังของทางเดินเท้าที่เกิดจากปัญหาน้ำท่วม

การสำรวจทางระบายน้ำบางพื้นที่มีข้อจำกัดในการเข้าถึง เช่น พื้นที่ที่มีความลาดชัน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าไปสำรวจเองได้ทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานในการเก็บข้อมูล จึงต้องประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในการสำรวจพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยากในการผลิตภาพถ่ายออร์โธสี และแบบจำลองระดับสูง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความชันของพื้นที่ การสำรวจทางระบายน้ำ ดังนั้น การจัดทำแบบจำลองระดับสูงด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) จะสามารถตอบสนองต่อภารกิจได้อย่างเหมาะสม มีความถูกต้องและลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานในพื้นที่ดำเนินการ

ด้วยสาเหตุข้างต้น ทางผู้จัดทำจึงมีความต้องการศึกษาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับและแผนที่ความละเอียดสูง เพื่อสำรวจทางระบายน้ำ ที่สามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วและไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมอีกในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1) เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

1.2.2) เพื่อจัดทำแผนที่ความละเอียดสูงจากภาพถ่ายออร์โธสี (Orthophoto) และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (digital elevation model : DEM)

1.2.3) เพื่อสำรวจหาทิศทางการไหลของน้ำในพื้นที่ต่างระดับ

1.2.4) เพื่อนำแบบจำลองที่ได้จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับไปพัฒนาและวางแผนออกแบบรางระบายน้ำในอนาคตได้

1.3 ขอบเขต

1.3.1) พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา

บริเวณมหาวิทยาลัยพะเยา มีลักษณะพื้นที่ มีระดับความสูงที่แตกต่างกัน, มีจุดที่เกิดปัญหาน้ำท่วมขังและมรโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน ทางเท้า อาคาร ที่อาจได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม

1.3.2) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ อาคาศยานไร้คนขับหรือโดรนและระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS)

- การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) และ แผนที่ภาพถ่าย Ortho Photo

1.3.3) เทคโนโลยีที่ใช้ในการทำโครงงาน

- ซอฟต์แวร์ในการวางแผนเก็บข้อมูล ได้แก่ Pix4D,DJI GO 4 และUAV Forecast

- ซอฟต์แวร์ในการประมวลผลข้อมูล ได้แก่ Agisoft Meta shape และ Autodesk civil 3D

1.3.4) ข้อจำกัดของโครงการ

- ขั้นตอนการเก็บข้อมูล เช่น แบตเตอรี่ที่มีระยะเวลาจำกัดและสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมต่อการบิน

- ขั้นตอนในการประมวลผลข้อมูล เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลใช้ระยะเวลานาน,ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีไฟล์ที่ใหญ่และไม่สามารถประมวณผลพร้อมกันได้ในครั้งเดียว

1.4 ประโยชน์

1.4.1) ผู้จัดทำได้ศึกษาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการถ่ายภาพ

1.4.2) ได้ภาพถ่ายออร์โธสีและแผนที่ความละเอียดสูง ไปใช้ในการทำแบบจำลองระดับสูงเพื่อหาชั้นความสูง

1.4.3) ได้ศึกษาและสำรวจการไหลของน้ำในระดับความชันที่แตกต่างกัน

1.4.4) ผู้ศึกษา สามารถนำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธสี และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ไปใช้ในการศึกษา วิเคราะห์ วางแผน เพื่อการพัฒนาที่ดินในอนาคตได้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

อากาศยานไร้คนขับ หรือ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำอยู่บนเครื่อง เป็นอากาศยานที่ไร้คนขับหรือนักบินแต่สามารถควบคุมได้ อากาศยานไร้คนขับมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบและเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไป ตามหลักการแล้วอากาศยานไร้คนขับก็คือ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ควบคุมจากระยะไกล ใช้การควบคุมอัตโนมัติซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกล และการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเองซึ่งต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนและมีการติดตั้งไว้ในอากาศยาน กล่าวได้ว่าอากาศยานไร้คนขับคือเครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้นักบินประจำอยู่บนอากาศยาน อาจมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงทั้งกล้องถ่ายภาพในเวลากลางวัน (electro optical) ละกล้องอินฟาเรต (infrared sensor) ที่สามารถบันทึกภาพระยะไกลได้ และแพร่ภาพสัญญาณมายังจอภาพที่สถานีภาคพื้นดินในเวลาที่ใกล้ความจริงที่สุด ทำให้ผู้บังคับสามารถเห็นภาพในเวลาที่ใกล้ความเป็นจริงที่สุด

2.1.1 ข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติก่อนจะทำการบิน

- ตรวจสอบว่าอากาศยานอยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานในการบินได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ ซึ่งรวมถึงตัวระบบควบคุมอากาศยานและสภาพอากาศ ณ ตอนนั้น

- ทำการศึกษาพื้นที่และชั้นของห้วงอากาศนั้นก่อนจะทำการบิน

- ต้องได้รับการอนุญาตจากเจ้าของพื้นที่ก่อนจะทำการบิน

- มีแผนฉุกเฉินและแผนสำหรับกรณีเกิดอุบัติเหตุ การรักษา และการแก้ปัญหาเฉพาะหน้ากรณีไม่สามารถบังคับอากาศยานได้

- ในการสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดินอย่างน้อย 3-5 จุด ต่อการประมวณผลภาพถ่าย 1 เที่ยวบินและต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยระยะห่างระหว่างจุดไม่เกิน 500-2000 เมตร

2.1.2 ข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติระหว่างทำการบิน

- ห้ามทำการบินในลักษณะที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต ร่างกาย ทรัพย์สินและไม่รบกวนความสงบสุขของบุคคลอื่น

- แนวการบินขึ้นลงของอากาศยานจะต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง

- ห้ามทำการบินเข้าไปในบริเวณเขตห้าม เขตกำกัด และเขตอันตราย ตามที่ประกาศในเอกสารแถลงข่าวการบินของประเทศไทย หรือ AIP Thailand สถานที่ราชการ หน่วยงานของรัฐ โรงพยาบาล เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากหน่วยงานเจ้าของพื้นที่

- ผู้บังคับหรือปล่อยอากาศยานต้องสามารถมองเห็นอากาศยานได้ตลอดเวลาในการทำการบิน

- แนวการบินขึ้นลงของอากาศยานจะต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง

- ห้ามทำการบินภายในระยะเก้ากิโลเมตร (ห้าไมล์ทะเล) จากสนามบินหรือที่ขึ้นลงชั่วคราวของอากาศยานเว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากเจ้าของหรือผู้ดำเนินการสนามบิน

- ห้ามทำการบินโดยใช้ความสูงเกินเก้าสอบเมตร (สามร้อยฟุต) เหนือพื้นดิน
- ห้ามทำการบินเข้าใกล้หรือเข้าไปในเมฆ
- ห้ามทำการบินหลังพระอาทิตย์ตก เนื่องจากจะไม่สามารถมองเห็นอากาศยานได้อย่างชัดเจน
- ห้ามส่งหรือพาวัตถุอันตรายตามที่กำหนดในกฎกระทรวงหรืออุปกรณ์ปล่อยแสงเลเซอร์ติดไปกับอากาศยาม
- ห้ามทำการบินโดยมีระยะห่างในแนวราบกับบุคคล ยานพาหนะ สิ่งก่อสร้าง หรืออาคารน้อยกว่าสามสิบเมตร (หนึ่งร้อยฟุต)
- ห้ามทำการบินละเมิดสิทธิส่วนบุคคลของผู้อื่น
- ห้ามทำการบินโดยก่อให้เกิดความเดือดร้อน ความรำคาญ แก่ผู้อื่น

2.1.3 ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ

- โดรนปีกหมุนหลายใบพัด (Multirotor Drones)

ทำงานตั้งแต่ 3, 4, 6 และ 8 ใบพัดหลัก เคลื่อนที่ขึ้น-ลง ในแนวดิ่ง เป็นโดรนที่พบเห็นบ่อยมากที่สุดเคลื่อนตัวได้รวดเร็วและคล่องแคล่ว ไม่จำเป็นต้องใช้ลานบินแต่มีข้อสียคือขีดความเร็วของการบินน้อยกว่าโดรนประเภทอื่นๆ



รูปที่ 1 อากาศยานประเภทปีกหมุน รุ่น DJI Phantom 4 Pro

- โดรนแบบปีกคงที่ (Fixed-Wing Drones)

มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องบินทำให้ต้องอาศัยพื้นที่โล่งกว้างในการขึ้นและลงจอดเหมาะกับการใช้งานเพื่อสำรวจลาดตระเวนในพื้นที่กว้างใหญ่ บินด้วยความเร็วสูง ทนต่อแรงลม



รูปที่ 2 อากาศยานประเภทปีกคงที่

- โดรนแบบไฮบริด (Hybrid Drones)

ผสมผสานระหว่างโดรนปีกคงที่และหลายใบพัดเพื่อให้ได้ประโยชน์จากทั้งสองแบบ



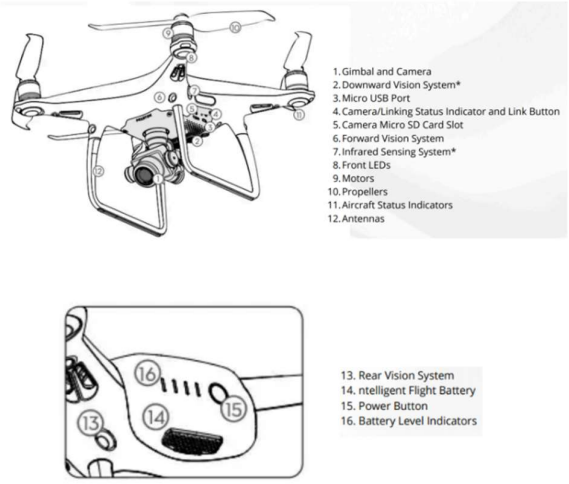
รูปที่ 3 อากาศยานแบบไฮบริด

2.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในการผลิตแผนที่ภาพถ่ายออร์โธสีและแบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข ในพื้นที่เขตพัฒนาที่ดิน (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจ กล่าวว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ ในการจัดระบบอนุรักษ์ดินและน้ำโดยอาศัยฐานข้อมูลเชิงพื้นที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลการใช้ประโยรชน์ที่ดิน ซึ่งต้องมีความถูกต้องเป็นปัจจุบัน และสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อจะสามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือการเข้าปฏิบัติงานในพื้นที่เป็นไปได้ยากเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการผลิตภาพถ่ายออร์โธสี และแบบจำลองระดับสูง ซึ่งจะต้องมีการควบคุมปัจจัยในการบินถ่ายภาพ การประมวลผลภาพและการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน FGDC ผลผลิตที่ได้เป็นแผนที่ที่มีความละเอียดสูง มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน และมีความเป็นปัจจุบัน โดยได้ภาพถ่ายออร์สีเชิงเลข มีความละเอียดสูง (0.1 เมตร) และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Surface Model: DSM) (0.3 เมตร) ซึ่งเมื่อเทียบกับภาพถ่ายออร์โธสี (0.5 เมตร) และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (5 เมตร) ที่ได้จากการจัดทำแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จะแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างชัดเจน เช่น การเปลี่ยนชนิดพืช การเปลี่ยนแปลงพื้นที่เกษตรกรรม สามารถนำไปใช้ในการส่งเสริมการปรับปรุงข้อมูลการปลูกพืช สำหรับภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน

2.3 โดรนที่ใช้งานในการศึกษาครั้งนี้

อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นรุ่น DJI Phantom 4 Pro (ดังรูปที่ 5) เป็นอากาศยานไร้คนขับสี่ใบพัด มีระบบ OcuSync 2.0 ที่ช่วยส่งสัญญาณไหลกลับมารีโมทได้อย่างลื่นไหลไม่มีสะดุดทำให้ภาพที่ดูบนจอนั้นชัดเจน มีระบบกันสั่นไหว Gimbal 3 แกน เซนเซอร์กล้อง CMOS ขนาด 1 นิ้ว ความละเอียด 20 ล้านพิกเซล มีระบบเซ็นเซอร์กันชนรอบด้านในระยะ 30 เมตร ถ่ายวิดีโอความละเอียดสูงถึง 4K@60fps และถ่าย Slow Motion ได้ถึง 1920x1080@120fps บินด้วยความเร็วสูงสุด 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยบินขึ้นสูงสุดได้ไม่เกิน 500 เมตร บินได้ไกลถึง 7 กิโลเมตร ใช้เวลาประมาณ 1.10 ชั่วโมงในการชาร์จ บินได้นานถึง 30 นาที รวมไปถึงยังมีโหมดการบินอัจฉริยะ Tapfly ที่สั่งโดรนไปตามจุดที่กำหนดบนหน้าจอ ActiveTrack สำหรับการบินติดตามวัตถุหรือเป้าหมายที่ต้องการ



รูปที่ 4 โดรนที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนประกอบของโดรนที่ใช้ศึกษา

1.กล้อง และ Gimbal, 2. ระบบ Vision System, 3. ช่องต่อ Micro USB port, 4. ไฟแสดงสถานะกล้อง,5. ช่องใส่การ์ด Micro SD, 6. ระบบการมองเห็นด้านหน้า, 7. ระบบตรวจจับอินฟราเรด, 8. ไฟ LED ด้านหน้า ,9. มอเตอร์, 10. ใบพัด, 11. ตัวบ่งชี้สถานะของโดรน, 12. เสาอากาศ, 13. ระบบการมองเห็นด้านหลัง, 14. แบตเตอร์รี่,15. ปุ่มเปิด-ปิด, 16. ตัวบ่งชี้ระดับพลังงานของแบตเตอร์รี่

2.4 การบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูลและบันทึกภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับสามารถทำได้โดยรูปแบบการบันทึกจะขึ้นอยู่กับชนิดของกล้องและเซ็ฯเซอร์ที่ติดตั้ง ซึ่งรองรับการบันทึกทั้งถาพนิ่งและวิดีโอ ตำแหน่งของโดรนจะถูกบันทึกผ่านระบบ GPS ส่วนการเคลื่อนไหวและเอียงตัวจะถูกบันทึกผ่านเซ็นเซอร์ IMU

2.5 การประมวลผลภาพด้วยซอฟแวร์

การประมวลผลภาพโดยใช้โปรแกรมต้องการข้อมูลนำเข้า ซึ่งรวมถึงข้อมูลภาพ (Image File) และข้อมูลที่เกี่ยวกับตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับ แต่หากต้องการแผนที่ที่มีความละเอียดและความถูกต้องสุง จำเป็นต้องนำจุดบังคับเป้าภาพถ่าย (Photo Control Point) เพื่อใช้ในการประมวลผล กระบวนการประมวลผลจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ โดยจะอิงจากหลักการจับคู่ภาพ และใช้เทคนิคการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เพื่อคำนวณค่าองค์ประกอบการจัดตำแหน่งภายนอกของภาพทุกภาพ และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นภาพออร์โธ (Orthophoto) แบบจำลองความสูง (Digital Surface Model: DSM) และข้อมูลความสูงแบบ 3 มิติ (3D Point Cloud)

2.6 การรังวัดภาคพื้นดิน

การรังวัดพิกัดของจุดควบคุม (Global Navigation Satellite System: GNSS) คือระบบนำทางด้วยดาวเทียม โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณ เพื่อประมวณผลเชิงตำแหน่ง ณ จุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณตั้งอยู่

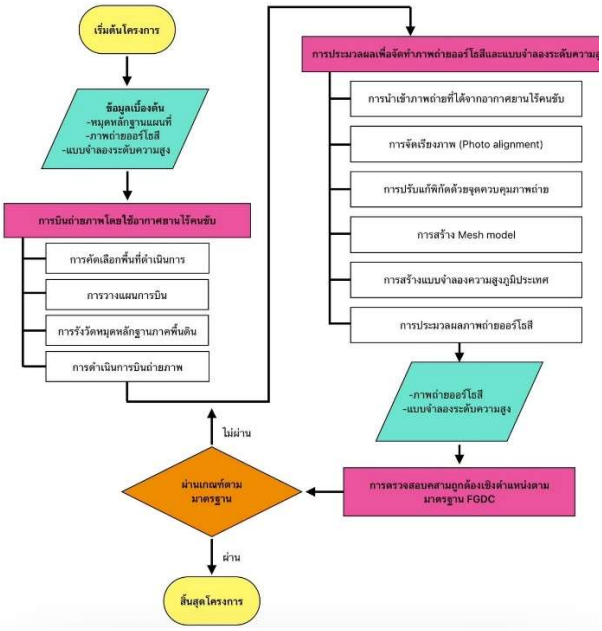
การรังวัดแบบจลน์ทันทีทันใด (Real-time Kinematic: RTK) จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ คือ ค่าพิกัดตำแหน่งได้ทันทีในสนาม โดยการทำงานหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ ข้อมูลจากทั้งสองจุดต้องนำมาประมวณผลร่วมกัน จึงต้องใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้งานไม่เกิน 15 กิโลเมตร



รูปที่ 5 การรังวัดแบบจลน์ทันทีทันใด (Real-time Kinematic: RTK)

วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานสำรวจทางระบายน้ำเพื่อออกแบบระบบระบายน้ำ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับนั้น จำเป็นต้องมีการวางแผนขั้นตอนการบินถ่ายภาพที่ถูกต้อง และคำนึงถึงข้อกำหนดในการใช้อากาศยานไร้คนขับในพื้นที่เป้าหมาย



รูปที่ 6 แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทั้งหมด

การสร้างแผนที่ Ortho Photo และแบบจำลองระดับเชิงเลข (DEM) ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอน คือ

1.การบินถ่ายภาพด้วย DJI Phantom 4 Pro V2 พื้นที่ศึกษาใช้บริเวณมหาวิทยาลัยพะเยา โดยวางแผนการบินด้วย Application PIX4D บนระบบปฏิบัติการ IOS กำหนดความสูงของการบินเท่ากับ 70 เมตร ระยะ Over lab ของภาพ 60 % ใช้กลิ้งที่ติดมากับ UAV ความละเอียด 20 ล้านพิกเซล

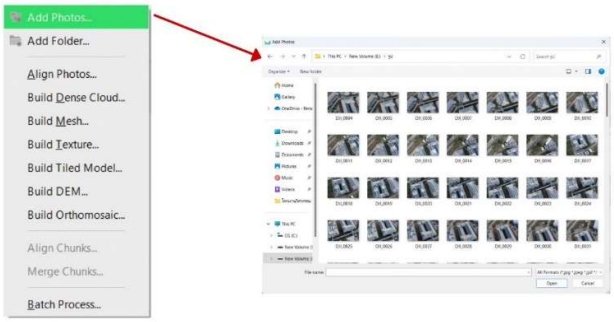
2.การรังวัดจุดควบคุมภาพ (GCP) การศึกษาครั้งนี้ใช้จุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network)

3.การประมวลผลภาพ โดยทำการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV โดยใช้ Agisoft Metashape ประมวลผลภาพ สร้าง Ortho Photo ขนาด GSD 2.0 cm. และ DSM ที่มีความละเอียด 50 cm.

3.1 การประมวลผลเพื่อจัดทำแบบจำลองระดับสูง

3.1.1 การนำเข้าภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพ (Add Photo)

ขั้นตอนแรกนำเข้าภาพถ่ายที่ได้เข้าสู่โปรแกรมเพื่อเตรียมขั้นตอนการนำเข้าค่าพิกัด ดังแสดงในรูป

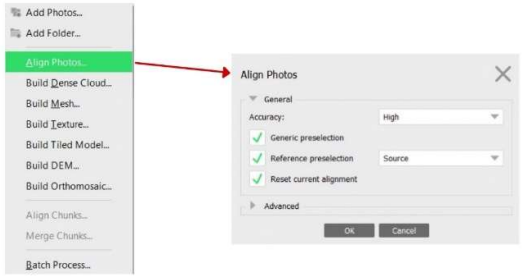


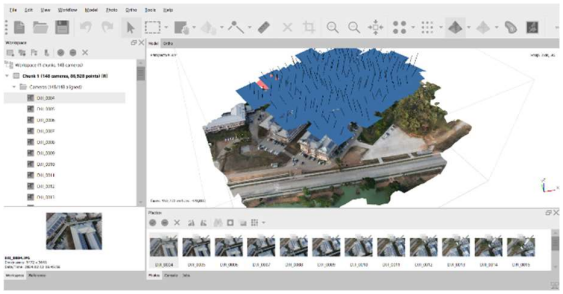
รูปที่ 7 การนำเข้าภาพถ่ายที่ได้เข้าสู่โปรแกรม

3.1.2 การจัดเรียงภาพ (Photo Alignment)

ขั้นตอนนี้ อาศัยค่าพิกัดและลำดับของรูปภาพที่บันทึกไว้ในขณะทำการถ่ายภาพของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยทำการตั้งค่าในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 7 ตามคำแนะนำของโปรแกรม

Accuracy หมายถึง ความแม่นยำในการประมาณตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพเลือก High หรับการใช้ภาพถ่ายที่ไม่ผ่านการบีบอัดข้อมูล ถ้าเลือกความแม่นยำต่ำกว่า High ค่าความแม่นยำจะลดลงครั้งละ 4 เท่า



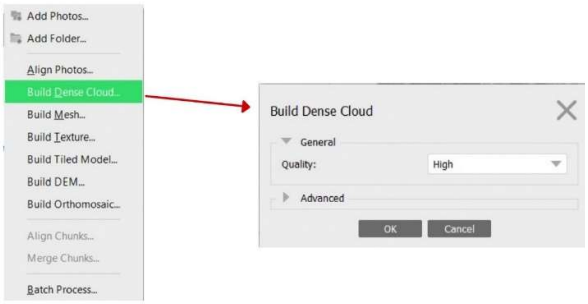


รูปที่ 8 การจัดเรียงภาพ (Photo Alignment) โดยอาศัยพิกัดที่ได้จากภาพ

3.1.3 การสร้างพอยท์คราวด์แบบหนาแน่น (Dense point cloud)

การสร้างพอยท์คราวด์แบบหนาแน่น (Dense point cloud) ซึ่งเป็นกลุ่มของจุดสามมิติที่เก็บค่าตำแหน่งของวัตถุในพิกัด X, Y, Z ทั้งนี้ปัจจัยหลักในกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับการคำนวณค่าตำแหน่งของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย โดยขั้นตอนในการประมวลผลสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่นจะเป็นการเพิ่มจำนวน Tie point หากติดตั้งพารามิเตอร์ในการประมวลผลในระดับสูง หรือตั้งค่าความละเอียดในการประมวลผลที

ระดับสูง ทำให้ข้อมูลมีองค์ประกอบรายละเอียดหนาแน่น แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก และพอยด์คราวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างจากภาพถ่ายอย่างน้อย 3 ภาพ เพื่อควบคุมคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่ง



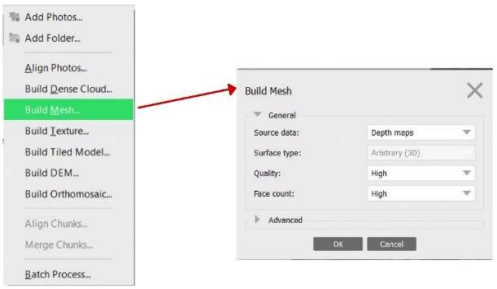


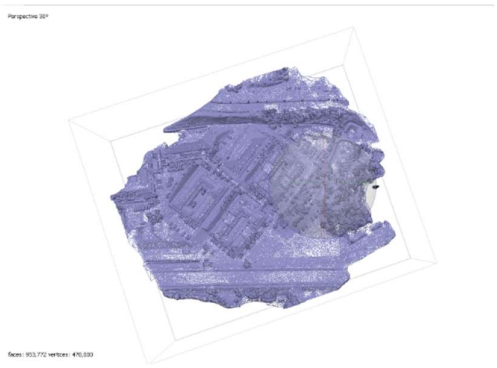
รูปที่ 9 พอยท์คราวด์แบบหนาแน่น (Dense point cloud)

3.1.4 การสร้าง Mesh Model

Mesh คือ ข้อมูลพื้นผิวที่มีโครงแบบเวกเตอร์ ที่ใช้แสดงลักษณะของรูปร่างของโมเดลที่ประกอบด้วยพื้นผิวของโมเดล ยอดมุม และขอบมุมโมเดล โดยจะนำพอยท์คลาวด์มาประมวลผลสร้าง Mesh เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพเชิงตำแหน่ง แต่ทั้งนี้คุณภาพในการประมวลผล สร้าง Mesh นั้นจะขึ้นกับคุณภาพของพอยท์คราวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนก่อนหน้า

การสร้างข้อมูลพื้นผิว Mesh ควรเลือกพื้นผิว (Surface type) แบบ Arbitrary ซึ่งเหมาะกับพื้นผิวแบบสามมิติ ในส่วนของข้อมูลที่จะนำมาสร้าง Mesh ควรใช้ข้อมูล Dense cloud จากขั้นตอนที่ 3.5.3 แบบ High เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลพื้นผิว Mesh

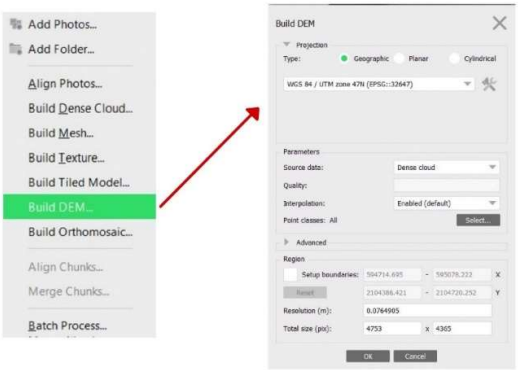


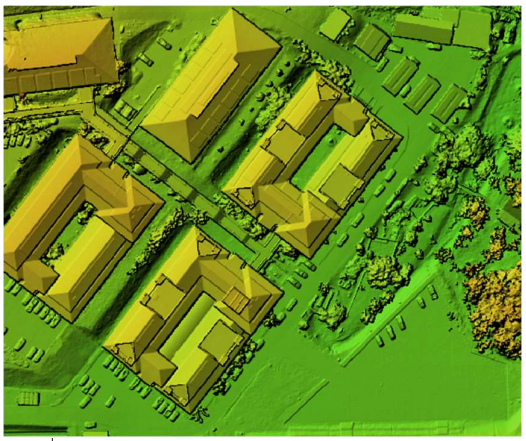


รูปที่ 10 การสร้าง Mesh Model

3.1.5 การสร้างแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)

เป็นกระบวนที่สำคัญในด้านการสำรวจ ซึ่งใช้เทคโนโลยีต่างๆ เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติที่แสดงถึงความสูงของพื้นผิวโลก โดยรวมถึงสิ่งก่อสร้างและวัตถุที่อยู่บนพื้นผิว เช่น อาคาร ต้นไม้ และโครงสร้างต่างๆ การสร้างแบบจำลองระดับสูง (DSM) เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการศึกษาและวิเคราะห์สภาพภูมิประเทศ การพัฒนาเมือง การจัดการสิ่งแวดล้อม และการสำรวจทางน้ำเพื่อออกแบบระบบรางระบายน้ำ





รูปที่ 11 แบบจำลองระดับสูง (Digital surface model: DSM)

3.1.6 แผนที่ภาพถ่าย Orthophoto

ภาพถ่ายออโธ (Orthophoto) คือภาพถ่ายทางอากาศที่ผ่านการปรับแก้ความผิดเพี้ยนทางเรขาคณิต (Geometric Distortion) และปรับค่าตามภูมิประเทศให้ถูกต้อง ทำให้ทุกจุดบนภาพมีสัดส่วนและมาตราส่วนที่ถูกต้องเหมือนแผนที่

หลักการในการแบ่งพื้นที่เคราะห์

- ลดความซับซ้อนของข้อมูล เพราะพื้นที่มีขนาดใหญ่อาจจะมีข้อมูลที่หนักเกินไป
- สามารถหาแนวทางการพัฒนาโครงสร้างระบบระบายน้ำในแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แบ่งออกเป็น 6 พื้นที่ดังรูปที่ 12-17



รูปที่ 12 อาคารสงวนเสริมศรี, โรงเรียนสาธิต, หอพักอาจารย์



รูปที่ 13 ลานจอดรถอาคาร 99ปี, หอพักนักศึกษา, อาคารเวียง



รูปที่ 14 ตึกคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, อ่างหลวง, อาคารภูกามยาว



รูปที่ 15 อาคารเรียนรวม, ตึกอธิการบดี, อาคารเรียน 99ปี



รูปที่ 16 ตึกคณะพยาบาลศาสตร์, หอประชุมพญางำเมือง



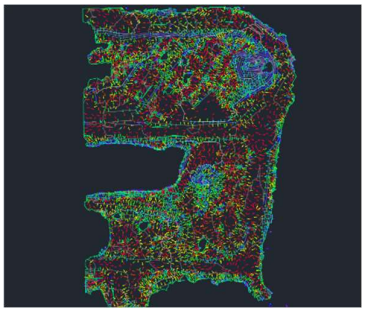
รูปที่ 17 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์, สิ่งแวดล้อม, สหเวช, ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

4.การตรวจสอบความถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจาก UAV หลังจากประมวลผลปรับแก้ภาพด้วยจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GNSS) โดยใช้ค่า GCP ที่เก็บโดยการรังวัดแบบจลน์ทันทีทันใด (Real-time Kinematic: RTK) มาปรับแก้โดยให้ค่า Error ไม่เกิน 1-3 เซนติเมตร ในงานสำรวจภูมิประเทศสำหรับออกแบบระบบระบายน้ำและวิศวกรรมโยธา



รูปที่ 18 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน GCP

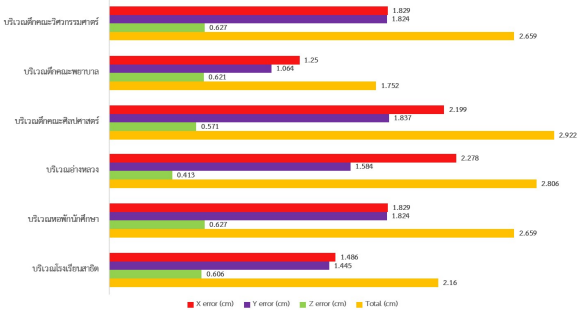
5.วิเคราะห์การไหลของน้ำ จากแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (DEM) โดยใช้ซอฟแวร์ Autodesk Civil 3D หาทิศทางการไหลของน้ำ



รูปที่ 19 วิเคราะห์ทิศทางการไหลน้ำ

ผลการศึกษา

จากการประมวณผลภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่มี GSD เท่ากับ 2 cm โดยแบ่งการประมวณผลภาพเป็น 6 พื้นที่และปรับแก้ความคาดเคลื่อนของพิกัดจุดควบคุมภาพ (GCP) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

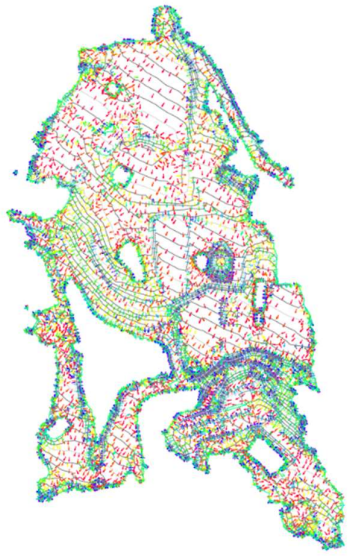


รูปที่ 20 ค่าความคาดเคลื่อน X,Y,Z และ Total

ตารางที่ 1 แสดงทิศทางการไหลของน้ำแบ่งระดับความเร็วของน้ำตามสี

สีของลูกศร	ช่วงความเร็วการไหล	ลักษณะของการไหล
แดงเข้ม - แดงสด	มากกว่า 3 m/s	ความเร็วสูงมาก
ส้ม - แดงอ่อน	1.5 ถึง 3.0 m/s	น้ำไหลเร็ว
เหลือง	0.8 ถึง 1.5 m/s	การไหลปานกลาง
เขียว	0.3 ถึง 0.8 m/s	การไหลช้า
ฟ้า - น้ำเงิน	น้อยกว่า 0.3 m/s	การไหลต่ำ

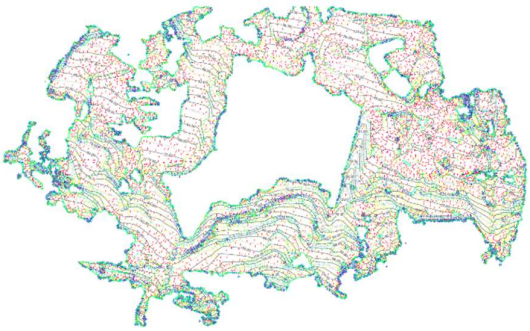
โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 6 พื้นที่ ดังรูปที่ 21-26



รูปที่ 21 พื้นที่ที่ 1 บริเวณอาคารสงวนเสริมศรี, โรงเรียนสาธิต, หอพักอาจารย์



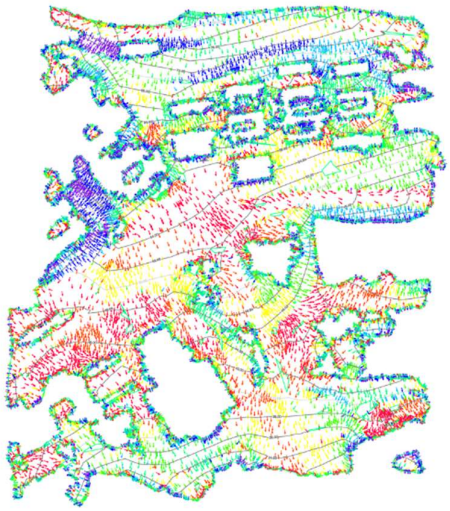
รูปที่ 22 พื้นที่ที่ 2 บริเวณลานจอดรถอาคาร 99ปี, หอพักนักศึกษา, อาคารเวียง



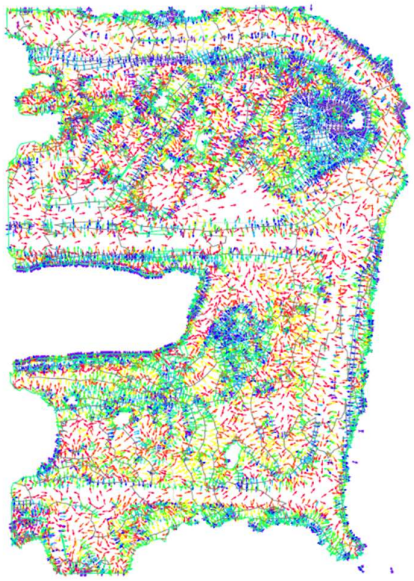
รูปที่ 23 พื้นที่ที่ 3 บริเวณตึกคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, อ่างหลวง, อาคารภูกามยาว



รูปที่ 24 พื้นที่ที่ 4 บริเวณอาคารเรียนรวม, ตึกอธิการบดี, อาคารเรียน 99ปี



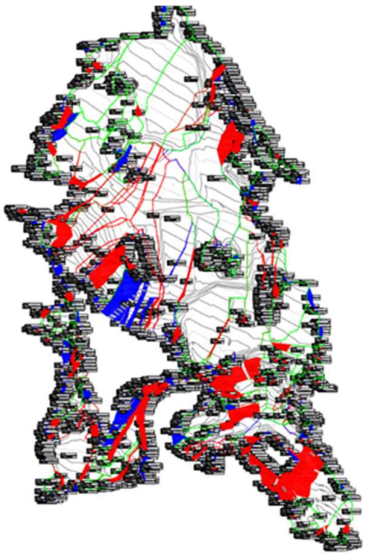
รูปที่ 25 พื้นที่ที่ 5 บริเวณตึกคณะพยาบาลศาสตร์, หอประชุมพญางำเมือง



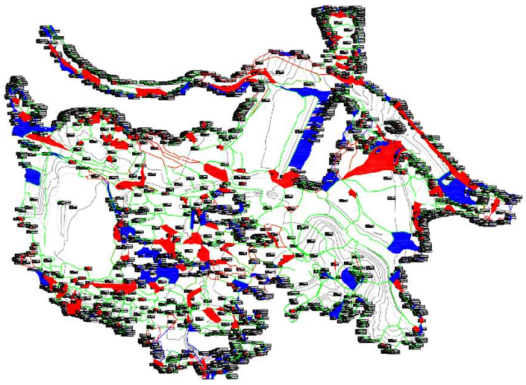
รูปที่ 26 พื้นที่ที่ 6 บริเวณตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์, สิ่งแวดล้อม, สหเวช, ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่รับน้ำของแต่ละพื้นที่ (Watershed Analysis)
ความหมายของแต่ละสี

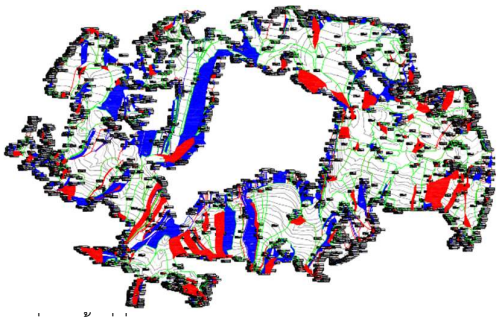
1. สีแดง คือ พื้นที่สะสมน้ำ หรือบริเวณที่อาจเกิดน้ำท่วมขังได้ง่าย
2. สีน้ำเงิน คือ จุดต่ำสุดของพื้นที่รับน้ำ หรือแหล่งน้ำที่สามารถระบายน้ำออกจากพื้นที่
3. สีเขียว คือ เส้นทางไหลของน้ำ หรือขอบเขตของพื้นที่รับน้ำ



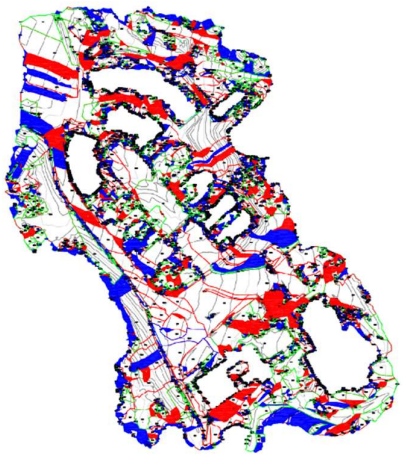
รูปที่ 27 พื้นที่ที่ 1 บริเวณอาคารสงวนเสริมศรี, โรงเรียนสาธิต, หอพักอาจารย์



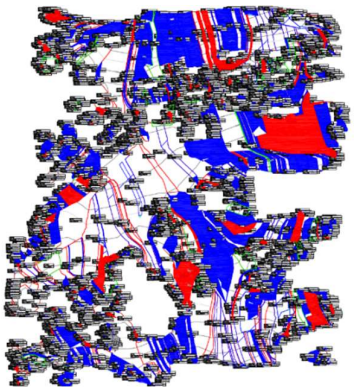
รูปที่ 28 พื้นที่ที่ 2 บริเวณลานจอดรถอาคาร 99ปี, หอพักนักศึกษา, อาคารเวียง



รูปที่ 29 พื้นที่ที่ 3 บริเวณตึกคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, อ่างหลวง, อาคารภูกามยาว



รูปที่ 30 พื้นที่ที่ 4 บริเวณอาคารเรียนรวม, ตึกอธิการบดี, อาคารเรียน 99ปี



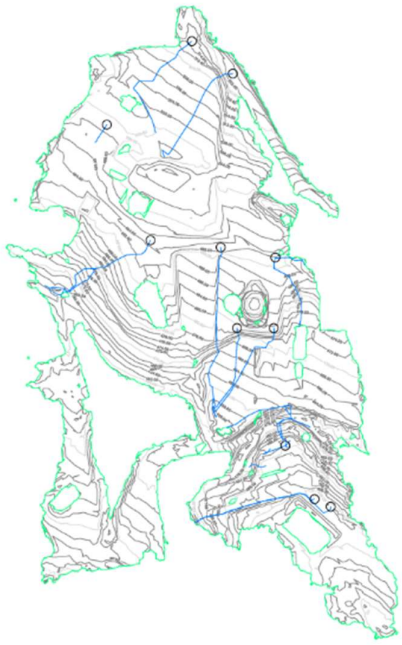
รูปที่ 31 พื้นที่ที่ 5 บริเวณตึกคณะพยาบาลศาสตร์, หอประชุมพญางำเมือง



รูปที่ 32 พื้นที่ที่ 6 บริเวณตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์, สิ่งแวดล้อม, สหเวช, ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

การจำลองปล่อยน้ำในแต่ละพื้นที่ (Water Drop)

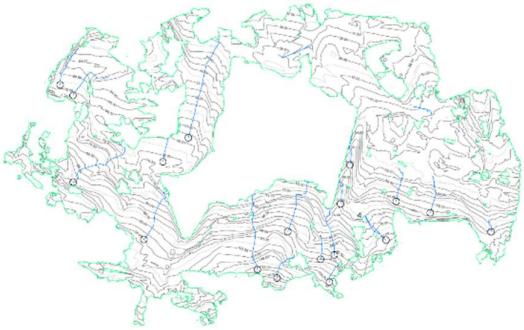
จากการจำลองปล่อยน้ำแบบกายภาพพบว่าทิศทางการไหลของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงไหลลงไปพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ ซึ่งความเร็วการไหลของน้ำ ขึ้นอยู่กับความชัน ดังรูป



รูปที่ 33 พื้นที่ที่ 1 บริเวณอาคารสงวนเสริมศรี, โรงเรียนสาธิต, หอพักอาจารย์



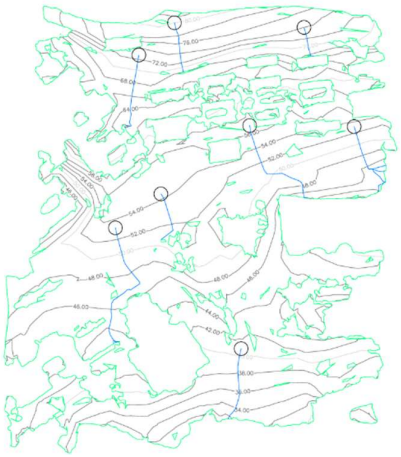
รูปที่ 34 พื้นที่ที่ 2 บริเวณลานจอดรถอาคาร 99ปี, หอพักนักศึกษา, อาคารเวียง



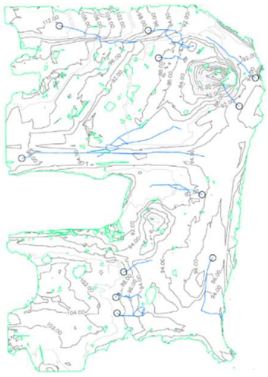
รูปที่ 35 พื้นที่ที่ 3 บริเวณตึกคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, อ่างหลวง, อาคารภูกามยาว



รูปที่ 36 พื้นที่ที่ 4 บริเวณอาคารเรียนรวม, ตึกอธิการบดี, อาคารเรียน 99ปี



รูปที่ 37 พื้นที่ที่ 5 บริเวณตึกคณะพยาบาลศาสตร์, หอประชุมพญางำเมือง



รูปที่ 38 พื้นที่ที่ 6 บริเวณตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์, สิ่งแวดล้อม, สหเวช, ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

สรุปผลการโครงงาน

จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) และแผนที่ภาพถ่ายออโธ (Orthophoto) พบว่าค่าความคาดเคลื่อนที่ปรับแก้แล้วเฉลี่ยนอยู่ที่ 2.493 cm อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 3 cm ตามข้อกำหนดของกรมโยธาและผังเมือง ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ UAV สามารถลดเวลาในการสำรวจได้เมื่อเทียบกับการสำรวจภาคพื้นดินและให้ข้อมูลที่ทันสมัยมากขึ้น การศึกษานี้มีข้อจำกัดด้านสภาพอากาศ ขนาดของข้อมูลที่ใหญ่อาจต้องใช้อุปกรณ์ในการประมวณผลที่สูง ความจุของแบตเตอรี่ทำให้ต้องบินหลายรอบ เพิ่มระยะเวลาในการสำรวจ

ข้อมูลการไหลของน้ำที่แสดงด้วยลูกศรบนแผนที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของน้ำในพื้นที่ที่ศึกษามีลักษณะภูมิประเทศซับซ้อน ช่วยให้สามารถคาดการณ์และออกแบบระบบระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในเรื่องของ การตรวจสอบแนวการไหลของน้ำ, การพิจารณาจุดเสี่ยงต่อน้ำท่วม, การประเมินความเร็วของน้ำ, และการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานให้เหมาะสม ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างและการบริหารจัดการน้ำในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักทุกคน ที่ให้คำแนะนำ องค์ความรู้ และแนวทางในการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ทุนสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมถึงการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape ในการประมวลผลข้อมูล

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ทีมงานวิจัยและเพื่อนร่วมงาน ที่ช่วยเหลือในการสำรวจภาคสนาม การจัดการข้อมูล และการวิเคราะห์ผล รวมถึงให้กำลังใจซึ่งกันและกันในระหว่างกระบวนการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและบุคคลใกล้ชิด ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้าน จนสามารถดำเนินงานวิจัยนี้จนเสร็จสิ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Isared, K. and Aekasitm, K. Derivation flow direction and watershed in lowland from dem. (2012). The 17th National Convention on Civil Engineering.

[2] Monton, S. Unmanned Aerial Vehicle: UAV (ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน)

[3] Jurawan, N. and Anujit, P. Volumetric Change Calculation for a Solid Waste Landfill Using UAV Photogrammetry. (2022). The 27th National Convention on Civil Engineering.

[4] สำนักวิศวกรรมการผังเมือง. การสำรวจและจัดทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ. (2022). องค์ความรู้ตามภารกิจกรมโยธาธิการและผังเมือง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563. พิมพ์ครั้งที่ 1.

[5] ด.ร.ภีระ ยมวัน. การรังวัดโดยวิธีแผนที่ชั้นที่หนึ่งด้วยระบบดาวเทียม กองเทคโนโลยีแผนที่ กรมที่ดิน.

[6] ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง. การสำรวจรังวัดและจัดทำแผนที่ด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไรขับ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

[7] ต่อลาภ การปลื้มจิตร และคณะ. การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจงานทางหลวง (2563). การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28

การจัดการน้ำเสียจากพื้นที่ชุมชนรอบกว๊านพะเยา

Wastewater management from community areas around Kwan Phayao

ฐานัส แก้วเทพ[1] ธนัชพร อินโต[2] น้ำทิพย์ คุ้มไพฑูรย์[3] มูฮัมมัดนัศรูณ เจ๊ะดือเร๊ะ[4,*]
[1,2,3,4] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*
**Corresponding author; E-mail address: nasrun.nr01@gmail.com*

บทคัดย่อ

การจัดการน้ำเสียในพื้นที่ชุมชนรอบกว๊านพะเยาเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ระบบนิเวศ และสุขภาพของประชาชน น้ำเสียในพื้นที่มีแหล่งกำเนิดหลักจากกิจกรรมชุมชน อุตสาหกรรมขนาดเล็ก และภาคการเกษตร ซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์ ไขมัน และโลหะหนักปะปนอยู่ในน้ำเสีย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณ และแหล่งกำเนิดน้ำเสีย วิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และนำเสนอแนวทางการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Treatment Units: DTUs) พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (Con structed Wetlands) และระบบกรองด้วยถ่านชีวภาพ (Biochar Filters) ในพื้นที่ตำบลบ้านสาง และตำบลบ้านต่อม ผลการศึกษาพบว่าระบบบำบัดเหล่านี้สามารถลดค่าความสกปรกของน้ำ เช่น BOD ได้อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงลดการปนเปื้อนของโลหะหนักและสารเคมีอันตราย นอกจากนี้ แนวทางดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นที่มีปัญหาน้ำเสียลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อส่งเสริมการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืนและลดความเสี่ยงด้านสุขภาพของชุมชน

คำสำคัญ: การจัดการน้ำเสีย, กว๊านพะเยา, พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม, ระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์, ถ่านชีวภาพ

Abstract

Wastewater management in the communities surrounding Kwan Phayao is a critical issue that impacts water quality, ecosystems, and public health. The primary sources of wastewater in the area include community activities, small-scale industries, and the agricultural sector, which contribute organic matter, fats, and heavy metals to the wastewater. This study aims to assess the quantity and sources of wastewater, analyze the environmental impacts, and propose suitable wastewater treatment methods. The study compares the efficiency of various treatment technologies, including Decentralized Treatment Units (DTUs), Constructed Wetlands, and Biochar Filters, in the communities of Ban Sang and Ban Tom. The results demonstrate that these treatment systems can significantly reduce water pollutants, such as BOD, and decrease the contamination of heavy metals and hazardous chemicals. Additionally, the proposed approaches can be applied to other areas with similar wastewater issues, promoting sustainable water resource management and reducing health risks to the community.

Keywords: wastewater management, Kwan Phayao, Constructed Wetlands, Decentralized Treatment Units, Biochar Filters

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำเป็นทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ สัตว์ และพืช โดยมนุษย์ใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ เช่น อุปโภคบริโภค เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และการคมนาคม ขณะที่จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการน้ำมากขึ้น ส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำจากสารเคมี และสิ่งเจือปนจากกิจกรรมต่าง ๆ เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียไม่เพียงพอหรือไม่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ การบำบัดน้ำเสียจึงจำเป็นเพื่อลดสารปนเปื้อนในน้ำ โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ และประเภทของน้ำเสีย

กว๊านพะเยาเป็นบึงน้ำจืดขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ และเป็นอันดับ 3 ของประเทศไทย ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 12,831 ไร่ เกิดจากน้ำที่ไหลมาจากห้วย 18 สาย ใช้เป็นแหล่งน้ำหลักสำหรับการเกษตร การประมง การท่องเที่ยว และการผลิตน้ำประปาสำหรับจังหวัดพะเยา ประกอบกับมีการปนเปื้อนจากสารเคมีในการเกษตร น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และการเน่าเสียของผักตบชวาจึงทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง

การจัดการน้ำเสียจากชุมชนรอบกว๊านพะเยามีความสำคัญในการรักษาสมดุลของระบบนิเวศ และคุณภาพชีวิต โดยเฉพาะในด้านการเกษตร การประมง และการอุปโภคบริโภค การจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมช่วยลดการปนเปื้อนสารพิษ และสารอินทรีย์ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ลดปัญหาน้ำเน่าเสียและกลิ่นไม่พึงประสงค์ รวมทั้งป้องกันโรคจากน้ำเสีย ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพประชาชน การบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพยังช่วยให้ทรัพยากรน้ำยั่งยืน ลดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำในอนาคต รูปที่ 1 แสดงสภาพน้ำเสียในกว๊านพะเยา



รูปที่ 1 มลภาวะในแหล่งน้ำกว๊านพะเยา

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจในการประเมินน้ำเสียจากพื้นที่รอบ ๆ กว๊านพะเยา โดยเฉพาะบริเวณตำบลบ้านสาง และตำบลบ้านต่อม ประกอบกับการนำเสนอแนวทางในการกำจัดน้ำเสียให้ถูกต้องกับชนิดและประเภทของน้ำเสียนั้น ๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อจำแนกและประเมินปริมาณน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ รอบกว๊านพะเยา

1.2.2 เพื่อเสนอแนวทางจัดการน้ำเสียอย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 พื้นที่ศึกษาประเมินปริมาณน้ำเสีย ได้แก่ ตำบลบ้านสาง และตำบลบ้านต่อม เท่านั้น

1.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเมิน และวางทางการจัดการน้ำเสียเป็นข้อมูลทุติยภูมิ

1.3.3 ระยะเวลาในการศึกษา 2 ภาคการศึกษาเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ปริมาณน้ำเสีย และแนวทางการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมของตำบลบ้านสาง และตำบลบ้านต่อม

2. การจัดการน้ำเสียที่ดีจะช่วยลดมลพิษ และสารพิษที่ไหลลงสู่กว๊านพะเยา ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและระบบนิเวศทางธรรมชาติ

3. การลดปัญหาน้ำเสียจะช่วยลดความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายของโรคที่เกิดจากน้ำเสีย เช่น โรคที่เกิดจากการปนเปื้อนของแบคทีเรีย และสารเคมี ทำให้ชุมชนรอบกว๊านมีสุขภาพที่ดีขึ้น

4. การจัดการน้ำเสียที่ดีช่วยสร้างโอกาสในการใช้กว๊านพะเยาเพื่อกิจกรรมทางเศรษฐกิจ เช่น การประมง การเกษตร และการท่องเที่ยว ซึ่งสามารถเพิ่มรายได้ให้กับคนในชุมชน

5. การบำบัดน้ำเสีย และการลดมลพิษจะช่วยรักษาทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อมไว้ให้คนรุ่นหลังใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ความหมายที่เกี่ยวข้อง

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำทิ้งหรือน้ำที่เกิดจากการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ โดยน้ำนั้นได้ผ่านการใช้ประโยชน์ จึงทำให้น้ำสกปรก และต้องปล่อยระบายออกมาเป็นน้ำทิ้ง ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้งาน หรือถ้าปล่อยทิ้งลงสู่ธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดก็จะทำให้แหล่งน้ำที่เกิดจากธรรมชาติเสียได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบไปในวงกว้าง โดยน้ำเสียจะมีส่วนประกอบที่เป็นสิ่งสกปรกต่าง ๆ เจือปนอยู่มาก ซึ่งลักษณะของสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้ประโยชน์ของน้ำ ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากแต่ละที่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งจะต้องมีคุณภาพถูกต้องตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด โดยแบ่งตามประเภท และขนาดของอาคารโดยการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความเป็นกรด - ด่าง ค่า BOD ปริมาณของแข็ง สารประกอบซัลเฟอร์ไนโตรเจน น้ำมัน และไขมัน

2.1.2 ประเภทของน้ำเสีย

น้ำเสียนั้นจะแบ่งตามแหล่งน้ำทิ้งที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำหรือแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) น้ำเสียที่เกิดจากแหล่งชุมชน (Domestic waste) ได้แก่น้ำทิ้งจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ รวมถึงอาชีพ ซึ่งสามารถแยกประเภทได้ตามการใช้พื้นที่อาคารขนาดต่าง ๆ โดยความสกปรกส่วนใหญ่ เช่น เศษอาหาร สารเคมีต่าง ๆ ที่เกิดจากการล้างทำความสะอาด

2) น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial waste) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทั้งหลายภายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ น้ำเสียมีเกิดจากกระบวนการผลิต น้ำเสียจากการล้างภาชนะ พื้นโรงงาน วัตถุดิบ และเครื่องจักรต่าง ๆ, น้ำหล่อเย็นและน้ำเสียอื่น ๆ

3) น้ำเสียจากการเกษตร (Agricultural waste) ได้แก่ น้ำเสียจากสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร เช่น ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ซึ่งละลายปนมากับน้ำฝน และน้ำเหลือใช้ที่ชะล้างพื้นที่เกษตร (Agricultural Runoff) โดยสารประกอบดังกล่าวย่อยสลายได้ยาก และจะทำให้มสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม

2.1.3 สาเหตุของน้ำเสีย

สาเหตุของน้ำเสียโดยทั่วไปเกิดจาก

1) การเพิ่มขึ้นของประชากร และกิจกรรมที่ก่อให้ เกิดน้ำเสียในพื้นที่ ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณน้ำเสียที่เกิดสูงขึ้นตามไปด้วย

2) การลดลงของปริมาณน้ำจากธรรมชาติ ทำให้ความสามารถในการรองรับน้ำเสีย และอัตราการฟอกตัวหรือปรับสภาพตามธรรมชาติลดน้อยลง

3) การขาดประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ ซึ่งประกอบไปด้วย การจัดการ และบำบัดน้ำเสีย กฎหมาย และมาตรการในการควบคุมมลพิษจากกิจกรรมที่ก่อน้ำเสีย

2.1.4 ผลกระทบของปัญหาน้ำเสีย

ปัญหาน้ำเสียก่อให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ ดังนี้

1) ผลกระทบด้านการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค ทำให้คุณภาพของน้ำลดลง มีผลกระทบต่อการจัดหาน้ำเพื่อทำการประปา เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่สะอาดไม่เพียงพอ รวมทั้งความต้องการน้ำในในการทำกิจกรรมอื่น ๆ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำ เพื่อให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานการอุปโภค และบริโภค

2) ผลกระทบด้านการเกษตร ทำให้น้ำไม่มีคุณภาพ ไม่สามารถนำมาใช้ในการเกษตรกรรมได้

3) ผลกระทบด้านสาธารณสุข น้ำเสียนั้นเป็นแหล่งของโรคระบาดต่างๆ โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวกับทางเดินอาหารที่เกิดจากน้ำเป็นแหล่งนำเชื้อโรค

4) ผลกระทบด้านทัศนียภาพ แหล่งน้ำที่เน่าเสียนั้นยังสร้างปัญหาด้านความสวยงาม และการใช้เป็นพื้นที่พักผ่อนหย่อนใจ เมื่อแหล่งน้ำเน่าเสียจึงทำให้ไม่สามารถใช้พื้นที่นั้นได้ เนื่องจากมีทั้งตะกอน และสารแขวนลอยต่างๆ อยู่บนผิวน้ำ ทำให้น้ำขุ่น เปลี่ยนสี และมีกลิ่นเหม็น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประสิทธิภาพการใช้จุลินทรีย์อีเอ็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงปลาหมอไทย (สุกัญญา คำหล้า และคณะ, 2567)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้จุลินทรีย์อีเอ็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงปลาหมอไทย โดยกำหนดจุลินทรีย์อีเอ็ม อัตราส่วน (อีเอ็ม:น้ำทิ้ง) คือ ไม่เติมอีเอ็ม:1000, 1:1000, 1:2000, 1:3000, 1:4000, 1:5000 (V/V) ระยะเวลาการบำบัดน้ำทิ้ง คือทุก 10, 20 และ 30 วัน โดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย (Analysis of variance) ของค่าคุณภาพน้ำทิ้งด้วยจุลินทรีย์อีเอ็มในระดับต่างๆ และระยะเวลาที่ต่างกันเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง ระหว่างหน่วยการทดลองโดยวิธีของ Duncan’s

new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงที่ระยะเวลา 10 วัน ในการบำบัด pH ที่อัตราส่วน 1:1000 มีค่าเท่ากับ 7.03±1.68 ที่ระยะเวลา 20 วัน ค่า DO ที่อัตราส่วน 1:2000 มีค่าเท่ากับ 3.11±2.25 ค่า BOD ที่อัตราส่วน 1:5000 มีค่าเท่ากับ 0.55±0.70 mg/L และNH_3 ที่อัตราส่วน 1:2000 มีค่าเท่ากับ 0.53±0.01 mg.N-/L, ระยะเวลา 30 วัน ของ TSS ที่อัตราส่วน 1:5000 มีค่าเท่ากับ 0.27±0.75 mg/L, Total P ที่อัตราส่วน 1:2000 มีค่าเท่ากับ 0.03±0.00 mg-p/L, Total N อัตราส่วน 1:1000 มีค่าเท่ากับ 1.72±1.36 mg.N-/L ตามลำดับ ซึ่งจุลินทรีย์อีเอ็มสามารถลดปริมาณ TSS, BOD และ Total P ได้เร็วที่สุด และปริมาณจุลินทรีย์อีเอ็มที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่า pH, NH_3 และ Total N ในน้ำ โดยพบว่าระยะเวลาในการบำบัดน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำทิ้งหลังจากการบำบัดด้วยจุลินทรีย์อีเอ็มในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

การทำลายฤทธิ์ของยาปฏิชีวนะในน้ำเสียจากผลิตยาของอุตสาหกรรมอาหารและยา โดยการประยุกใช้เทคโนโลยีแอดวานซ์ออกซิเดชั่น เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (อาลักษณ์ ทิพยรัตน์, 2562)

การปล่อยยาปฏิชีวนะสู่สิ่งแวดล้อมอาจทำให้ระบบนิเวศเสียสมดุล เทคโนโลยีใหม่ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนยาปฏิชีวนะ คือ การใช้กระบวนการออกซิเดชั่นขั้นสูง โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับอุณหภูมิสูง การศึกษานี้ทดสอบการยับยั้งฤทธิ์ของยาปฏิชีวนะ 3 ชนิด (ceftazidime, ceftriazone and cefphalexin) ในระบบน้ำเสียจำลองที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1-5% และอุณหภูมิ 60-150 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อบำบัดที่ 100 องศาเซลเซียส ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% เป็นเวลา 120 นาที พบว่าอี.โคไลเจริญจาก 4.61 เป็น 5.25 log CFU/ml ในขณะที่การบำบัดที่ 140 องศาเซลเซียส 1 นาที สามารถทำลายฤทธิ์ของยาปฏิชีวนะทั้งหมดได้ นอกจากนี้ยังพบว่ายีสต์ผงสามารถใช้ขจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือได้ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1 ต่อ 50 และเวลาบ่ม 30 นาที

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดสำหรับบำบัดน้ำเสียในชุมชนหมู่บ้านจัดสรร (สมชาย แก้วขุนจิตร, 2561)

การศึกษานี้ศึกษาพฤติกรรมการใช้น้ำของครัวเรือน และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในการจัดการน้ำเสียในครัวเรือนก่อนปล่อยสู่ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยมีการรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์ และแบบสอบถามในชุมชนหมู่บ้านกิตตินิเวศน์ เขตบางกะปิ ซึ่งสุ่มตัวอย่างจากกรรมการชุมชนและครัวเรือนจำนวน 291 คน รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อพักน้ำเสียในชุมชน เพื่อตรวจสอบผลก่อน และหลังการใช้เทคโนโลยีสะอาดในการจัดการน้ำเสีย การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงคุณภาพ และปริมาณ เช่น t-test และ p-value ผลการศึกษาพบว่าครัวเรือนส่วนใหญ่ใช้น้ำเฉลี่ย 22.85 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน และมีการจัดการน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งโดยการใช้ตะแกรงดักเศษอาหาร และแยกน้ำมัน มีครัวเรือนน้อยกว่าร้อยละ 50 ที่เข้าร่วมกิจกรรมจัดการน้ำเสียของชุมชน การนำเทคโนโลยีสะอาดมาใช้บำบัดน้ำเสียช่วยให้ค่าคุณภาพน้ำทิ้งหลังการดำเนินโครงการมีการปรับปรุง เช่น ค่า pH ลดลงใกล้เคียงค่าความเป็นกลาง (pH = 7) และค่า BOD, TKN, น้ำมันและไขมันลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ ส่วนค่าสารแขวนลอย และสารที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียความเป็นกรดสูงโดยใช้พืชท้องถิ่นบริเวณพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชมหาวิทยาลัยพะเยา (ภัทร์ธีรา โปดำ และคณะ, 2557)

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบึงประดิษฐ์อาศัยพืชในการบำบัดเป็นหลัก พืชที่เลือกใช้โดยมากเป็นพืชที่มีโอกาสแพร่กระจายข้ามถิ่นได้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียความเป็นกรดสูง โดยเลือกใช้พืชสองชนิด คือ พุทธรักษา Canna spp. และพืชท้องถิ่นในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ต๋ำ คือ ผักคราดหัวแหวน Acmellaoleracea (L.) ระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวในแนวราบ เพื่อทดสอบความสามารถในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ควบคุมพีเอชเท่ากับ 4 และ 5 โดยมีการภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (HLR) 5 ซม/วัน ผลการวิจัยพบว่า ผักคราดหัวแหวนที่ปลูกภายในบ่อมีอัตราการบำบัดได้ดีกว่าพุทธรักษา เนื่องจากพืชสามารถปรับตัว และเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียที่มีค่าพีเอช 5 ทำให้ช่วยเพิ่มออกซิเจนในระบบได้ดี ส่วนการทดลองป้อนน้ำเสีย พีเอช 4 พบว่า พืชทั้งสองชนิดไม่สามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ ฟอสฟอรัส เจดาลห์ไนโตรเจน และซีโอดี มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่พืชรับน้ำเสีย

การนำน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ประโยชน์ใหม่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งทางการเกษตร (ปัญจา ใยถาวร และคณะ, 2557)

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนทั่วไปมักเน้นการบำบัดเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง แต่หากต้องการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในภาคเกษตรจำเป็นต้องปรับปรุงระบบเพื่อให้เหมาะสมและปลอดภัยต่อผลผลิตเกษตรกร และผู้บริโภค การศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียในภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่าหลายแห่งสามารถพัฒนาให้ใช้ประโยชน์ในเกษตรกรรมได้ โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงภัยแล้ง หากมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพิ่มเติม ระบบทรายกรองช้า (Slow sand filtration) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองบุรีรัมย์ การทดสอบพบว่าระบบทรายกรองช้ามีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าระบบเดิม (บ่อผึ่ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยลดค่าต่างๆ เช่น ซีโอดี บีโอดี ตะกอนแขวนลอย และฟอสฟอรัสได้มากกว่าบ่อผึ่ง ซึ่งไม่สามารถบำบัดไนเตรทได้เลย ส่วนการบำบัดไนโตรเจนและแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน การดำเนินการในระบบทรายกรองช้าต้องมีการตักหน้าทรายและเติมกลับทุก 60-120 วัน เพื่อป้องกันการอุดตัน และรักษาประสิทธิภาพการบำบัด

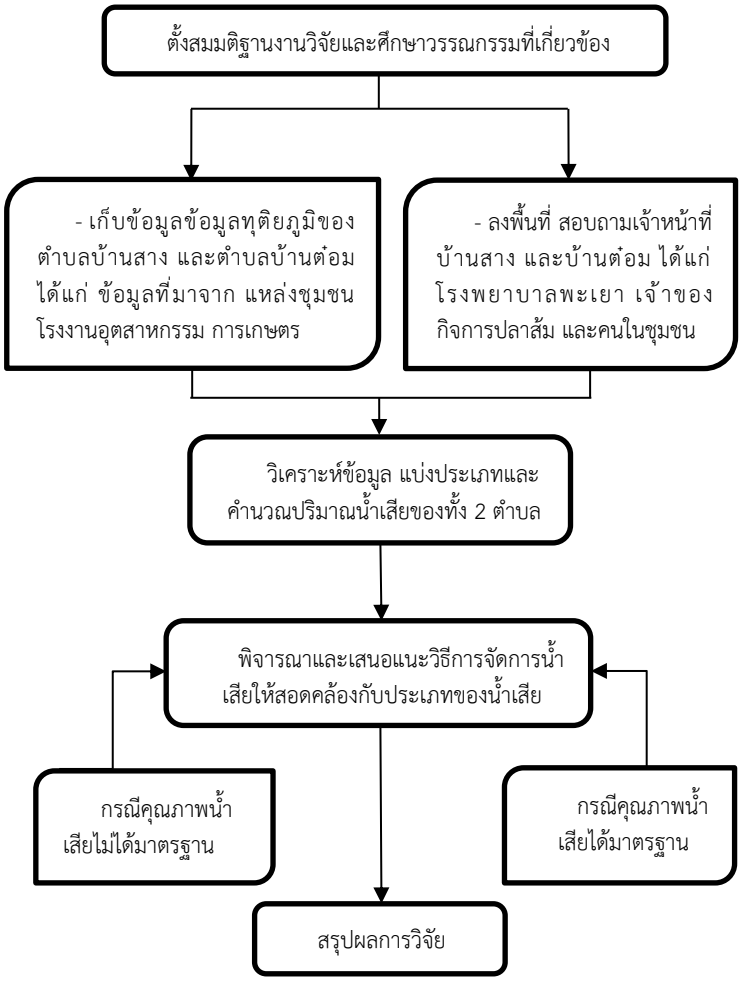
การศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะของการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบจมตัว กรณีศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสูงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา (อุมาพร ปรีชา, 2552)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในโรงพยาบาล ได้แก่ ระบบคลองวนเวียน ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบบ่อผึ่ง และระบบเอเอส (Activated Sludge) ซึ่งได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และต้องการพื้นที่น้อย แต่การควบคุม และดูแลระบบเอเอสต้องการความรู้เฉพาะด้าน เนื่องจากมักพบปัญหาในการควบคุมระดับความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ปัญหาการตกตะกอนไม่ดีและการเกิดตะกอนลอย (Bulking sludge) ยังส่งผลให้ตะกอนหลุดออกไปกับน้ำทิ้งหลังการบำบัด และอาจมีปัญหาในการกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคได้ไม่สมบูรณ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยการปรับปรุงระบบบำบัดที่มีอยู่เดิมหรือการใช้ระบบบำบัดขั้นสูง เช่น ระบบ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (MBR) ที่รวมถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และเมมเบรนเข้าด้วยกัน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกมวลสลัดจ์ และสารละลายน้ำขนาดใหญ่ เช่น กรดนิวคลีอิคและโปรตีนออกจากน้ำทิ้งได้ดี ส่งผลให้คุณภาพน้ำทิ้งดีขึ้น และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยน้ำทิ้งจากระบบนี้ปราศจากแบคทีเรีย ไวรัส และสารละลายที่เป็นอันตราย

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การจัดการน้ำเสียจากชุมชนรอบกว๊านพะเยาเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และคุณภาพชีวิตของประชาชน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินปริมาณน้ำเสีย และพัฒนาแนวทางจัดการน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ โดยสำรวจพื้นที่ เก็บข้อมูล เพื่อเสนอแนะแนวทางการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมและยั่งยืนสำหรับชุมชน โดยมีแผนผังการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

การตั้งสมมติฐานและการเตรียมการวิจัย

- กำหนดเป้าหมาย และแผนการดำเนินงาน วางแผน และแจกแจงงาน
- ประสานงานกับหน่วยงานท้องถิ่น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อขอความร่วมมือในงานวิจัย
- ติดต่อ และนัดหมายการสัมภาษณ์ผู้บริหารชุมชน และเจ้าหน้าที่ท้องถิ่นที่เกี่ยวข้อง
- จัดเตรียมอุปกรณ์และทรัพยากรที่จำเป็นสำหรับการเก็บข้อมูลภาคสนาม

การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

- สัมภาษณ์ผู้บริหารชุมชนและ ชาวบ้าน เกี่ยวกับปัญหาน้ำเสีย และใช้แบบสอบถามรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมจากชาวบ้านในพื้นที่

การวิเคราะห์ข้อมูล

- วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการสำรวจ และสัมภาษณ์
- วิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์ และแบบสอบถามเพื่อสกัดข้อมูล

การออกแบบและพัฒนาแนวทางการจัดการน้ำเสีย

- ออกแบบระบบการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาของพื้นที่และความต้องการของชุมชน
- พิจารณาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพ ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการกรอง ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี เป็นต้น

การสรุปผลและจัดทำรายงาน

- ประเมินผลกระทบของการจัดการน้ำเสียต่อสิ่งแวดล้อมรอบกว๊านพะเยา เช่น คุณภาพน้ำ ความหลากหลายทางชีวภาพ การใช้ประโยชน์ที่ดิน
- ประเมินผลกระทบด้านสังคม เช่น สุขภาพ และคุณภาพชีวิตของชาวบ้าน
- สรุปผลการประเมิน และจัดทำรายงานผลการประเมิน

4. ผลการศึกษา

จากการคำนวณค่า BOD_5 ในพื้นที่ทั้ง 2 ตำบล ได้แก่ ตำบลบ้านสาง และตำบลบ้านต๋อม ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 BOD_5 ตำบลบ้านสาง

Area	Magnitude	Unit flow (m^3/unit.d)	BOD_5load (kg/day)
ที่อยู่อาศัย	4022 (คน)	0.2	241.32
พื้นเกษตรกรรม (ข้าวนาปี)	2768 (ไร่)	5.45	30.33
พื้นเกษตรกรรม (ข้าวนาปรัง)	187 (ไร่)	5.45	4.675
โรงงานอุตสาหกรรม	1 (แห่ง)	50	1
โรงเรือนเลี้ยงสัตว์	20.74 (ไร่)	16.67	20.74

ตารางที่ 2 BOD_5 ตำบลบ้านต๋อม

Area	Magnitude	Unit flow (m^3/unit.d)	BOD_5load (kg/day)
ที่อยู่อาศัย	12455 (คน)	0.2	747.3
พื้นเกษตรกรรม (นาข้าว)	4143 (ไร่)	5.48	45040.00
สถานศึกษา	8572 (คน)	0.10	257.16
โรงพยาบาลจังหวัดพะเยา	500 (เตียง)	0.78	75.00
โรงพยาบาลส่วนตำบล	72 (เตียง)	0.40	5.76

โรงเรือนเลี้ยงโค กระบือ และม้า	10 (ไร่)	16.67	10.00
โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ปีก	29 (ไร่)	0.6	0.07

การคำนวณค่า **BOD_5** ใช้ค่า **BOD_5** อ้างอิงจากกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นกระทรวงมหาดไทย เนื่องจากเป็นค่าที่ได้ถูกทดสอบ และผ่านการวิเคราะห์มาอย่างถูกต้อง ได้ค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า BOD_5 **กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นกระทรวงมหาดไทย**

ทำนาข้าว	2	mg/L
สถานศึกษา	30	g/day
โรงพยาบาลจังหวัดพะเยา	150	g/day
โรงพยาบาลส่วนตำบล	80	g/day
โรงเรือนเลี้ยงโค กระบือ และม้า	60	mg/L
โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ปีก	4.2	mg/L
สถานที่เพาะเลี้ยงปลา	20	mg/L

การบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันที่ดำเนินการในแต่ละพื้นที่ ประกอบด้วยพื้นที่ตำบลบ้านต๋อมและตำบลบ้านสางดังต่อไปนี้

การบำบัดน้ำเสียในพื้นที่โรงพยาบาลพะเยา

การบำบัดน้ำเสียในพื้นที่โรงงานผลิตปลาส้ม

1. โรงพยาบาลพะเยาได้ดำเนินกระบวนการบำบัดน้ำเสียตามขั้นตอนดังนี้:

1.1 บ่อสูบ

ทำหน้าที่สูบน้ำเสียจากโรงพยาบาลเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น

1.2 เติมออกซิเจน (Oxidation Ditch)

น้ำเสียจากบ่อสูบจะถูกส่งเข้าสู่ระบบ Oxidation Ditch ซึ่งใช้กังหันหมุนวนเพื่อเติมออกซิเจนในน้ำ ช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลาย สารอินทรีย์ และมลพิษในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 การกำจัดตะกอน

- หากพบว่ามีตะกอนปริมาณมาก น้ำจะถูกนำเข้าสู่ บ่อลานตากตะกอน เพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำ

- เมื่อน้ำมีความใสมากขึ้น จะส่งกลับเข้าสู่ บ่อตกตะกอน เพื่อกำจัดตะกอนที่เหลือ

- ตะกอนที่แยกออกมาจะถูกนำไปใช้ผลิตปุ๋ยหมัก

1.4ตกตะกอนบ่อ

- เป็นบ่อสำหรับพักน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนเบื้องต้น โดยน้ำในบ่อจะมีความใสขึ้น แต่ยังคงมีตะกอนเล็กน้อย

1.5 บ่อคลอรีน

- น้ำที่ใสจาก บ่อตกตะกอน จะไหลเข้าสู่ บ่อคลอรีน ซึ่งจะมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำและเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยทั่วไปจะเติมคลอรีนสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ให้มีค่าคลอรีนอยู่ในช่วง 0.5 - 1 ppm

1.6 ปลายทางน้ำออก

- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจนมีค่ามาตรฐาน BOD5 ตามเกณฑ์กำหนด จะถูกปล่อยลงสู่กว๊านพะเยา

2. โรงงานผลิตปลาส้มได้ดำเนินกระบวนการบำบัดน้ำเสียตามขั้นตอนดังนี้:

2.1 การกรองเศษปลาเบื้องต้น

- น้ำเสียถูกส่งผ่านตะแกรงกรองเพื่อแยกกากปลาและตะกอนแขวนลอยขนาดใหญ่ เพื่อลดปริมาณของแข็งในระบบ

2.2 ถังดักไขมัน

- น้ำเสียที่ผ่านการกรองเบื้องต้นจะเข้าสู่ถังดักไขมัน เพื่อแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสีย ซึ่งช่วยลดภาระของกระบวนการบำบัดในขั้นตอนถัดไป

2.3 ระบบบำบัดด้วยพืชน้ำ (ธูปฤาษี)

- น้ำเสียที่ผ่านการแยกไขมันจะเข้าสู่บ่อบำบัดที่มีพืชน้ำ เช่น ธูปฤาษี ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยดูดซับสารอินทรีย์ และปรับปรุงคุณภาพน้ำทางชีวภาพ

2.4 บ่อพักน้ำใส

- น้ำที่ผ่านการบำบัดในระบบพืชน้ำจะถูกส่งต่อไปยังบ่อพักน้ำใส ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในภาคการเกษตร หรือปล่อยคืนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติภายใต้มาตรฐานคุณภาพน้ำที่กำหนด

การวิเคราะห์ระบบบำบัดน้ำเสียจากการลงพื้นที่สำรวจ

1. การบำบัดน้ำเสียในโรงพยาบาลพะเยา

กระบวนการที่ใช้

- บ่อสูบ, Oxidation Ditch, บ่อตกตะกอน, บ่อคลอรีน การพิจารณาเพิ่มเติม
- บำบัดสารเคมี เช่น ยาปฏิชีวนะ (ISO 24511:2019)
- แยกโลหะหนัก จากห้องปฏิบัติการ (ISO 5667-3:2018)
- บำบัดน้ำเสียปนรังสี (IAEA Safety Standards)

2. การบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตปลาส้ม

กระบวนการที่ใช้

- กรองเศษปลา, ถังดักไขมัน, ระบบพืชน้ำ (ธูปฤาษี), บ่อพักน้ำ
- ระบบพืชน้ำ (ธูปฤาษี)
- ถังดักไขมัน
- บ่อพักน้ำ

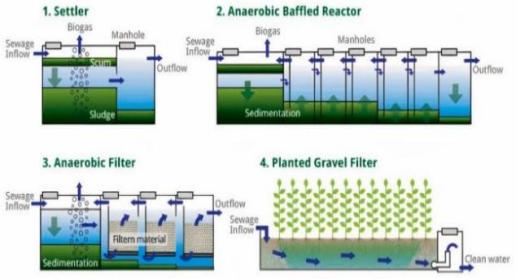
การพิจารณาเพิ่มเติม

- บำบัดชีวภาพเสริม เช่น Anaerobic Digestion (ISO 11733:2004)
- ตรวจสอบคุณภาพน้ำ จากระบบพืชน้ำ (ISO 5667- 10:2020)
- การจัดการกากตะกอน (ISO 21939-1:2019)

แนะนำระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในพื้นที่ต่างๆ

1. โรงพยาบาล

วิธี: Decentralized Treatment Units (DTU)



รูปที่ 3 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์ (DTU)

Decentralized Treatment Units (DTUs) หรือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์ ได้รับการออกแบบเพื่อบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ย่อย ๆ เช่น โรงพยาบาล โดยไม่ต้องพึ่งพาระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ที่มีศูนย์กลาง ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับพื้นที่ห่างไกลหรือชุมชนที่ไม่สามารถเข้าถึงการบำบัดน้ำเสียหลักได้ (แหล่งอ้างอิง: Global Treat, 2025).

ข้อดี

- บำบัดน้ำเสียใกล้แหล่งกำเนิด ลดภาระระบบส่วนกลาง
- ติดตั้งรวดเร็ว และเหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกล
- ลดการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้บำบัด (แหล่งอ้างอิง: Mitrwater, 2025).

ตัวอย่างเทคโนโลยี

- ระบบไร้ออกซิเจน
- ระบบเมมเบรน
- ระบบพืชกรอง (แหล่งอ้างอิง: aceken, 2025).

ขั้นตอน

1. Settler (บ่อดักตะกอน)

- น้ำเสียที่ไหลเข้ามาผ่านกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้น โดยของแข็งและสารอินทรีย์หนักจะจมลงเป็นตะกอน (sludge)
- ก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะถูกระบายออกทางช่องด้านบน
- น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลออกไปยังกระบวนการถัดไป (แหล่งอ้างอิง: Global Treat, 2025).

2. Anaerobic Baffled Reactor (ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบแผ่นกั้น)

- น้ำเสียจะไหลผ่านหลายช่องที่ถูกแบ่งด้วยแผ่นกั้นแนวตั้ง ทำให้เกิดการสัมผัสกับแบคทีเรียที่ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน
- กระบวนการนี้ช่วยลดค่าความสกปรกของน้ำ (เช่น BOD, COD) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- มีการตกตะกอนเพิ่มเติม และน้ำที่ได้รับการบำบัดเบื้องต้นจะไหลออกไปยังขั้นตอนต่อไป (แหล่งอ้างอิง: Mitrwater, 2025).

3. Anaerobic Filter (ตัวกรองไร้ออกซิเจน)

- น้ำเสียจะไหลผ่านวัสดุกรอง (filter material) ที่มีแบคทีเรียเกาะอยู่ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือ
- กระบวนการนี้ช่วยลดปริมาณสารแขวนลอย และทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น
- มีการตกตะกอนเพิ่มเติมก่อนที่น้ำจะถูกปล่อยไปยังกระบวนการสุดท้าย (แหล่งอ้างอิง: aceken, 2025).

4. Planted Gravel Filter (บ่อกรองพืชและกรวด)

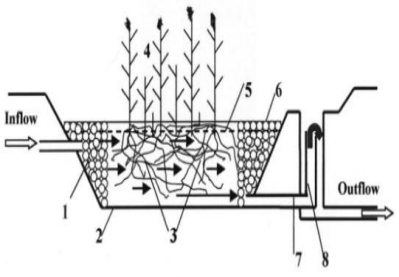
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วจะไหลผ่านชั้นกรวดและรากพืช ซึ่งช่วยดูดซับสารอาหารและกำจัดสารปนเปื้อนที่เหลือแบคทีเรียในชั้นกรวดช่วยบำบัดน้ำต่อเนื่องโดยใช้ออกซิเจนที่มีอยู่
- สุดท้ายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำสะอาดที่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างปลอดภัย (แหล่งอ้างอิง: กรมควบคุมมลพิษ, 2025).

ประโยชน์

- ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียในระยะยาว
- ลดภาระระบบบำบัดรวมของชุมชน
- ลดการปนเปื้อนเชื้อโรคและสารเคมีในสิ่งแวดล้อม
- ช่วยควบคุมคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามมาตรฐาน
- ติดตั้งง่าย ใช้พื้นที่น้อย และเหมาะกับพื้นที่จำกัด
- สนับสนุนการจัดการน้ำเสียในพื้นที่เฉพาะ เช่น น้ำเสียจากห้องแล็บ ห้องผ่าตัด หรือโรงครัว (แหล่งอ้างอิง: Global Treat, 2025).

2. โรงเรียน

วิธี: Constructed Wetlands (พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม)



รูปที่ 4 แบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Constructed Wetlands เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบธรรมชาติ โดยใช้พืชน้ำ ดิน และจุลินทรีย์ในกระบวนการกรองและย่อยสลายของเสีย ซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ที่ต้องการวิธีบำบัดน้ำเสียที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).

ข้อดี

- ลดการปล่อยมลพิษลงสู่แหล่งน้ำ
- เป็นแหล่งเรียนรู้ด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับนักเรียน

-ติดตั้งและบำรุงรักษาง่าย(แหล่งอ้างอิง: Environmental Protection Agency, 2023).

ประเภทของ Constructed Wetlands

- Horizontal Flow Wetlands: น้ำไหลแนวนอนผ่านชั้นกรองและรากพืช
- Vertical Flow Wetlands: น้ำไหลแนวตั้งผ่านชั้นกรอง เหมาะกับการกำจัดไนโตรเจน
- Free Water Surface Wetlands: น้ำไหลผ่านบ่อที่มีพืชน้ำลอยน้ำ (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

ขั้นตอนการดำเนินการ

บ่อปรับสภาพน้ำก่อนเข้าพื้นที่ชุ่มน้ำ

ขั้นตอนก่อนเข้าสู่พื้นที่ชุ่มน้ำหลัก

1. น้ำเสียไหลเข้ามาสู่บ่อปรับสภาพ

- น้ำเสียที่เข้ามาจะถูกกระจายให้ทั่วผ่านรางกระจายน้ำ
- ระดับน้ำสูงประมาณ 30 เซนติเมตร (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).

2 .การตกตะกอนและการกรองเบื้องต้น

- ชั้นกรองประกอบด้วย ทรายหยาบและกรวด ที่ช่วยแยกของแข็งออกจากน้ำ และตะกอนหนักจะตกลงด้านล่าง(แหล่งอ้างอิง: Environmental Protection Agency, 2023).

3. น้ำไหลเข้าสู่บ่อพื้นที่ชุ่มน้ำ

- หลังจากผ่านกระบวนการกรองเบื้องต้น น้ำจะถูกส่งเข้าสู่พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่มีพืชน้ำ (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).

พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมน้ำ (Constructed Wetlands)

ขั้นตอนนี้เป็นการบำบัดทางชีวภาพโดยพืชและแบคทีเรีย

1.พืชน้ำช่วยดูดซับสารอาหารและสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

- พืชน้ำ (เช่น กก หรือ ธูปฤาษี) จะใช้ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารอาหารอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

2.การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในวัสดุกรอง

- แบคทีเรียในระบบจะช่วยกำจัดสารอินทรีย์และโลหะหนัก (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).

3.น้ำที่ผ่านการบำบัดไหลออกไป

- น้ำสะอาดจะถูกปล่อยออกจากระบบไปยังแหล่งน้ำธรรมชาติ (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).

ประโยชน์

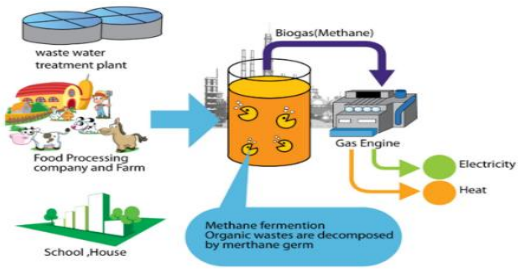
- ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย
- ช่วยกรองสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
- สร้างพื้นที่สีเขียวและภูมิทัศน์ที่สวยงาม
- ส่งเสริมความหลากหลายทางชีวภาพ
- น้ำที่ผ่านการบำบัดนำกลับมาใช้ในการเกษตรหรือรดน้ำได้ (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

ข้อจำกัด

- ใช้พื้นที่มากในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณสูง
- ต้องการการดูแลรักษาพืชน้ำและกำจัดตะกอนเป็นประจำ (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).

3. บ้านเรือน และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์

วิธี: ถังบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (Biogas Systems)



รูปที่ 5 แบบจำลองถังบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ

ถังบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (Biogas Systems) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการ ย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ส่งผลให้เกิด ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น ก๊าซมีเทน (CH_4) และสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับการหุงต้ม หรือผลิตไฟฟ้าได้ (แหล่งอ้างอิง: Metcalf & Eddy, 2014).

ข้อดี

- ลดการใช้พลังงานฟอสซิลและค่าใช้จ่ายพลังงาน (แหล่งอ้างอิง:UNEP, 2019).
- เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก (แหล่งอ้างอิง: Tchobanoglous et al., 2003).

ขั้นตอนการทำงานของถังบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 1: การเก็บรวบรวมของเสียน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ เช่น

- น้ำเสียจากห้องน้ำ
- น้ำเสียจากห้องครัว
- ของเสียจากฟาร์มและโรงงานแปรรูปอาหาร
- จะถูกส่งเข้าสู่ถังบำบัดเพื่อทำการย่อยสลาย (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

ขั้นตอนที่ 2: การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในถังบำบัด จุลินทรีย์ประเภท Methanogens จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก

- Hydrolysis: ย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ (เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน) ให้เป็นโมเลกุลเล็ก (แหล่งอ้างอิง: Tchobanoglous et al., 2003).
- Acidogenesis และ Acetogenesis: เปลี่ยนโมเลกุลขนาดเล็กให้เป็นกรดไขมันระเหยและก๊าซไฮโดรเจน (แหล่งอ้างอิง: Metcalf & Eddy, 2014).
- Methanogenesis: เปลี่ยนกรดไขมันระเหยให้เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).

ขั้นตอนที่ 3: การกักเก็บและแยกของเสีย

- ก๊าซชีวภาพ (Biogas): เก็บรวบรวมเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน (แหล่งอ้างอิง: UNEP, 2019).
- น้ำทิ้ง: สามารถนำไปใช้รดน้ำต้นไม้ หรือปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).
- ตะกอนของเสีย: สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ (แหล่งอ้างอิง: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2020).

ประโยชน์

- ลดปริมาณน้ำเสียจากบ้านเรือน (แหล่งอ้างอิง: Metcalf & Eddy, 2014).
- ผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับใช้แทนก๊าซ LPG (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).
- ลดปัญหากลิ่นไม่พึงประสงค์จากน้ำเสีย (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).
- ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากน้ำเสีย (แหล่งอ้างอิง: UNEP, 2019).
- สามารถนำตะกอนที่เหลือมาใช้เป็นปุ๋ย (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).

ข้อจำกัด

- ต้นทุนการติดตั้งสูง โดยเฉพาะถังขนาดใหญ่ (แหล่งอ้างอิง: Tchobanoglous et al., 2003).
- ต้องการพื้นที่เพียงพอสำหรับการติดตั้ง (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).
- ต้องมีการบำรุงรักษาและตรวจสอบระบบอย่างสม่ำเสมอ (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

ข้อควรระวัง

- หลีกเลี่ยงการติดตั้งในพื้นที่ลาดชันหรือเสี่ยงต่อการรั่วไหล (แหล่งอ้างอิง: Metcalf & Eddy, 2014).
- ใช้วัสดุที่ทนทาน เช่น ถังไฟเบอร์กลาสหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก (แหล่งอ้างอิง: Jones et al., 2024).
- มีระบบระบายอากาศที่เหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงของก๊าซติดไฟ (แหล่งอ้างอิง: EPA, 2022).

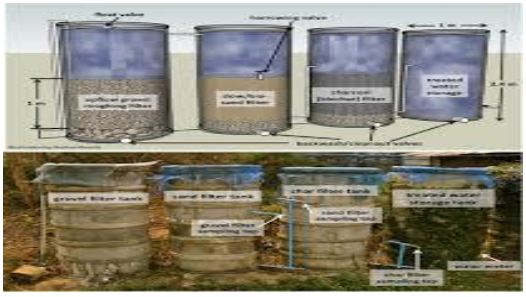
คำแนะนำการใช้งาน

- เลือกวัสดุคุณภาพดีที่ทนต่อสภาพแวดล้อม (แหล่งอ้างอิง: UNEP, 2019).
- วางแผนการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ (แหล่งอ้างอิง: Lin et al., 2023).

- ติดตั้งโดยผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้มั่นใจว่าระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (แหล่งอ้างอิง: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2020).

4. เกษตรกรรม

วิธี: Biochar Filters (การกรองน้ำด้วยถ่านชีวภาพ)



รูปที่ 6 การกรองน้ำด้วยถ่านชีวภาพ

การกรองน้ำด้วยถ่านชีวภาพ (Biochar Filters) เป็นเทคนิคการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ ถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาชีวมวลในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ (Pyrolysis) มาเป็นสื่อกรองน้ำ ช่วยกำจัดสารมลพิษ เช่น โลหะหนัก ไนเตรต ฟอสเฟต สารกำจัดศัตรูพืช และสารอินทรีย์อื่น ๆ ในแหล่งน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม (แหล่งอ้างอิง: Lehmann & Joseph, 2015).

ข้อดี

- ต้นทุนต่ำและหาได้ง่าย: สามารถผลิตจากวัสดุชีวมวลในท้องถิ่น เช่น เศษไม้ ซังข้าวโพด แกลบ ขี้เลื่อย ฯลฯ (แหล่งอ้างอิง: Inyang et al., 2016).
- เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม: ลดการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย (แหล่งอ้างอิง: Mohan et al., 2014).
- ประสิทธิภาพสูงในการดูดซับมลพิษ: กำจัดสารพิษ เช่น โลหะหนัก (Pb, Cd, As) ไนเตรต และสารอินทรีย์จากน้ำเสีย (แหล่งอ้างอิง: Tan et al., 2015).
- ส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน: ช่วยลดปริมาณของเสียชีวมวลและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (แหล่งอ้างอิง: Lehmann & Joseph, 2015).

ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 : การเตรียมถ่านชีวภาพ

เลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสม เช่น ซังข้าวโพด ฟางข้าว แกลบ ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว

ผ่านกระบวนการ Pyrolysis ที่อุณหภูมิระหว่าง 300–700°C เพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนสูง (แหล่งอ้างอิง: Mohan et al., 2014).

บดและคัดขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพให้เหมาะสมกับการกรอง (แหล่งอ้างอิง: Tan et al., 2015).

ขั้นตอนที่ 2 : การออกแบบตัวกรอง

ออกแบบระบบกรองน้ำที่มีชั้นของ ถ่านชีวภาพ ร่วมกับวัสดุกรองอื่น เช่น ทราย กรวด และเส้นใยพืช เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง (แหล่งอ้างอิง: Inyang et al., 2016).

ขั้นตอนที่ 3 : การบำบัดน้ำเสีย

นำน้ำเสียจากแหล่งเกษตรกรรม ไหลผ่านตัวกรอง ที่บรรจุถ่านชีวภาพเพื่อกำจัดสารมลพิษและปรับปรุงคุณภาพน้ำ (แหล่งอ้างอิง: Lehmann & Joseph, 2015).

ขั้นตอนที่ 4 : การบำรุงรักษาตัวกรอง

ล้างและปรับปรุงถ่านชีวภาพเป็นระยะ เพื่อลดปัญหาการอุดตันและเพิ่มอายุการใช้งาน (แหล่งอ้างอิง: Mohan et al., 2014).

ถ่านชีวภาพที่เสื่อมสภาพสามารถนำไปใช้เป็น สารปรับปรุงดิน ในการเกษตรได้ (แหล่งอ้างอิง: Tan et al., 2015).

ข้อจำกัด

- น้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง อาจทำให้ตัวกรองอุดตันได้ง่าย (แหล่งอ้างอิง: Mohan et al., 2014).
- ประสิทธิภาพของ Biochar ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (แหล่งอ้างอิง: Inyang et al., 2016).
- ระบบกรองขนาดใหญ่ต้องใช้พื้นที่มาก และอาจต้องมีการบำรุงรักษาสม่ำเสมอ (แหล่งอ้างอิง: Lehmann & Joseph, 2015).
- Biochar ต้องเปลี่ยนเมื่อประสิทธิภาพลดลง ซึ่งอาจมีต้นทุนการเปลี่ยนถ่ายในระยะยาว (แหล่งอ้างอิง: Tan et al., 2015).
- ไม่สามารถดูดซับสารเคมีบางชนิดได้ เช่น สารอินทรีย์ที่มีขั้วสูงบางประเภท (แหล่งอ้างอิง: Mohan et al., 2014).

ข้อเสนอแนะ

- เพิ่มชั้นกรองเบื้องต้น เช่น ตะแกรงกรองหรือบ่อพัก เพื่อลดตะกอนก่อนเข้าสู่ระบบกรอง (แหล่งอ้างอิง: Inyang et al., 2016).
- เลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสม โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ Biochar จากแหล่งต่าง ๆ (แหล่งอ้างอิง: Tan et al., 2015).
- ควบคุมกระบวนการผลิต Biochar ให้ได้คุณภาพสูง โดยใช้เทคนิคปรับแต่งโครงสร้างรูพรุนของ Biochar (แหล่งอ้างอิง: Lehmann & Joseph, 2015).

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดการน้ำเสียจากชุมชนรอบกว๊านพะเยา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดสำคัญที่มีผลต่อระบบนิเวศและวิถีชีวิตของประชาชนในจังหวัดพะเยา ปัญหาน้ำเสียเกิดจากกิจกรรมของชุมชน อุตสาหกรรมขนาดเล็ก และภาคเกษตรกรรม ทำให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ ไขมัน สารเคมี และโลหะหนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ระบบนิเวศ และสุขภาพประชาชน

การศึกษานี้ดำเนินการโดยการวิเคราะห์แหล่งกำเนิด ปริมาณ และคุณภาพน้ำเสียในพื้นที่ตำบลบ้านสางและตำบลบ้านต่อม พร้อมศึกษารูปแบบการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ โดยพิจารณาจากลักษณะน้ำเสียและข้อจำกัดของพื้นที่ ระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับการพิจารณามี 4 แนวทาง ได้แก่:

1.ระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์ (DTUs) – เหมาะสำหรับแหล่งกำเนิดเฉพาะจุด เช่น โรงพยาบาลและโรงงานขนาดเล็ก

2.พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (Constructed Wetlands) – ใช้กระบวนการชีวภาพเพื่อดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนัก เหมาะสำหรับพื้นที่กว้าง

3. ถังบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (Biogas Systems) – ใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูง

4. การกรองด้วยถ่านชีวภาพ (Biochar Filters) – ใช้ถ่านชีวภาพในการดูดซับมลพิษ เหมาะกับน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม

จากการวิเคราะห์พบว่าแต่ละระบบมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน โดยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเหมาะสำหรับลดสารอินทรีย์และไนโตรเจน, DTUs ใช้ควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่เข้มข้น และการกรองด้วยถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพ ในการลดโลหะหนักจากภาคเกษตรกรรม

แนวทางการบำบัดน้ำเสียที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแผนจัดการน้ำเสียในพื้นที่อื่น ซึ่งจะช่วยลดปัญหามลพิษ และส่งเสริมการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืน เพื่อรักษาระบบนิเวศและคุณภาพชีวิตของประชาชนในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่ายคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่มีคุณค่า Throughout กระบวนการวิจัย

ขอขอบคุณหน่วยงานและประชาชนในพื้นที่รอบกว๊านพะเยาที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านทุนการศึกษาและทรัพยากรในการศึกษาในครั้งนี้ สุดท้ายคณะผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุกขั้นตอนของการดำเนินโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ประสิทธิภาพการใช้จุลินทรีย์อีเอ็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงปลากหมอไทย แหล่งที่มา : https://li01.tithaijo.org/index.php/JVIA/article/view/257337/178366

[2] การทำลายฤทธิ์ของยาปฏิชีวนะในน้ำเสียจากผลิตยาของอุตสาหกรรมอาหารและยา โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแอดวานซ์ออกซิเดชั่นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งที่มา : https://buuir.buu.ac.th/xmlui/bitstream/handle/1234567890/3616/2563_108.pdf?sequence=3&isAllowed=y

[3] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดสำหรับบำบัดน้ำเสียในชุมชน แหล่งที่มา : https://repository.nida.ac.th/items/be98a233-a5d1-4414-b87a-dc0ac74ecbab

[4] ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียความเป็นกรดสูงโดยใช้พืชท้องถิ่นบริเวณพื้นที่ปกปักพันธุกรรมพืชมหาวิทยาลัยพะเยา แหล่งที่มา : http://www.updc.clm.up.ac.th/bitstream/123456789/1053/1/Patteera%20Sarnpra.pdf

[5] การนำน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ประโยชน์ใหม่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งทางการเกษตร แหล่งที่มา : https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:281713

[6] การศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะของการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบจมตัว กรณีศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา แหล่งที่มา : https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/7116/6/312371.pdf

[7] Global Treat. (2025). Wastewater Treatment. Retrieved from global-treat.com

[8] Mitrwater. (2025). How is the Wastewater Management System? Retrieved from mitrwater.com

[9] aceken. (2025). Wastewater Treatment Process. Retrieved from aceken.com

[10] กรมควบคุมมลพิษ. (2025). คู่มือการบำบัดน้ำเสีย. Retrieved from cac.pcd.go.th

[11] Lin, J., Liu, H., & Zhang, F. (2023). Design and Performance of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Environmental Engineering Journal, 25(4), 102-114.

[12] Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Retrieved from www.epa.gov.

[13] Jones, P., Brown, T., & Smith, K. (2024). Applications of Constructed Wetlands in Wastewater Treatment. Environmental Science and Technology, 34(2), 221-230.

[14] กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น. (2566). แนวทางการบริหารจัดการน้ำเสียชุมชน. กระทรวงมหาดไทย. แหล่งที่มา : https://www.dla.go.th/work/e_book/eb1/10_9.pdf

[15] Environmental Protection Agency. (n.d.). คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียแบบกระจายศูนย์ (Onsite Wastewater Treatment Systems Manual). สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา(EPA). แหล่งที่มา : https://www.epa.gov/septic/onsite-wastewater-treatment-systems-manual

[16] Biogas World. (n.d.). ระบบก๊าซชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (Biogas Systems for Wastewater Treatment). แหล่งที่มา : https://www.biogasworld.com

[17] การทบทวนกหารใช้พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่มีการเติมไบโอชาร์จเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย (A Review of Emerged Constructed Wetlands Based on Biochar Filler) แหล่งที่มา : https://doi.org/xxx

[18] มหาวิทยาลัยแม่โจ้. (n.d.). Biochar Filters: การกรองน้ำด้วยถ่านชีวภาพ. แหล่งที่มา : https://erp.mju.ac.th/acticalDetail.aspx?qid=1072

การวิเคราะห์สมดุลน้ำเพื่อการบริหารจัดการน้ำ : กรณีศึกษาพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา

Analysis of water balance for water Management : Case Study of University of Phayao Area

ณัฐวัตร หนูขาว[1*] ปาวีณา โพธิ์วัด[2] สุรสิทธิ์ กุลชนก[3] และนันทพงศ์ กาพย์ไชย[4]
[1,2,3,4] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: nnukown@gmail.com

บทคัดย่อ

ประเทศไทยเผชิญกับปัญหาภัยแล้งที่ทวีความรุนแรงขึ้นจากปรากฏการณ์เอลนีโญ ส่งผลให้หลายพื้นที่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำ รวมถึงมหาวิทยาลัยพะเยาที่เคยประสบวิกฤตการณ์น้ำไม่เพียงพอในช่วงปี พ.ศ. 2558–2559 ซึ่งส่งผลกระทบต่อการอุปโภค-บริโภคของนิสิตและบุคลากร การบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญในการรับมือกับสถานการณ์ดังกล่าว การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อประเมินปริมาณน้ำต้นทุน และเปรียบเทียบกับปริมาณความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ รวมถึงหาแนวทางการบริหารจัดการน้ำอย่างเหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยามีปริมาณน้ำเพียงพอต่อความต้องการใช้งาน โดยปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรวมทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ 13,578,674 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ขณะที่ปริมาณการใช้น้ำรวมของทุกกิจกรรมเฉลี่ยประมาณ 607,977 ลูกบาศก์เมตรต่อปี แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่สามารถรองรับความต้องการใช้น้ำได้อย่างเพียงพอ ผลการศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจสมดุลน้ำในปัจจุบัน และสามารถใช้เป็นแนวทางในการคาดการณ์ความต้องการใช้น้ำในอนาคต ตลอดจนเสนอแนวทางการบริหารจัดการน้ำเพื่อรองรับการขยายตัวของมหาวิทยาลัย ลดผลกระทบจากปัญหาภัยแล้ง และสร้างความมั่นคงด้านน้ำให้กับมหาวิทยาลัยพะเยาในระยะยาว

คำสำคัญ: การบริหารจัดการน้ำ, สมดุลน้ำ, มหาวิทยาลัยพะเยา, ปริมาณน้ำต้นทุน, ความต้องการใช้น้ำ, ความมั่นคงด้านน้ำ

Abstract

Thailand has been facing increasingly severe droughts due to the El Niño phenomenon, leading to water shortages in various regions, including the University of Phayao. In the 2015–2016 period, the university experienced a critical water scarcity crisis, affecting water consumption for students and staff. Effective water resource management is essential to mitigate such challenges in the future. This study focuses on analyzing the water balance in the University of Phayao by assessing the available water resources and comparing them with the water demand from various activities. Additionally, it aims to propose suitable water management strategies. The findings indicate that the university has sufficient water resources to meet its consumption needs. The estimated annual runoff volume is approximately 13,578,674 cubic meters, whereas the total annual water demand for all activities is around 607,977 cubic meters. This comparison suggests that the available water resources in the area are adequate for current usage. The results of this study provide insights into the current water balance, facilitating future water demand forecasting and supporting the development of efficient water management strategies. These strategies will help accommodate the university's growth, mitigate the impacts of drought, and ensure long-term water security for the University of Phayao.

Keywords: water management, water balance, University of Phayao, water resources, water demand, water security

1. บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า ประเทศไทยประสบกับปัญหาภัยแล้งเกี่ยวกับด้านแหล่งน้ำสำหรับการเกษตร และอุปโภคบริโภค และมีแนวโน้มที่รุนแรงขึ้น จากการติดตามสถานการณ์ปรากฏการณ์เอนโซ่ (ENSO) ในเดือนพฤษภาคม 2558 อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณตอนกลางและทางตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรมีค่าสูงกว่าค่าปกติและสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้อุณหภูมิน้ำทะเลที่อยู่ลึก จากผิวน้ำทะเลลงไปจนถึงระดับประมาณ 300 เมตรมีค่าสูงขึ้นกว่าเดือนที่ผ่านมาอย่างเห็นได้ชัด สำหรับระบบบรรยากาศที่ระดับ 850 hPa ลมฝ่ายตะวันตกที่พัดปกคลุมบริเวณเขตศูนย์สูตรของมหาสมุทรแปซิฟิก ยังคงมีค่าผิดปกติเช่นเดียวกับลมฝ่ายตะวันออก ที่ระดับ 200 hPa ได้มีการคาดหมายว่าเนื่องจากความผิดปกติของน้ำทะเลในมหาสมุทรแปซิฟิก และระบบบรรยากาศในเขตศูนย์สูตรยังคงมีแนวโน้มสูงกว่าค่าปกติ และขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ และแบบจำลองเชิงพลวัตแล้ว พบว่าเป็นปรากฏการณ์เอลนีโญ และจะปรากฏไปจนถึงสิ้นปี 2558 และมีโอกาสที่จะพัฒนาเป็นปรากฏการณ์เอลนีโญกำลังแรงได้ ผลกระทบที่จะเกิดกับประเทศไทยมีความเป็นไปได้ว่าระยะนี้ปริมาณฝนในประเทศไทยมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าปกติในหลายพื้นที่และอุณหภูมิเฉลี่ยจะสูงกว่าค่าปกติ

จากปัญหาภัยแล้งในประเทศที่ผ่านมา มหาวิทยาลัยพะเยาในอดีตได้เคยมีวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำในปี พ.ศ. 2558-2559 ซึ่งมหาวิทยาลัยพะเยานับตั้งแต่ได้เข้ามาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ ต.แม่กา อ.เมืองจ.พะเยา ในปี พ.ศ. 2541 วิกฤตการณ์ในครั้งนี้ทำให้นิสิต บุคลากรและผู้ที่มาติดต่องานในมหาวิทยาลัยได้รับความเดือดร้อน ไม่มีน้ำอุปโภคบริโภค นิสิตและบุคลากรที่พักอยู่ภายในมหาวิทยาลัยต้องใช้น้ำกันอย่างประหยัด โดยมหาวิทยาลัยได้เปิดน้ำให้ใช้วันละ 1 ครั้งในเวลาที่กำหนดซึ่งบางครั้งก็ไม่เพียงพอ เนื่องจากน้ำที่ได้จัดเตรียมไว้เพื่อจ่ายให้หมดก่อนที่จะถึงเวลาปิดการใช้น้ำ อีกทั้งแหล่งน้ำต่าง ๆ ที่มหาวิทยาลัยพะเยาใช้ผลิตน้ำประปาก็แห้งขอด ไม่มีน้ำเหลือในอ่างเก็บน้ำ สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในอ่างเก็บน้ำก็ตายไปเป็นจำนวนมาก ส่งกลิ่นเหม็นไปทั่วทั้งบริเวณ จะเห็นว่าปริมาณน้ำในอ่างหลวงแห้งขอด จนไม่สามารถนำมาใช้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 อ่างหลวง เดือนกุมภาพันธ์ 2559
แหล่งที่มาhttps://online.anyflip.com/ayjga/kpac/mobile/?fbclid

วิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยาและบริเวณโดยรอบก่อให้เกิดปัญหาในการผลิตน้ำประปา โดยปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำห้วยนาปอยซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญสำหรับใช้ผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยพะเยา ไม่มีน้ำคงเหลือในอ่างเก็บน้ำและไม่สามารถจ่ายน้ำให้แก่มหาวิทยาลัยพะเยาสำหรับใช้ผลิตน้ำประปาได้ ประกอบกับปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแห่งที่ 1 และแห่งที่ 2 ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำรองภายในมหาวิทยาลัยมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอสำหรับใช้ในช่วงหน้าแล้ง มหาวิทยาลัยพะเยาจึงได้กำหนดมาตรการต่าง ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาขาดแคลนน้ำและให้สามารถผ่านพ้นวิกฤตการณ์ในครั้งนั้น

ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวพบว่า อ่างน้ำที่ใช้ คือ ห้วยนาปอย อ่างหลวง และอ่างนกยูง มีปริมาณความจุของอ่างเก็บน้ำที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยพะเยา จึงทำให้จำเป็นต้องซื้อน้ำจากการประปาส่วนภูมิภาคมาเพิ่มเติม โดยข้อมูลที่มีอ้างอิงจากปีที่มีการเกิดภัยแล้งที่เป็นสาเหตุของการขาดแคลนน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยา ปีพ.ศ. 2558 พบว่าอ่างน้ำทั้ง 3 อ่าง มีความจุต่อปริมาณการใช้น้ำที่ไม่เพียง และการคาดการณ์จำนวนของนิสิตนักศึกษาหรือบุคลากรในสถานศึกษาที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี อาจส่งผลต่อการใช้งานน้ำที่มากขึ้นและอาจส่งผลทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำอีกครั้ง จึงได้มีการขุดเจาะเพื่อเพิ่มปริมาณของอ่างเก็บน้ำเพิ่ม ซึ่งจากข้อมูลพบว่าปีที่ผ่าน ๆ มามีการเพิ่มขึ้นของบุคลากรในมหาวิทยาลัยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงอาจทำให้การเพิ่มปริมาณความจุของบ่อน้ำในปี 2558 มีความจุที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานในปีต่อ ๆ ไป ทำให้จำเป็นต้องคาดการณ์การใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นจากจำนวนบุคลากรที่เพิ่มขึ้นและหาวิธีการแก้ไขปัญหาในวิธีต่าง ๆ เพื่อทำการแก้ไขต่อไป

ด้วยเหตุนี้ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ศึกษา ประกอบกับวิเคราะห์สมดุลน้ำเพื่อนำไปสู่แนวทางการบริหารจัดการน้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยาต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์

1.1.1 เพื่อประเมินปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณความต้องการน้ำ และวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา
1.1.2 เพื่อวิเคราะห์ หาวิธีการป้องกันและแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำภายในมหาวิทยาลัยที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

1.2 ขอบเขตการศึกษา

1.2.1 พื้นที่ศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
1.2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลทุติยภูมิช่วงเวลาปี พ.ศ.2560-พ.ศ.2565เท่านั้น
1.2.3 ระยะเวลาการศึกษา 2 ภาคการศึกษา (ปีการศึกษา2567/1-2567/2)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณน้ำใช้ และสามารถนำไปวิเคราะห์คาดคะเนข้อมูลสมดุลน้ำในปีต่อ ๆ ไปได้
1.3.2 วิธีรับมือกับภัยแล้งของมหาวิทยาลัยพะเยา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 สมดุลน้ำ (Water Balance)

สมดุลน้ำเป็นหลักสำคัญในการคำนวณ และการจัดการทรัพยากรแหล่งน้ำ โดยพิจารณาหน่วย ๆ หนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ ซึ่งอาจจะเป็นพื้นที่รับน้ำ อ่างเก็บน้ำ แปลงนา หรือส่วนของแม่น้ำก็ได้ เรียกหน่วยที่พิจารณาว่าปริมาตรควบคุม (Control Volume) หลักการของสมดุลน้ำกล่าวว่า ในปริมาตรควบคุมอันหนึ่ง อัตราการไหลเข้าของน้ำหักออกด้วยอัตราการไหลออกย่อมมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ (Storage) ในปริมาตรควบคุมนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I - Q = dS/dt \qquad (1)$$

เมื่อ I คืออัตราการไหลเข้า Q คือ อัตราการไหลออก S คือ ปริมาณน้ำใน Control Volume และ t คือ เวลา dS/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในการคำนวณสมดุลน้ำ ทำการพิจารณาส่วนประกอบของการไหลเข้า และการไหลออกให้ครบถ้วนที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยปกติส่วนประกอบของการไหลเข้า (Inflow) ได้แก่ ฝน การไหลเข้าทางผิวดิน (Surface Inflow) การไหลเข้าใต้ดิน (Subsurface Inflow) ส่วนประกอบการไหลออก (Outflow) ได้แก่ การระเหย (Evaporation) การไหลออกทาง

ผิวดิน (Surface Outflow) และการไหลออกทางใต้ดิน (Subsurface Outflow) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P + Ri + Gi - E - Ro - Go = \Delta S / \Delta t \qquad (2)$$

เมื่อ P คือ อัตราการตกของฝน Ri และ Ro คือ อัตราการไหลผิวดินไหลเข้า และการไหลออกตามลำดับ Gi และ Go คือ อัตราการไหลใต้ผิวดินไหลเข้า และไหลออกตามลำดับ และ ΔS/Δt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเก็บกัก

2.1.2 ภัยแล้ง (Drought)

คือ ภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดสภาวะแห้งแล้งในอากาศ รวมถึงพื้นดินจากการขาดแคลนน้ำ และหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) เป็นระยะเวลานาน โดยทั่วไปแล้วระดับความรุนแรงของภัยแล้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งความชื้นในอากาศ และดิน ปริมาณที่ฝนตกน้อย การเกิดพายุหมุนเขตร้อนและไซโคลน เป็นต้น หากความแห้งแล้งเกิดขึ้นในพื้นที่กว้างเป็นระยะเวลานานโดยมีปริมาณฝนตกเล็กน้อย บริเวณดังกล่าวจะถูกจัดอยู่เป็นพื้นที่วิกฤตภัยแล้งระดับรุนแรง ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องหาทางแก้ไขภัยแล้งนี้อย่างเร่งด่วน

ภัยแล้ง ส่งผลให้ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ รวมถึงความชื้นในอากาศลดน้อยลง จนนำมาสู่วิกฤตขาดแคลนน้ำ และอาหาร เนื่องจากไม่สามารถเพาะปลูกได้ หรือทำให้ปศุสัตว์ล้มตาย นอกจากนี้ ความขาดแคลนจากภัยแล้งยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สุขอนามัย ตลอดจนการสร้างสันติภาพ

การเกิดภัยแล้งทั่วโลกมีปัจจัยหลักมาจาก 2 สาเหตุ ดังนี้

ภัยแล้งจากธรรมชาติ : เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ระดับน้ำทะเล และอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศโลก ส่งผลให้มีสภาพอากาศแปรปรวนในช่วงฤดูกาลปกติ ปริมาณฝนตกทิ้งช่วงนานกว่าปกติ ตลอดจนกระตุ้นให้เกิดพายุหมุนเขตร้อนในมหาสมุทร หรือไซโคลน การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้นับเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดภัยธรรมชาติอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น แผ่นดินไหว หรือพายุโหมกระหน่ำ เป็นต้น

ภัยแล้งจากการกระทำของมนุษย์ : กิจกรรมทางภาคเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม เกษตรกรรม การสร้างมลภาวะจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า เป็นพฤติกรรมที่กระตุ้นให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ หรือ Climate change ที่นำมาสู่ปัญหาภัยแล้งในหลายพื้นที่ทั่วโลก

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์สมดุลน้ำ การจัดทำบัญชีสมดุลน้ำและผลิตภาพจากน้ำ (Water Balance Analysis, Water Accounting and Water Productivity) ภายใต้ โครงการวิเคราะห์สถานะของความมั่นคงด้านน้ำ ผลิตภาพจากน้ำ และภัยพิบัติ เพื่อใช้ในการจัดทำแผนแม่บทโดยเฉพาะด้านน้ำโดย : รศ.ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และ ดร.โชคชัย สุทธิธรรมจิต (27 เม.ย. 2562)

การพัฒนาทรัพยากรน้ำของประเทศไทยได้รับการบรรจุในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ เริ่มต้นตั้งแต่ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2520-2524) โดยในปัจจุบันได้เน้นการบริหารจัดการน้ำแบบบูรณาการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้น้ำ โดยเฉพาะในภาคเกษตรซึ่งใช้น้ำถึง 90% ของปริมาณน้ำทั้งหมดในประเทศ แนวโน้มการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นในอนาคตอาจนำไปสู่สภาวะวิกฤตน้ำ ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และก่อให้เกิดความขัดแย้งระหว่างภาคส่วนต่างๆ เช่น ชนบทกับเมือง หรือภาคเกษตรกับภาคอุตสาหกรรม

ในปี พ.ศ. 2560 รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทยได้กำหนดให้มีการจัดทำยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) เพื่อเป็นกรอบในการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน โดยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรน้ำ ได้มีการกำหนดแผนย่อยไว้ 3 ด้าน ได้แก่ การพัฒนาการจัดการน้ำเชิงลุ่มน้ำทั้งระบบ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำอย่างประหยัดและสร้างมูลค่าเพิ่ม และการอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วประเทศ

แผนดังกล่าวมุ่งเน้นการพัฒนาการบริหารจัดการน้ำในมิติต่างๆ เพื่อรองรับการเติบโตของเศรษฐกิจและสังคม รวมถึงลดผลกระทบจากวิกฤตน้ำในอนาคต และสนับสนุนความมั่นคงด้านน้ำ พลังงาน และอาหารของประเทศอย่างยั่งยืน

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน : กรณีศึกษาหมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอภูเวียง 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 รชยา ธารากุลทิพย์ และ ทรงวุฒิ แสงจันทร์ (ธ.ค. 2558)

น้ำเป็นทรัพยากรสำคัญต่อการเกษตร ซึ่งการขาดแคลนน้ำส่งผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรอย่างรุนแรง การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น การทำลายป่าไม้ต้นน้ำ และปรากฏการณ์แอลนิโญ ทำให้ฝนตกไม่เป็นไปตามฤดูกาลและเกิดฝนทิ้งช่วงนานขึ้น ส่งผลให้ประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้ง โดยเฉพาะพื้นที่นอกเขตชลประทาน

หมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งมีพื้นที่ 3,874 ไร่ เป็นพื้นที่ราบลุ่มนอกเขตชลประทาน พึ่งพาน้ำฝนในการเพาะปลูกพืชหลัก เช่น ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง มักประสบปัญหาขาดแคลนน้ำในฤดูแล้งทุกปี แม้จะมีแหล่งเก็บน้ำในพื้นที่ แต่กลับไม่สามารถรองรับน้ำฝนได้เพียงพอ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเพียงพอของปริมาณน้ำท่าเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้น้ำในทุกกิจกรรมของหมู่บ้าน โดยศึกษารายละเอียดเป็นรายเดือนและนำข้อมูลมาวางแผนจัดการน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักน้ำให้เพียงพอต่อการใช้งานทั้งด้านการเกษตรและอุปโภคบริโภคอย่างยั่งยืน

การศึกษาศักยภาพการกักเก็บน้ำเพิ่มเติมด้วยสระขนาดเล็กในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยปาสักส่วนที่ 2 Study of Small Pond Water Storage Increment Potential in Pasak II-Subbasin โดยธนพันธ์ ตรีชั้น1 , สิตางศุ์ พิลัยหล้า2 1 นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ 2

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เม.ย. 2561)

ลุ่มน้ำป่าสักส่วนที่ 2 เป็นพื้นที่ต้นน้ำของลุ่มน้ำป่าสัก โดยพื้นที่ร้อยละ 94.85 ใช้เพื่อเกษตรกรรมที่พึ่งพาน้ำฝนเป็นหลัก การวิเคราะห์สมดุลน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2560 พบว่า น้ำท่าเฉลี่ยที่ไหลผ่านลุ่มน้ำป่าสักส่วนนี้เท่ากับ 1,142.12 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำในปัจจุบัน (762.98 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี) และในอนาคตอีก 20 ปี (852.27 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี) อย่างไรก็ตาม มีแนวโน้มการขาดแคลนน้ำในหน้าแล้ง (พฤศจิกายน-มีนาคม)

เพื่อแก้ปัญหานี้ งานศึกษานี้เสนอแนวทางกักเก็บน้ำเพิ่มเติมในพื้นที่ศักยภาพ 244,175 ไร่ (35.55% ของพื้นที่เกษตรกรรม) โดยแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา การจัดการพื้นที่โคก หนอง นา กักเก็บน้ำได้ 470 ล้าน ลบ.ม. การจัดการพื้นที่โคก นา และสระขนาดเล็ก: กักเก็บน้ำได้ 265 ล้าน ลบ.ม. และการจัดการพื้นที่นาและสระขนาดเล็ก ไม่มีพื้นที่โคก: กักเก็บน้ำได้ 292 ล้าน ลบ.ม.

กรณีที่ 1 และ 2 ช่วยให้ปลูกข้าวนาปีและนาปรังได้เต็มพื้นที่ 93,919 ไร่ ขณะที่กรณีที่ 3 ปลูกได้ 187,229 ไร่ หากแนวทางนี้ผสานกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่มีอยู่ จะช่วยให้เกษตรกรและผู้ใช้น้ำในลุ่มน้ำได้รับประโยชน์สูงสุด

การวิเคราะห์สมดุลน้ำ และศักยภาพการส่ง น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรัง (An analysis of water balance and water supply potential of Sakaekrang River Basin) โดยปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา – ชลประทาน) ภาควิชา วิศวกรรมชลประทาน

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน: รองศาสตราจารย์บัญชา ขวัญยืน (พ.ศ. 2562)

การจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำสะแกกรัง ลุ่มน้ำสะแกกรัง ตั้งอยู่ในภาคกลางของประเทศไทย ครอบคลุมพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ อุทัยธานี นครสวรรค์ ชัยนาท และกำแพงเพชร โดยมีแหล่งน้ำสำคัญ เช่น อ่างเก็บน้ำทับเสลา และเขื่อนทดน้ำวังร่มเกล้า รวมพื้นที่ชลประทาน 655,700 ไร่

จากการศึกษาศักยภาพน้ำและความเพียงพอในการใช้น้ำ พบว่าปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งมีน้ำขาดแคลนเฉลี่ย 100–188 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ทั้งนี้ พื้นที่เพาะปลูกจำเป็นต้องลดลงตามปีน้ำท่ามาก ปานกลาง และน้อย

แนวทางแก้ปัญหา ได้แก่ การลดพื้นที่เพาะปลูก การเลือกปลูกพืชที่ใช้น้ำน้อย การพัฒนาแหล่งน้ำสำรอง เช่น สระน้ำส่วนตัวและน้ำบาดาล รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ เพื่อให้การเกษตรในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรังสามารถดำเนินไปได้อย่างยั่งยืนและลดผลกระทบจากการขาดแคลนน้ำในอนาคต

การบริหารและการประมวลผลการศึกษาโครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อเสนอแนะสมดุลน้ำ และ มาตรการลดการใช้น้ำเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนในการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ 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 วงษ์เพ็ชร์, ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ (พ.ศ. 2563)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อทบทวนการศึกษาด้านน้ำในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ในช่วง 5-10 ปีที่ผ่านมา โดยมุ่งเน้นการประเมินความต้องการน้ำ น้ำต้นทุน และการวิเคราะห์สมดุลน้ำในลุ่มน้ำบางปะกง ชายฝั่งทะเลตะวันออก และโตนเลสาป

ผลการศึกษาพบว่า ในปัจจุบันแม้จะไม่มีการขาดแคลนน้ำโดยรวม แต่บางพื้นที่ เช่น จังหวัดชลบุรีและระยอง ยังคงมีปัญหาการขาดแคลนน้ำ โดยการแก้ไขสามารถดำเนินการผ่านระบบผันน้ำจากลุ่มน้ำข้างเคียง สำหรับในอนาคต 20 ปีข้างหน้า คาดว่าจะเกิดการขาดแคลนน้ำเพิ่มในบางพื้นที่ แม้จะมีการพัฒนาแหล่งน้ำใหม่และปรับใช้ระบบผันน้ำ

แนวทางการลดการใช้น้ำเน้นมาตรการ 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) โดยตั้งเป้าหมายลดการใช้น้ำในภาคการเกษตร 10-15% ภาคบริการและการท่องเที่ยว 20-25% และภาคอุตสาหกรรม 25-30% นอกจากนี้ เสนอให้มีการจัดตั้งหน่วยบริหารจัดการน้ำในภาคตะวันออก การปกป้องน้ำเพื่อระบบนิเวศ การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงยุทธศาสตร์ และใช้อำนาจตามกฎหมาย EEC เพื่อแก้ไขปัญหาอย่างยั่งยืน

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 สมมติฐานงานวิจัย

การศึกษาสมดุลน้ำระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำในมหาวิทยาลัยพะเยา จะสามารถป้องกันและแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำในมหาวิทยาลัยได้

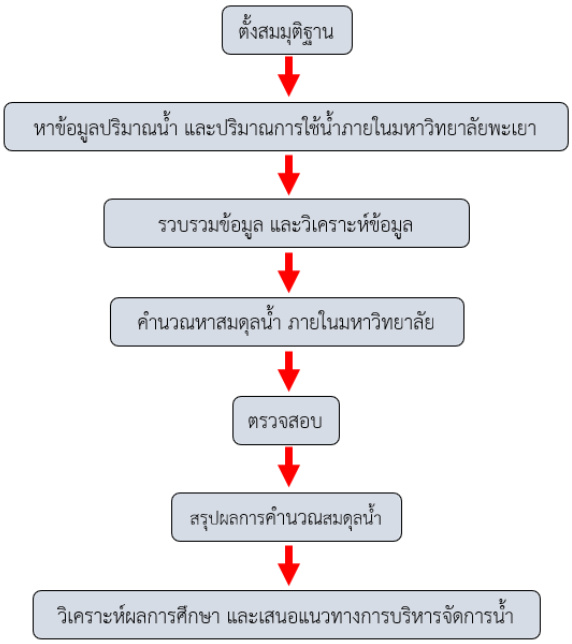
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 โปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ Excel
3.2.2 ข้อมูลจากเว็ปไซต์กองอาคารสถานที่มหาวิทยาลัยพะเยา
3.3.3 ขั้นตอนการวิจัย

แผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณการใช้น้ำ และจำนวนประชากรที่อาจเพิ่มขึ้นของมหาวิทยาลัยพะเยา
2. หาข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณการใช้น้ำในปัจจุบันและในปีก่อนหน้า และอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรของมหาวิทยาลัยพะเยาซึ่งแปลผันโดยตรงกับปริมาณการใช้น้ำ
3. นำข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า และการวิเคราะห์ มาทำการประมวลผล
4. คำนวณสมดุลน้ำระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา
5. ทำการตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยาว่ามีสมดุลระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณการใช้น้ำหรือไม่
6. สรุปผลการคำนวณสมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยา

7. วิเคราะห์ผลการศึกษา และเสนอแนวทางการบริหารจัดการน้ำที่จะทำให้สมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยพะเยามีความมั่นคงและยั่งยืน

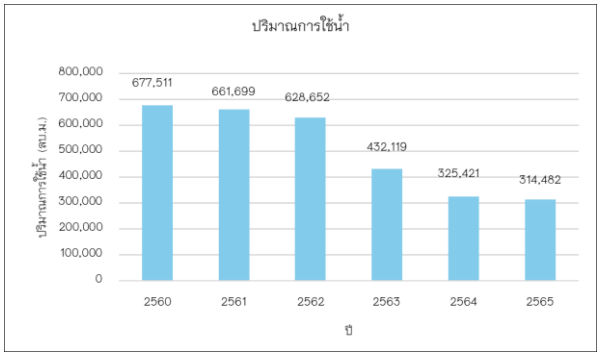


รูปที่ 2 แผนผังการทำเนินงานวิจัย

4. ผลการศึกษา

4.1 ปริมาณการใช้น้ำ

รูปที่ 3 แสดงข้อมูลปริมาณการใช้น้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2565 คิดปริมาณการใช้น้ำจากส่วนอุปโภคบริโภค และจัดกิจกรรมต่าง ๆ ปริมาณการใช้น้ำมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง ในช่วงปี 2563 เป็นต้นมา มหาวิทยาลัยอาจมีการปรับรูปแบบการเรียนการสอนเป็นระบบออนไลน์ เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้จำนวนนักศึกษา และบุคลากรที่เข้ามาใช้งานสถานที่ในมหาวิทยาลัยลดลง ส่งผลให้การใช้น้ำลดลงอย่างมาก และในช่วงปี 2564 นักศึกษาส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในหอพักภายนอกมหาวิทยาลัยมากกว่าหอพักภายในมหาลัย ส่งผลให้การใช้น้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยลดลง



รูปที่ 3 ปริมาณการใช้น้ำ พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2565

4.2 ปริมาณน้ำต้นทุน

แบ่งออกเป็น 2 แหล่งดังนี้

4.2.1 น้ำใต้ดิน

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของน้ำใต้ดิน โดยจะคิดได้จากความลึกของอ่าง อัตราการไหลของน้ำ เวลาในการสูบน้ำ จำนวนวันในการสูบน้ำ

ตารางที่ 1 รายละเอียดบ่อน้ำบาดาล

ลำดับ	สถานที่	ความลึก เมตร	อัตราการไหล ลบ.ม/ชั่วโมง	เวลาในการสูบ/วัน ชั่วโมง	จำนวนวันในการสูบ/ปี วัน	ปริมาณน้ำใต้ดินใช้งาน ลบ.ม
1	อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ	138	7	6	365	15,330
2	อาคารเรียนรวมและหอสมุด	150	10	10	365	36,500
3	อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา	162	10	6	365	21,900
4	อาคารเรียนรวมหลังเก่า	150	10	8	365	29,200
5	อาคารปฏิบัติการ 12หลัง	150	10	8	365	29,200
6	หอพักนิสิต มพ. 1	138	5	6	365	10,950
7	โรงประปา 1 บ่อที่ 1	150	8	8	365	23,360
8	โรงประปา 1 บ่อที่ 2	150	10	8	365	29,200
9	โรงประปา 1 บ่อที่ 3	150	8	8	365	23,360
10	หอประชุมพญางำเมือง	150	8	6	365	17,520
					รวม	236,520

4.2.2 ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลของอ่างเก็บน้ำทั้ง 3 อ่าง ประกอบด้วยอ่างนกยูง อ่างห้วยนาปอย อ่างหลวง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2560 ถึง พ.ศ.2565 โดยเฉลี่ยแล้วมีปริมาณน้ำประมาณ 11,118,461 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2 รายละเอียดอ่างเก็บน้ำภายในมหาวิทยาลัยพะเยา

ปี	อ่างหลวง (ลบ.ม.)	อ่างนกยูง (ลบ.ม.)	อ่างห้วยนาปอย (ลบ.ม.)	รวม
2560	7,276,005	3,013,281	2,101,200	12,390,486
2561	7,920,000	4,977,840	3,934,650	16,832,490
2562	7,325,802	3,868,494	2,017,981	13,212,277
2563	1,195,030	1,472,550	1,139,444	3,807,024
2564	3,392,769	1,875,785	1,481,750	6,750,304
2565	6,592,891	3,829,296	3,296,000	13,718,187

4.3 วิเคราะห์สมดุลน้ำ

4.3.1 วิเคราะห์สมดุลน้ำโดยคำนวณน้ำต้นทุนจากน้ำใต้ดินเพียงอย่างเดียว ผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปริมาณน้ำใต้ดินไม่เพียงพอต่อการใช้งานดังรูปที่ 4



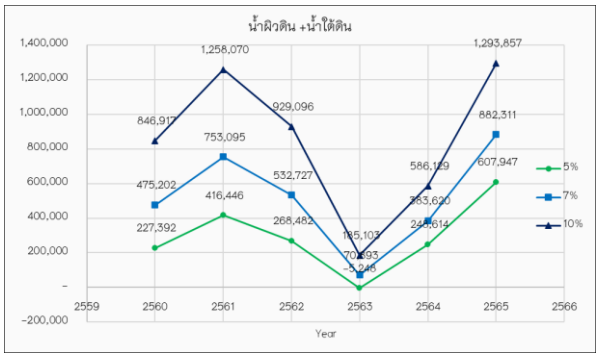
รูปที่ 4 สมดุลน้ำจากการใช้น้ำต้นทุนจากน้ำใต้ดินเพียงอย่างเดียว

4.3.2 วิเคราะห์สมดุลน้ำโดยคำนวณน้ำต้นทุนจากน้ำใต้ดิน และน้ำในอ่างเก็บน้ำ โดยปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่นำมาวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 3 กรณีได้ดังนี้

1. ใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำในปริมาณ 5% ของอ่างผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปีที่เกิดภัยแล้งปรากฏว่าปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 5

2. ใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำในปริมาณ 7% ของอ่างผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปีที่เกิดภัยแล้งปรากฏว่าปริมาณน้ำเพียงพอต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 5

3. ใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำในปริมาณ 10% ของอ่างผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำที่ได้ คือ ปีที่เกิดภัยแล้งปรากฏว่าปริมาณน้ำเพียงพอต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สมดุลน้ำจากการใช้น้ำต้นทุนจากน้ำใต้ดิน และน้ำผิวดิน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำและปริมาณน้ำต้นทุน พบว่าแหล่งน้ำในพื้นที่มีความเพียงพอต่อการใช้งานในภาพรวมอย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบปริมาณน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำใต้ดินเพียงอย่างเดียว พบว่าปริมาณน้ำใต้ดินไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยเฉพาะในช่วงภัยแล้งเดือนมีนามีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม

การวิเคราะห์สมดุลน้ำจากน้ำใต้ดินร่วมกับน้ำในอ่างเก็บน้ำได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำ 5% ของความจุอ่างพบว่าปริมาณน้ำค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะในปี 2563 ที่มีค่า -5,248 ลบ.ม. ซึ่งแสดงถึงความไม่เพียงพอของน้ำอย่างชัดเจน

กรณีใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำ 7% ของความจุอ่างพบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากกรณี 5% และเริ่มเพียงพอต่อการใช้งานในบางปี อย่างไรก็ตาม ในปี 2563 ยังพบปริมาณน้ำต่ำสุด

กรณีใช้น้ำในอ่างเก็บน้ำ 10% ของความจุอ่างพบว่าปริมาณน้ำเพียงพอต่อการใช้งานในทุกปี แม้ในปีที่เกิดภัยแล้ง โดยมีปริมาณน้ำสูงสุดถึง 1,293,857 ลบ.ม. ในปี 2565

6. ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการวิเคราะห์เห็นได้ว่า การใช้น้ำในสัดส่วน 10% ของความจุอ่างเก็บน้ำร่วมกับน้ำใต้ดินสามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในช่วงปีที่เกิดภัยแล้ง ในขณะที่กรณี 5% และ 7% ยังมีความเสี่ยงต่อปัญหาการขาดแคลนน้ำ โดยเฉพาะกรณี 5% ที่มีความเสี่ยงสูงที่สุด

2. เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และลดต้นทุนด้านค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำบาดาล เสนอให้เพิ่มการใช้น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำเป็นแหล่งน้ำหลัก เนื่องจากปัจจุบันมีปริมาณน้ำเพียงพอต่อความต้องการ การใช้น้ำผิวดินจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงานสูบน้ำบาดาล อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ยั่งยืนในการจัดการทรัพยากรน้ำ และรักษาระดับน้ำใต้ดินให้คงอยู่ในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำ และปริมาณน้ำในพื้นที่ สำเร็จโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำแนะนำช่วยตรวจสอบ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินโครงงาน ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณกองอาคารสถานที่มหาวิทยาลัยพะเยาที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษาที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณต่อสมาชิกในกลุ่มทุกคนที่ร่วมมือกันด้วยความตั้งใจและความมุ่งมั่น จนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] การวิเคราะห์สมดุลน้ำ การจัดทำบัญชีสมดุลน้ำและผลิตภาพจากน้ำ (Water Balance Analysis, Water Accounting and Water Productivity) ภายใต้ โครงการวิเคราะห์สถานะของความมั่นคงด้านน้ำ ผลิตภาพจากน้ำ และภัยพิบัติ เพื่อใช้ในการจัดทำแผนแม่บท โดยเฉพาะด้านน้ำโดย : รศ.ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และ ดร.โชคชัย สุทธิธรรมจิต (27 เม.ย. 2562)
แหล่งที่มา
:http://projectwre.eng.chula.ac.th/watercu_eng/sites/default/files/reserch/รายงานบัญชีน้ำ.pdf

[2] การวิเคราะห์ปริมาณน้ำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน : กรณีศึกษาหมู่บ้านหนองโพน ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น โดย รชยา ธารากุลทิพย์ และ ทรงวุฒิ แสงจันทร์ (8 ธ.ค. 2558)
แหล่งที่มา :
https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/download_digital_file/20002162/144989

[3] การศึกษาศักยภาพการกักเก็บน้ำเพิ่มเติมด้วยสระขนาดเล็กในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยป่าสักส่วนที่ (2 เมษายน 2561)
แหล่งที่มา :
https://www.rid.go.th/Thaicid/_5_article/14symposium/Study-of-Small-Pond-Water-Storage-Increment-Potential.pdf

[4] โครงงานวิศวกรรมชลประทาน เรื่องการวิเคราะห์สมดุลน้ำ 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] โครงการการบริหารและการประมวลผลการศึกษาโครงการวิจัย เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะสมดุลน้ำและมาตรการลดการใช้น้ำเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนในการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ ภาคตะวันออก (EEC) แหล่งที่มา: https://irre.ku.ac.th/rreport/pdf/FinalReport%20EEC_SIP6230009.pdf

การออกแบบระบบผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกว๊านพะเยา

Design of a Water Diversion System from Mae Na Rua Reservoir to Kwan Phayao in order to increase the efficiency of Kwan Phayao

นายภาณุพงษ์ ชาวส้าน[1*] นางสาวปฐมพร ขานนาม[2] นางสาวจันทิมา เรืองวิเชียร[3] และนางสาววาสนา ญาณธรพิเชฐ[4]

[1,2,3,4] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*

**Corresponding author; E-mail address: 64102047@up.ac.th*

บทคัดย่อ

กว๊านพะเยาเกิดปัญหาภัยแล้งอย่างหนักในปีพ.ศ 2559 และ 2562 ส่งผลให้ปริมาณน้ำในกว๊านพะเยามีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการอุปโภค-บริโภค การเกษตรกรรม และการท่องเที่ยว อีกทั้งคนในชุมชน เจ้าหน้าที่และหน่วยงานต่าง ๆ ในพื้นที่มีความประสงค์จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงเกิดการทำงานร่วมกันระหว่างชุมชน หน่วยงานในพื้นที่ และสาขาวิศวกรรมโยธา และได้แนวคิดการแก้ปัญหาดังนี้ โดยจะทำการผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือมายังกว๊านพะเยา เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ผู้ศึกษาจึงทำการออกแบบระบบผันน้ำดังกล่าวตามหลักวิธีการของ Manning โดยระบบผันน้ำประกอบด้วย 2 รูปแบบ ช่วงที่ 1 (กม. 0+000 ถึง กม. 1+500) เป็นท่อคอนกรีตวงกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตร และมีความชัน 0.033 และช่วงที่ 2 (กม. 1+500 ถึง กม. 10+000) ทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีความกว้างก้นคลอง 1.50 เมตร ความลึกจากก้นคลองถึงความสูงพ้นน้ำ (Freeboard) 0.95 เมตร มีความลาดเอียงด้านข้างเป็น 1:2 ปริมาณน้ำที่สามารถส่งได้โดยที่ผู้ใช้น้ำจากอ่างแม่นาเรือไม่ได้รับผลกระทบอยู่ที่ 1.563 ล้าน ลบ.ม. มีอัตราการไหลเท่ากับ 3.618 ลบ.ม./วินาที ปริมาณดินตัก 138,974 ลบ.ม. และปริมาณดินถม 179,100 ลบ.ม.

คำสำคัญ : กว๊านพะเยา, คลองผันน้ำ, อ่างเก็บน้ำ, ตำบลแม่นาเรือ

Abstract

In 2016 and 2019, Kwan Phayao faced severe droughts, resulting in insufficient water levels to support consumption, agriculture, and tourism. Therefore; of the community, officials, and concerned agencies expressed the desire to resolve this issue, leading to collaborative efforts between the local community, community agencies, and the Civil Engineering department. The proposed solution involved diverting water from the Mae Na Rua Reservoir to Kwan Phayao to increase water availability. The study designed the water diversion system using Manning's formula. The system consists of two sections; the first section (km 0+000 to km 1+500): A circular concrete pipe with a diameter of 1.00 meter and a slope of 0.033 and the second sector (km 1+500 to km 10+000): an open trapezoidal canal with a bottom width of 1.50 meters, a depth of 0.95 meters (including freeboard), and side slopes of 1:2. The system is capable of delivering a water volume of 1.563 million cubic meters without affecting water users from the Mae Na Rua Reservoir, with a flow rate of 3.618 m^3/s. The calculated of soil excavated volume is 138,974 m^3, and the fill volume is 179,100 m^3.

Keywords: Kwan Phayao, water diversion canal, reservoir, Mae Na Rua Subdistrict

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกว๊านพะเยามีเนื้อโดยที่ประมาณ 12,831 ไร่ หรือประมาณ 20.5 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสามารถเก็บกักน้ำได้ 33.84 ล้าน ลบ.ม และสามารถส่งน้ำให้พื้นที่การเกษตรท้ายกว๊านพะเยาในฤดูฝนได้ประมาณ 300,000 ไร่ และฤดูแล้งได้ 13,000 ไร่ กว๊านพะเยามีความสามารถในการกักเก็บลดลงเนื่องจากสาเหตุจากตะกอนดินจากลำน้ำอิงและลำน้ำโดยรอบที่พัดมาทับถมในกว๊านพะเยา ปริมาณตะกอนที่พัดพามาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีอัตราเพิ่มขึ้นเนื่องจากการ ทำลายป่าไม้ต้นน้ำลำธาร ระบบการผลิตด้านการเกษตรรอบกว๊านพะเยาทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของหน้าดินลงสู่แหล่งน้ำและมีการพัฒนาที่ดินโดยการถม รวมทั้งพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐานต่าง ๆ ส่วนด้านคุณภาพน้ำนั้น กว๊านพะเยาคุณภาพต่ำลงเนื่องจากพื้นที่กว๊านพะเยาเป็นพื้นที่ราบลุ่มน้ำคล้ายแอ่งกระทะจึงทำให้กว๊านพะเยาเป็นแหล่งรองรับการไหลของเสียที่มากับน้ำโดยเฉพาะของเสีย สารเคมีและน้ำเสียจากชุมชน และพื้นที่โดยรอบ ในปัจจุบันชุมชนโดยรอบกว๊านพะเยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตเทศบาลเมืองพะเยามีการขยายตัวอย่างมาก รวมถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นได้ระบายและไหลลงสู่กว๊านพะเยามีปริมาณมากขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการกักเก็บน้ำของกว๊านพะเยาน้อยลง ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถเจือจางความสกปรกในกว๊านพะเยาลดลงด้วย และในปี พ.ศ. 2562 ได้เกิดภัยแล้งที่กว๊านพะเยาทำให้ปริมาณ

น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค รวมทั้งการผลิตน้ำประปาที่สำคัญของจังหวัดพะเยา มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว สาเหตุมาจากปริมาณการใช้น้ำที่เพิ่มสูงขึ้นและอัตราการระเหยของน้ำที่รวดเร็ว โดยในขณะนั้นกว๊านพะเยามีปริมาณน้ำอยู่ที่ 15.90 ล้าน ลบ.ม จากความจุทั้งหมด 33 ล้าน ลบ.ม ดังรูปที่ 1 แสดงเห็นประมาณน้ำกว๊านพะเยาในปี พ.ศ. 2562 แต่ในปี พ.ศ. 2562 ยังมีปริมาณน้ำที่มากกว่าปี พ.ศ. 2559 ที่กว๊านพะเยามีปริมาณน้ำเหลือเพียง 9 ล้าน ลบ.ม และกว๊านพะเยาเกิดเหตุการณ์เช่นเดียวกับปีพ.ศ. 2562 คือ ภัยแล้งในกว๊านพะเยาในปีพ.ศ. 2566 ซึ่งปริมาณน้ำเหลือเพียง 3 ล้าน ลบ.ม ทำให้เกิดภัยแล้งมากกว่าปีที่เคยเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้มีการสั่งการให้มีการกระจายน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำเข้าสู่กว๊านพะเยาประมาณ 2 ล้าน ลบ.ม และมีหน่วยงานทาง ปภ.เขต 15 เข้าร่วมกับชลประทานพะเยาได้ทำการติดตั้งเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่เพื่อที่จะผันน้ำในพื้นที่สันหนองเหนียวเข้าสู่กว๊านพะเยาอีกประมาณ 5 แสน ลบ.ม



รูปที่ 1 เหตุการณ์ภัยแล้งที่กว๊านพะเยาในปี พ.ศ. 2562
แหล่งที่มา https://www.komchadluek.net/news/local/548125



รูปที่ 2 เหตุการณ์ภัยแล้งกว๊านพะเยาในปี พ.ศ. 2566
แหล่งที่มา: https://www.bangkokbiznews.com/lifestyle/travel/1066191

อ่างเก็บน้ำแม่นาเรือ เกิดจากการก่อสร้างเขื่อนดินถมบดอัดขวางลำน้ำแม่นาเรือ บริเวณบ้านสันป่าสัก หมู่ 6 ตำบลแม่นาเรือ อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา เพื่อกักเก็บน้ำไว้เพื่อการเกษตรกรรม โดยพื้นที่รับประโยชน์ 12 หมู่บ้าน 2,500 ไร่ และใช้เพื่ออุปโภคบริโภคของราษฎรตลอดทั้งปี ลักษณะอ่างเก็บน้ำมีความสูง 17 เมตร ความยาวสันอ่าง 495 เมตร ระดับน้ำสูงสุดในอ่าง +494.00 เมตร ระดับเก็บกักในอ่าง +492.00 เมตร ความจุอ่างที่ 2,030,000 ลบ.ม พื้นผิวน้ำในอ่างที่ระดับกักเก็บ 190.50 ไร่ จากการลงพื้นที่เบื้องต้นประกอบกับสอบถามคนในพื้นที่พบว่าปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือมีปริมาณมากกว่าความต้องการน้ำในพื้นที่ ปริมาณน้ำจึงมักจะล้นฝายน้ำล้น ทำให้ไหลทิ้งไปยังท้ายอ่างเก็บน้ำเสมอ

จากปัญหาดังกล่าวพบว่ากว๊านพะเยามีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อแก้ไขภัยแล้งเกือบทุกปี ดังนั้นคนในชุมชน เจ้าหน้าที่ หน่วยงานต่าง ๆ และผู้ศึกษาเล็งเห็นปัญหาที่เกิดขึ้น จึงร่วมกันหาแนวทางแก้ปัญหา โดยมีแนวทางดังนี้ ศึกษาออกแบบคลองผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือที่มีปริมาณมากพอไปยังกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำในกว๊านพะเยาให้เพียงพอต่อความต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือและกว๊านพะเยา
2. เพื่อศึกษาเส้นทางน้ำที่เป็นไปได้ในการวางคลองผันน้ำ
3. เพื่อออกแบบคลองผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยา
4. เพื่อประเมินปริมาณดินขุด-ดินถม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ขอบเขตพื้นที่ : ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นทางอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยา
2. ขอบเขตของข้อมูล : ข้อมูลปริมาณน้ำที่สามารถผันได้ประเมินจากข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data)
3. ระยะเวลา : สองภาคเรียนการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้รู้ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่การศึกษา
2. ได้ระบบผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือมายังกว๊านพะเยา เพื่อแก้ปัญหาภัยแล้ง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

คลองน้ำเปิด (Open channel) หมายถึง คลองหรือทางน้ำที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อระบายน้ำหรือส่งน้ำ ซึ่งมีลักษณะผิวน้ำสัมผัสกับอากาศ น้ำจะไหลบนพื้นผิวโดยไม่ถูกปิดคลุมหรือฝังอยู่ใต้ดิน เช่น แม่น้ำ คลอง ชลประทาน หรือท่อระบายน้ำเปิดซึ่งมักถูกใช้เพื่อการระบายน้ำในพื้นที่ชุมชน เกษตรกรรม หรือระบบชลประทานเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ทางน้ำที่เป็นทางน้ำเปิดแบ่งออกได้เป็นทางน้ำตามธรรมชาติและทางน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น

ทางน้ำตามธรรมชาติ คือ ลำน้ำทุกชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติ มีรูปร่างของรูปตัดขวางและขนาดต่างกัน ตั้งแต่ร่องน้ำเล็ก ๆ ตามเชิงเขา ลำห้วย ลำธาร จนถึงแม่น้ำ

ทางน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น คือ ทางน้ำที่ถูกสร้างขึ้นโดยวิเคราะห์จากคุณสมบัติของการไหลในทางธรรมชาติ และมีรูปร่าง ขนาด ความชันที่ถูกออกแบบมาเพื่อเหมาะสมกับการใช้การโดยเฉพาะ

คุณสมบัติของทางน้ำเปิด (Open channel)

1. พื้นผิวเปิดโล่ง คือ น้ำไหลบนพื้นผิวที่เปิด ไม่ถูกปิดคลุมหรือฝังใต้ดิน
2. การไหลด้วยแรงโน้มถ่วง คือ น้ำในทางเปิดมักไหลด้วยแรงโน้มถ่วงจากพื้นที่สูงไปยังพื้นที่ต่ำ
3. การไหลแบบมีผิวสัมผัสกับอากาศ คือ น้ำในทางน้ำเปิดมีการสัมผัสกับอากาศตลอดการไหล ทำให้น้ำระเหยหรือได้รับออกซิเจนจากอากาศ

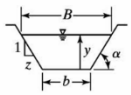
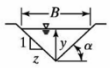
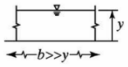
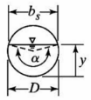
4. ควบคุมการไหลด้วยความชัน คือ อัตราการไหลขึ้นอยู่กับความลาดเอียงของทางน้ำ ถ้าความลาดชันมากน้ำก็จะไหลเร็วขึ้น
5. ขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน คือ ทางน้ำเปิดสามารถมีรูปแบบและขนาดต่าง ๆ ตามธรรมชาติหรือการก่อสร้าง เช่น คลองชลประทานหรือร่องน้ำธรรมชาติ
6. การบำรุงรักษา คือ ต้องมีการดูแลรักษาเพื่อป้องกันการอุดตันจากสิ่งกีดขวาง เช่น เศษขยะ ดิน หรือตะกอน

การไหลทางน้ำเปิด

การไหลในทางน้ำเปิด คือ การไหลที่ผิวของเหลวนั้นเปิดสู่บรรยากาศ เช่น การไหลในแม่น้ำ ลำคลอง หรือการไหลในท่อแบบไม่เต็มท่อ เป็นต้น

ทั้งนี้หากพิจารณาการไหลในทางน้ำที่มีหน้าตัดที่คงที่ ลักษณะทางเรขาคณิตของทางน้ำสามารถหาค่าได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน้าตัดการไหลและลักษณะทางเขาคณิตแบบต่าง ๆ

SHAPE	SECTION	FLOW AREA A	WETTED PERIMETER P	HYDRAULIC RADIUS R
Trapezoidal		$y(b+y\cot\alpha)$	$b+\frac{2y}{\sin\alpha}$	$\frac{y(b+y\cot\alpha)}{b+\frac{2y}{\sin\alpha}}$
Triangular		$y^2\cot\alpha$	$\frac{2y}{\sin\alpha}$	$\frac{y\cos\alpha}{2}$
Rectangular		by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$
Wide flat		by	b	y
Circular		$(\alpha-\sin\alpha)\frac{D^2}{8}$	$\frac{\alpha D}{2}$	$\frac{D}{4}\left(1-\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)$

สมการการไหลในทางน้ำเปิด

ในปี ค.ศ. 1989 วิศวกรชาวอังกฤษ Robert Manning ได้ดัดแปลงให้เป็นสมการที่รู้จักกันดีดังสมการ ที่ 1

$$V = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

สมการนี้ได้พัฒนามาจากสมการต่าง ๆ 7 สมการ โดยใช้ข้อมูลจากห้องทดลองของ Bazin และข้อมูลอื่น ๆ เนื่องจากเป็นรูปที่ง่ายและได้ผลเป็นที่พอใจ จึงเหมาะสมที่จะใช้ในทางปฏิบัติ สมการ Manning จึงเป็นสมการที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการคำนวณการไหลในทางน้ำที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบ Uniform flow จากสมการที่ 1 ของ Manning สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราการไหลได้ดังนี้

$$\mathrm{Q} = \frac{1}{\mathrm{n}}\mathrm{AR}^{\frac{2}{3}}\mathrm{S}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)
n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning coefficient) ดังตารางที่ 2
V = ความเร็วของการไหล (m/s)
A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)
S = ความลาดของลำน้ำ (m/m)
R = รัศมีชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับ A/P (m)
P = เส้นขอบเปียก (m)

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ **Manning's**

ผิวทางน้ำเปิด	n
1.ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (Natural Channels)	
- เรียบและตรง	0.03
- ไหลช้าเนื่องจากมีสระลึกเป็นช่วงๆ	0.04
- แม่น้ำสายหลัก	0.035
2.ทางน้ำเปิดดินขุด (Excavated Earth Channels)	
- เรียบ	0.022
- มีกรวดบ้าง	0.025
- เต็มไปด้วยหญ้า	0.030
- ก้อนหิน	0.035
3.ทางน้ำเปิดดาดผิว (Artificially Lined Channels)	0.012
- คอนกรีตขัดผิว	0.014
- คอนกรีตผิวหยาบ	0.014
- ดินเหนียว	0.025
- หินเรียง	

การไหลในระบบปิด

การไหลทางน้ำปิด คือ การไหลของของไหลภายในท่อหรือทางน้ำที่ถูกปิดล้อมโดยสมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจาก การไหลทางน้ำเปิด (Open Channel Flow) ที่มีพื้นผิวของของไหลสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง

ลักษณะสำคัญของการไหลทางน้ำปิด

1. ของไหลเติมเต็มท่อทั้งหมด และไม่มีพื้นผิวสัมผัสกับอากาศ
2. แรงดันเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนของไหล
3. ใช้สมการเบอร์นูลี (Bernoulli's Equation) และสมการของดาร์ซี-ไวส์บัค (Darcy-Weisbach Equation) ในการวิเคราะห์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบทางผันน้ำ และการประเมินประสิทธิภาพการระบายน้ำโดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์: กรณีศึกษาพื้นที่น้ำท่วมฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ชื่อผู้เขียน: ดวงเดือน พิศนอก และเอกพจน์ อนเทศ (วิทยาลัยการชลประทานกรมชลประทาน), ปี พ.ศ.2556

การศึกษาการออกแบบทางผันน้ำ และการประเมินประสิทธิภาพการระบายน้ำ โดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านแม่น้ำเจ้าพระยา ช่วงตำบลบางกระสั้น อำเภอบางประอิน ถึงตำบลโพแตง อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และขนาดทางผันน้ำ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ทำการออกแบบเท่านั้น ไม่ได้เน้นไปถึงความคุ้มค่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลกระทบต่อสังคม และการเวนคืนที่ดินของประชาชนที่ได้รับผลกระทบในพื้นที่การศึกษา

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของปริมาณน้ำกับพื้นที่หน้าตัดของแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณที่ทำการศึกษา

1. วิเคราะห์หน้าตัดของลำน้ำ ใช้ข้อมูลรูปตัดตามขวางจากสถานีโทรมาตร สถานี TC.29 -TC.55 จำนวน 2 จุด เป็นระยะประมาณ 13 กิโลเมตร สามารถนำมาพล็อตหาหน้าตัดตามขวาง คลองลำน้ำได้ ระยะห่างช่วงละ 500 เมตร

2. ใช้ข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำ จากลำน้ำเจ้าพระยาสายเดิม สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำได้จาก $Q = (\frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}})$

3. นำค่าอัตราการไหลของปริมาณน้ำ ที่ได้จากข้อ 2. มาเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำสายเดิม จะสามารถทราบค่าปริมาณน้ำที่เกินจากลำน้ำเจ้าพระยาเดิมในแต่ละช่วงตัด

สัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิดที่มีขยะและผักตบชวา
ชื่อผู้เขียน: สุวิภา กุศลจูง และเสรี จันทรโยธา (ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร), ปี พ.ศ.2563

จากสมการที่ 2 สามารถคำนวณค่า n ในกรณีการไหลแบบสม่ำเสมอได้จากสมการ

$$n = (\frac{1}{Q} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}) \quad (3)$$

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิด (Manning's roughness coefficient, n) ที่มีขยะและผักตบชวา โดยศึกษาในห้องปฏิบัติการและทดลองในรางน้ำหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 16 เมตร สูง 0.75 เมตร ที่มีการไหลเวียนของน้ำ โดยการศึกษาน้ำได้จำลองขยะที่ลอยอยู่บนผิวน้ำด้วยวัสดุพลาสติกถ่วงน้ำหนักและไม้ จำนวน 75 การทดลอง และผักตบชวา 50 การทดลอง โดยข้อมูลความลึกการไหลในรางน้ำอยู่ระหว่าง 0.45 เมตร ถึง 0.60 เมตร และอัตราการไหลของน้ำอยู่ระหว่าง 7.87 ลิตรต่อวินาที ถึง 17.4 ลิตรต่อวินาที ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ทางน้ำที่มีขยะและผักตบชวาทำให้ค่า n ลดลงสูงสุดประมาณ 20% และ 17% ตามลำดับ ความยาวของขยะและผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า n เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะจมของขยะและผักตบชวาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า n เพิ่มขึ้น

การออกแบบทางน้ำเปิด เพื่อแก้ปัญหาน้ำท่วม: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 108 ช่วงสะพานแม่กลาง-บ้านบ่อแก้ว
ชื่อผู้เขียน: นางสาวขวัญฤทัย เจริญปิยะวิวัฒน์ นายฐาปนันท์ กลมกล่อม นายคณิต ตาคำ และนายจรูญ คำมูล (สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา), ปี พ.ศ.2566

ทางหลวงหมายเลข108 ช่วงสะพานแม่กลาง-บ้านบ่อแก้ว กม 96+950 ตำบลหางดง อำเภอฮอด จังหวัดเชียงใหม่ เป็นพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาน้ำท่วมขังบริเวณผิวทางจราจร ซึ่งเป็นปัญหาของการสัญจรบนท้องถนนสายดังกล่าวติดขัด มาตั้งแต่ปี 2559 จนถึงปัจจุบัน เนื่องจากทางระบายน้ำเกิดการสะสมจากการทับถมของดินโคลนที่ไหลหลากจากช่องเขาลงมา จนทำให้ทางระบายน้ำไม่สามารถระบายน้ำเป็นระยะเวลานาน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาน้ำท่วมขังบริเวณผิวทาง โดยการคำนวณหาอัตราการไหลของคลองส่งน้ำ ท่อลอดระบายน้ำ เพื่อออกแบบทางน้ำเปิดและคำนวณหาปริมาณดินขุดของทางน้ำเปิดทั้งหมด และคาดว่าเมื่อเกิดน้ำป่าไหลหลากและฝนตกหนัก ทางระบายน้ำ ทางน้ำเปิดนั้นจะสามารถช่วยให้ระบายน้ำได้คล่องตัวมากยิ่งขึ้น จากการคำนวณหาอัตราการไหลได้ว่าอัตราการไหลของคลองส่งน้ำมากกว่าอัตราการไหลของท่อลอดระบายน้ำ จึงเป็นสาเหตุให้พื้นที่ศึกษาไม่สามารถระบายน้ำได้อย่างคล่องตัว จึงได้ผลการออกแบบทางน้ำเปิด (ท่อลอด) ใหม่ เป็นท่อลอดเหลี่ยมขนาด กว้าง 2.40 เมตร สูง 2.40 เมตร จำนวน 2 ช่อง มีอัตราการไหลของท่อลอดเหลี่ยมเท่ากับ 36.22 ลบ.ม/วินาที ซึ่งมากกว่าอัตราการไหลของคลองส่งน้ำ และจากการคำนวณหาปริมาณดินขุด-ดินถมของคลองส่งน้ำเดิม สรุปได้ว่าปริมาณดินขุดเท่ากับ 463.70 ลบ.ม และดินถมเท่ากับ 106.17 ลบ.ม

ความสามารถในการระบายน้ำและคุณภาพน้ำของคลองรังสิตประยูรศักดิ์
ชื่อผู้เขียน: ชาญวิทย์ สายหยุดทอง (ภาควิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ), ปี พ.ศ.2565

ในการป้องกันน้ำท่วมกรุงเทพฯ คลองรังสิตมักถูกใช้เป็นคลองผันน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาลงสู่แม่น้ำนครนายกในฤดูฝน ในขณะหน้าแล้งคลองรังสิตก็รับน้ำทิ้งจากชุมชนที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นทุกวัน ด้วยทั้งสองหน้าที่ของคลองรังสิต ถ้ามีเครื่องมือช่วยในการบริหารจัดการ หาความสามารถในการระบายน้ำของคลองรังสิตจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ Hec-Ras เป็นเครื่องมือช่วยในการหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของคลองรังสิต โดยทำการวัดค่าระดับตลอดความยาวคลอง แล้วนำเข้า Hec-Ras เพื่อจำลองสถานการณ์ด้วยอัตราการไหล 9 , 18 , 27 , 36 , 45 , 54 , 63 และ 72 ลบ.ม/วินาที ที่ Manning's values (n) 0.015, 0.020 และ 0.025 และค่าระดับท้ายน้ำ 2.0 และ 3.0 เมตร จากการจำลองพบว่าถ้าระดับท้ายน้ำสูง 3.0 เมตร อัตราการไหล 72 ลบ.ม./วินาที และค่า n 0.025 น้ำจะท่วมพนังกั้นน้ำฝั่งขวาที่สร้างขึ้น ส่วนคุณภาพน้ำของคลองรังสิตในปัจจุบัน ค่า BOD มากกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่บริเวณคลอง 2 และคลอง 9 จัดเป็นแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ไม่เหมาะกับกิจกรรมในชีวิตประจำของคนทุกประเภท

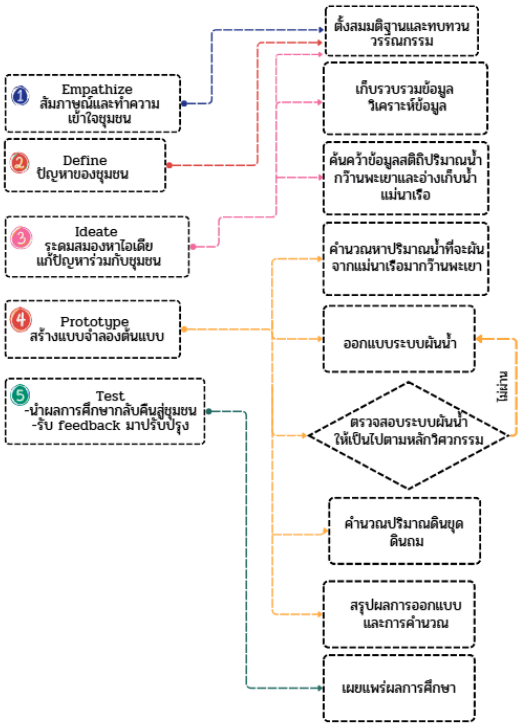
การศึกษาสภาพทางชลศาสตร์คลองส่งน้ำสายใหญ่ชัยนาท-ป่าสัก โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามโนรมย์ จังหวัดชัยนาท
ชื่อผู้เขียน: โบว์แดง ทาแก้ว และสุวัฒนา จิตตลดากร (วิทยาสารกำแพงแสน), ปี พ.ศ.2546

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสภาพทางชลศาสตร์คลองส่งน้ำสายใหญ่ชัยนาท - ป่าสัก ตามศักยภาพที่เป็นอยู่จริง โดยใช้แบบจำลองที่ได้จากการสอบเทียบเป็นตัวแทนการส่งน้ำของระบบ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ผ่านประตูระบายมโนรมย์กับระดับน้ำด้านท้าย รวมทั้งศึกษาผลกระทบระหว่างอัตราการไหลผ่านกับระดับน้ำเหนืออาคารปากคลองซอยที่อยู่ด้านท้ายน้ำ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการและบริหารจัดการน้ำที่เหมาะสม ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย ข้อมูลทางกายภาพของคลอง ข้อมูลอาคารบังคับน้ำในคลอง ข้อมูลอาคารรับน้ำและอาคาร

ระบายน้ำ ข้อมูลการสอบเทียบอาคาร และชุดข้อมูลสภาพอื่น ๆ ทางชลศาสตร์ของคลอง เป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลองทางชลศาสตร์ ทำการสอบเทียบ และตรวจสอบแบบจำลองกับค่าที่วัดน้ำจริงในสนาม เพื่อเป็นตัวแทนการส่งน้ำของระบบ และทดสอบระบบด้วยกรณีศึกษา 8 กรณีตามวิธีการส่งน้ำจริงของโครงการ ผลจากการศึกษาได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านประตูระบายมโนรมย์ 1s เท่ากับ 0.6759 และ 2s เท่ากับ 1.2256 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านอาคารชนิดต่าง ๆ 1s มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6796 ถึง 2.9597 และ 2s มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8341 ถึง 1.1969 และสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวแมนนิ่งของคลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0280 ถึง 0.0299 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณปริมาณน้ำผ่านประตูระบายที่หัวงานรายวันได้ สำหรับผลการทดสอบระบบด้วยกรณีศึกษา 8 กรณีได้ข้อสรุปแนะนำในการควบคุมการส่งน้ำในคลองชัยนาท-ป่าสักช่วงโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามโนรมย์ โดยพบว่าควรปิดอาคารปากคลองซอยในช่วงที่สอง ตั้งแต่กม.16+000 ถึง 32+000 ก่อน เพื่อให้ระดับน้ำยกตัวสูงขึ้นได้อย่างเหมาะสมทั้งระบบก่อนการชักน้ำเข้าคลองด้วยการสูบน้ำเข้าสู่พื้นที่ในช่วงคลองที่หนึ่งตั้งแต่กม. 0+630 ถึง 16+000 และด้วยแรงโน้มถ่วงในช่วงคลองที่สามตั้งแต่กม. 32+000 ถึง 47+000 แล้วจึงเปิดอาคารปากคลองซอยในช่วงที่สองตามลำดับ การส่งน้ำของโครงการจึงจะสามารถกระจายไปอย่างทั่วถึงเต็มตามศักยภาพของระบบได้ต่อไป

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ ได้ออกแบบระบบผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยา เพื่อนำน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปช่วยกว๊านพะเยา และแก้ไขปัญหาน้ำไม่พอใช้อุปโภคบริโภค ณ บริเวณพื้นที่ศึกษา โดยแผนผังการดำเนินงานวิจัยเป็นดังรูปที่ 3



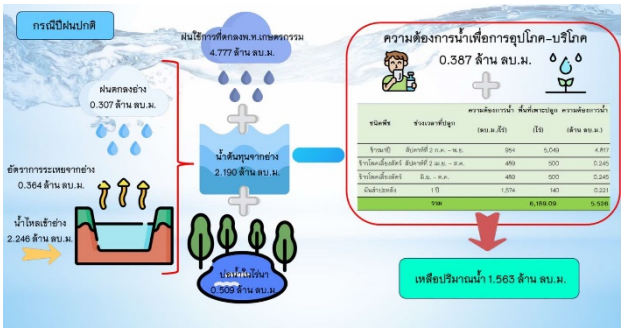
รูปที่ 3 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัย มีละเอียดดังนี้

1. ลงพื้นที่สอบถามเกี่ยวกับปัญหาที่มีในพื้นที่ชุมชนบริเวณกว๊านพะเยา
2. ทำการลงพื้นที่อีกครั้งเพื่อเลือกประเด็นที่เป็นปัญหากับชุมชนมากที่สุดนั่นคือประเด็นภัยแล้ง
3. เก็บรวบรวมข้อมูลในชุมชนเกี่ยวกับปัญหาภัยแล้งที่ส่งผลกระทบต่อคนในชุมชน
4. หาแนวทางการแก้ปัญหาร่วมกันกับชุมชน
5. ดำเนินการค้นคว้า เรียบเรียงเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำในกว๊านพะเยาและอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือ
6. นำข้อมูลที่ผ่านการเรียบเรียงมาดำเนินการคำนวณปริมาณน้ำของกว๊านพะเยาและอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือเพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่สามารถผันได้จากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยา
7. นำข้อมูลที่หาปริมาณน้ำมาออกแบบคลองผันน้ำ และอัตราการไหลของคลอง
8. ตรวจสอบขนาดของคลองและอัตราการไหล ถ้าไม่ผ่านให้วนไปทำข้อที่ 4 ถ้าผ่านให้ไปทำข้อที่ 6 ต่อไป
9. คำนวณปริมาณดินขุดและดินถมของคลองที่ออกแบบ
10. สรุปผลการศึกษา
11. นำผลการศึกษาและออกแบบระบบ ผันน้ำกลับคืนสู่ชุมชนเพื่อรับข้อเสนอแนะมาปรับปรุง

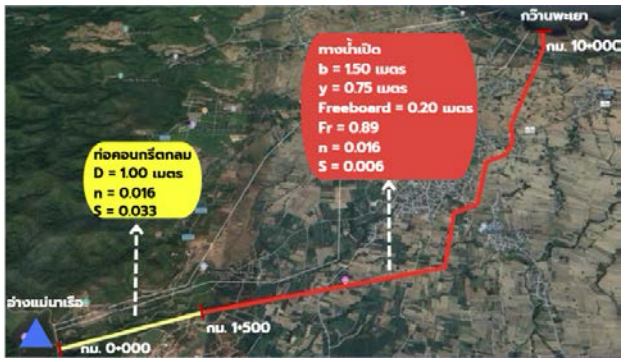
4. ผลการศึกษา

อ่างเก็บน้ำแม่นาเรือมีความจุของอ่างเก็บน้ำที่ 2.03 ล้าน ลบ.ม. และในปีฝนปกติมีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 2.246 ล้าน ลบ.ม. และเมื่อทำสมดุลน้ำโดยมีความต้องการน้ำ เพื่ออุปโภค-บริโภค 0.387 ล้าน ลบ.ม. และน้ำเพื่อการเกษตรกรรม 5.526 ล้าน ลบ.ม. คงเหลือปริมาณน้ำ 1.563 ล้าน ลบ.ม. ทำการผันน้ำด้วยปริมาณดังกล่าวมากว๊านพะเยาช่วง พ.ค - ก.ค เป็นระยะเวลา 3 เดือน กำหนดให้ระยะเวลาการผันน้ำเป็นเวลา 30 วัน วันละ 4 ชม. ดังนั้นจึงได้อัตราการไหลออกแบบเท่ากับ 3.618 ลบ.ม./วินาที ดังรูปที่ 4



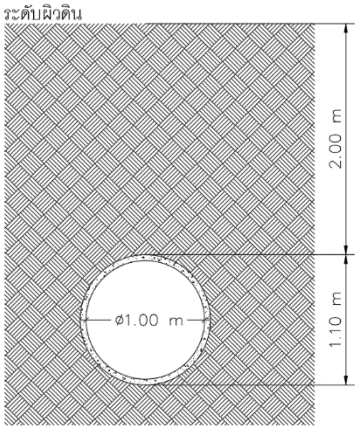
รูปที่ 4 สมดุลน้ำรายปีพื้นที่ชลประทานอ่างแม่นาเรือกรณีปีฝนปกติ

จากอัตราการไหลได้คำนวณระบบผันน้ำเป็น 2 รูปแบบ ในระยะทาง 10 กิโลเมตร ดังรูปที่ 5



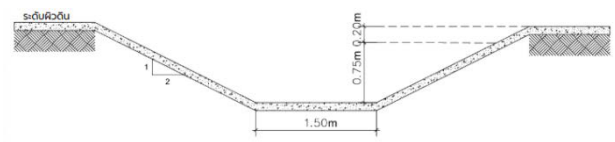
รูปที่ 5 รูปแปลนแสดง

ช่วงที่1 (กม. 0+000 ถึง กม. 1+500) ท่อคอนกรีตกลมมีความลาดชันเท่ากับ 0.033 Manning's n เท่ากับ 0.016 R เท่ากับ 0.252 P เท่ากับ 3.167 A เท่ากับ 0.798 และ D เท่ากับ 1.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6



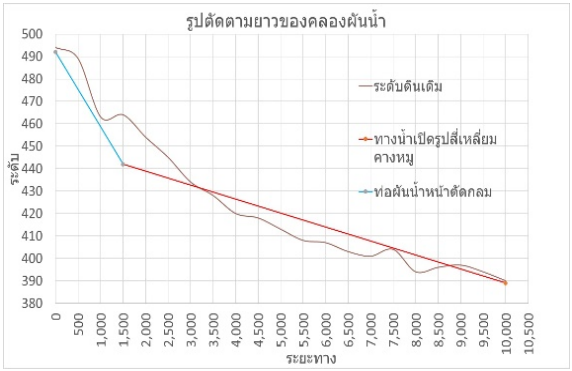
รูปที่ 6 ภาพตัดตามขวางท่อคอนกรีตวงกลม

ช่วงที่2 (กม. 1+500 ถึง กม. 10+000) เป็นทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู Slope ท้องคลอง เท่ากับ 0.006 ความกว้างก้นคลอง เท่ากับ 1.50 เมตร ความลึกน้ำออกแบบ เท่ากับ 0.75 เมตร ระยะเผื่อระดับน้ำ (Freeboard) เท่ากับ 0.20 เมตร Fr เท่ากับ 0.89 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพตัดตามขวางทางน้ำเปิดคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงให้ถึงรูปตัดตามขวางของระบบผันน้ำที่ และ slope ของระบบผันน้ำมี 2 ระบบคือ ท่อคอนกรีตวงกลม และทางน้ำเปิด สามารถคำนวณดินขุด-ดินถมจากกราฟได้ ปริมาณดินขุดอยู่ที่ 138,974.25 ลบ.ม และปริมารดินถมอยู่ที่ 179,100 ลบ.ม และสามารถคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการทำโครงการนี้ได้ 14,089,679 บาท



รูปที่ 8 ภาพตัดตามขวางของระบบผันน้ำ

5. ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเพิ่มปริมาณน้ำในกว๊านพะเยาได้ประมาณ 1.563 ล้าน ลบ.ม.
2. สามารถส่งน้ำให้พื้นที่เกษตรกรรม เช่น นาข้าวได้ประมาณ 1,699 ไร่ คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ประมาณ 25,485,000 บาท
3. สามารถเพิ่มน้ำอุปโภค-บริโภค 1.563 ล้าน ลบ.ม. ถ้าคิดเป็นวันสามารถส่งน้ำได้ประมาณ 65 วัน
4. สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อการท่องเที่ยวของกว๊านพะเยาได้จากผิวน้ำเดิมขึ้นประมาณ 10 ซม.
5. สามารถช่วยทำให้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในหน้าแล้งได้
6. กว๊านพะเยาสามารถจัดการปริมาณน้ำที่ได้รับการผันมาจากปริมาณน้ำส่วนเกินของอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือ และหากมีน้ำส่วนเกินของกว๊านพะเยายังสามารถระบายลงสู่พื้นที่ตอนล่าง เช่น ลำน้ำอิง เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพ
7. เป็นโครงการต้นแบบของระบบผันน้ำจากหนองเล็งทรายมากว๊านพะเยา

6. วิเคราะห์และสรุปผล

จากการออกแบบทางผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกว๊านพะเยา ได้ออกแบบระบบผันน้ำเป็น 2 ระบบ ได้แก่

ช่วงที่ 1 (กม. 0+000 ถึง กม. 1+500) เป็นท่อคอนกรีตวงกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตร และมีความชัน 0.033 เป็นระยะทาง 1.5 กม.

ช่วงที่ 2 (กม. 1+500 ถึง กม. 10+000) เป็นทางทำเปิดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีความกว้างก้นคลอง 1.50 เมตร ความลึกจากก้นคลองถึงความสูงพ้นน้ำ (Freeboard) 0.95 เมตร มีความลาดเอียงด้านข้างเป็น 1 : 2 เป็นระยะทาง 8.5 กม.

ปริมาณน้ำที่สามารถส่งได้โดยที่ผู้ใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่นาเรือไม่ได้รับผลกระทบอยู่ที่ 1.563 ล้าน ลบ.ม. มีอัตราการไหลเท่ากับ 3.168 ลบ.ม./วินาที

สามารถคำนวณปริมาณดินตัดได้ 138,974 ลบ.ม. และปริมาณดินถมได้ 179,100 ลบ.ม.

กิตติกรรมประกาศ

การออกแบบคลองผันน้ำจากอ่างแม่นาเรือไปยังกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ อาจารย์ ดร. ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ มาโดยตลอดผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีแก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ในกลุ่มที่ช่วยกันค้นคว้า และจัดทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] สัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเปิดที่มีขยะและผักตบชวา แหล่งที่มา https://conference.thaince.org/index.php/ncce25/article/download/412/334/5061

[2] ความสามารถในการระบายน้ำและคุณภาพน้ำของคลองรังสิตประยูรศักดิ์ปีที่ 14 แหล่งที่มา ; https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/14507

[3] โครงการวิศวกรรมโยธา ประจำปี 2566 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา

[4] กรรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ การออกแบบทางผันน้ำและการประเมินประสิทธิภาพ แหล่งที่มา ; http://irricollege.rid.go.th/2018/ircweb/prjnisit/2556/2556-24.pdf

[5] NU intellectual Repository 2.1 ชนิดของ Open channel โดย ทรงกลด รักษาสัตย์ แหล่งที่มา ; https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3686/5/chapter2.pdf

[6] Wikipedia กว๊านพะเยา

[7] มหาวิทยาลัยพะเยา ฐานข้อมูลท้องถิ่น จังหวัดพะเยา

[8] เอกสารประกอบการสอนวิชากลศาสตร์ของไหล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน พ.ศ.2553 แหล่งที่มา ; https://irre.ku.ac.th/books/pdf/19.pdf

[9] ใบสรุปราคาต่อหน่วย งานขุดลอกสระ บ้านใหม่ หมู่ที่ 3 ตำบลสระจรเข้ อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา แหล่งที่มา ; http://sql.ldd.go.th/auction/Uploads/1609-7.pdf?

[10] องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา แหล่งที่มา ; https://py-pao.ddns.net/dark/show_data.

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 สีตะวัน[1] ภาวิณี ธรรมอักษร[2] จิรภัทร ปัญญาวิชา[3] และ สุริยาวุธ ประอ้าย[4]

[1,2,3] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*

**Corresponding author; E-mail address: 64102058@up.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยมีบทบาทสำคัญในการขนส่งผู้โดยสารและสินค้า ส่งผลให้โครงสร้างทางราง โดยเฉพาะชั้นหินโรยทาง (Ballast) ต้องรับน้ำหนักมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพของหินโรยทางส่งผลต่อเสถียรภาพของทางรถไฟและเพิ่มต้นทุนการบำรุงรักษา 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 ผลการทดสอบพบว่าเศษยางรูปทรงลูกบาศก์ในสัดส่วน 15% เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมกับหินโรยทาง เนื่องจากสามารถลดค่าการสูญเสีย LAA ได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนได้ดีกว่าเศษยางรูปทรงอื่น 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

ในปัจจุบัน มีการศึกษาวัสดุทางเลือก เช่น แผ่นรองใต้ราง (under sleeper pad, USP) และวัสดุสังเคราะห์ต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุน ขณะเดียวกัน เศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาจำนวนมาก ในรูปแบบของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tire-derived aggregates, TDA) เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ TDA ได้แก่ ความสามารถในการหน่วงพลังงานสูง (Energy damping) น้ำหนักต่อหน่วยต่ำและต้นทุนต่ำ จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้เกิดแนวความคิดในการที่จะนำเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (end-of-life tires) มาเป็นส่วนผสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง นอกจากจะช่วยยืดอายุการใช้งานแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาขยะและเสนอทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม มีบางประเด็นที่ยังคงเป็นข้อถกเถียง เช่น ผลกระทบจากรูปร่างและขนาดของหินโรยทางที่มีต่อการเสื่อมสภาพและการเสียรูป รวมถึงการหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่สุดของเศษยางรถยนต์

ดังนั้นการศึกษานี้จะนำเสนอรูปแบบของศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยการวิเคราะห์ความทนทานต่อการสึกหรอของหินที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะแห้ง โดยใช้เครื่องทดสอบลอสแองเจลีส (Los Angeles Abrasion, LAA) และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ นอกจากนี้ยังได้พิจารณามุมการกองของหิน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการรับแรงเฉือน โดยทั่วไปหินที่มีมุมการกองสูงจะสามารถรับแรงเฉือนได้ดี ผลการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจถึง อิทธิพลของรูปร่าง ขนาด และสัดส่วนของเศษยางรถยนต์ ที่ผสมในหินโรยทางต่อความทนทานต่อการสึกหรอและกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความทนทาน ลดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ส่งผลให้โครงสร้างทางรางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นและมีต้นทุนการดำเนินงานที่คุ้มค่ากว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกันต่อความทนทานต่อการสึกหรอของหินโรยทาง

2. เพื่อประเมินอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกันต่อกำลังรับแรงเฉือนของหินโรยทางโดยพิจารณาจากมุมการกอง (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 คุณลักษณะเฉพาะของหินโรยทางจำเป็นจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ คือ 1) ขนาดการคละกระจายและปราศจากการปนเปื้นของเม็ดดินขนาดเล็กเพื่อให้มั่นใจว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีการระบายน้ำที่เหมาะสมของรางรถไฟ 2) เหลี่ยมมุมของหินที่คมจะทำให้เกิดความต้านทานแรงเฉือนที่ดีของชั้นหินโรยทาง 3) มีความต้านทานเชิงกลสูงต่อการสึกหรอเพื่อรักษามุมและลดการเกิดของอนุภาคเม็ดละเอียด 4) ความสม่ำเสมอของรูปร่าง ไม่ยาวหรือแบนเกินไป

สำหรับประเทศไทย ขนาดของหินโรยทางถูกกำหนดด้วยขนาดของตะแกรงร่อนคู่หนึ่งซึ่งมีขนาดช่องเปิดมีหน่วยวัดขนาดเป็นมิลลิเมตร หินโรยทางรถไฟที่นำมาทดสอบต้องสามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดใหญ่สุดและค้างอยู่บนตะแกรงขนาดเล็กสุด ให้ขนาดใหญ่สุดของหินโรยทางรถไฟเป็น 63.5 มิลลิเมตร หรือ 50 มิลลิเมตร และขนาดเล็กสุดเป็น 31.5 มิลลิเมตร (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) การทดสอบการคละขนาดของหินโรยทางรถไฟให้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 136 หินโรยทางรถไฟสามารถแบ่งออกเป็น 6 ขนาดตามการคละขนาดอนุภาคของหิน การทดสอบความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักของหินโรยทางให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 29 หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่นให้พิจารณาเลือกใช้หินโรยทางรถไฟที่บดอัดตามมาตรฐาน ASTM C 29 แล้วได้ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ไม่น้อยกว่า 1200 Kg/m^3

2.2 เครื่องทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)

เครื่องทดสอบลอสแองเจลีส (Los Angeles Abrasion, LAA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษาความต้านทานการสึกหรอของหิน รวมถึงหินย่อย กรวดย่อย กรวดและวัสดุมวลรวมหยาบ (coarse aggregates) จากการกระแทกและเสียดสีกับลูกเหล็ก ในขณะที่ถังหมุนรอบตัวเองจะมีแผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกับผนังของถัง จะพาตัวอย่างทดสอบและลูกเหล็กกลมขึ้นไปพร้อมๆกัน เมื่อตัวอย่างทดสอบกับลูก เหล็กกลมอยู่สูงขึ้นจะตกลงมากระแทกกับผนังด้านตรงข้ามในถังเหล็ก กระบวนการนี้จะทำไป เรื่อย ๆ

จนครบจำนวนรอบที่กำหนด เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของหินในการต้านทานการศึกหรอและการกระแทก แม้ว่าการทดสอบ LAA อาจจะไม่สามารถจำลองผลกระทบของสภาวะการรับแรงในทางสภาพจริงได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามผลของการทดสอบ LAA มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบกระแทกของหินโรยทางที่บรรจุในถังเหล็ก

โดยทั่วไปเครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA) จะใช้สำหรับหาค่าความต้านทาน การย่อยสลายเมื่อถูกขัดถู ขัดสีของหิน กรวดและวัสดุมวลรวมหยาบ (coarse aggregates) สามารถหาค่าการสึกหรอได้จากสมการที่ 1

$$\textit{ค่าการสึกหรอเป็นร้อยละ} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

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 รวมอยู่ในถังเหล็กรวมกับหินโรยทาง

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

$$f_{ij} = \frac{1}{\sum_{(k)} A^{(k)}} \sum_{(k)} \left(A^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \right) \quad (1)$$

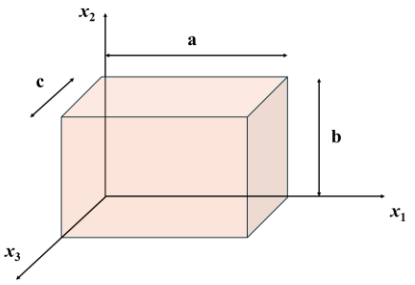
โดยที่ k คือจำนวนผิวหน้าของอนุภาค ในขณะที่ $A^{(1)}, A^{(2)} \ldots A^{(k)}$ คือพื้นที่ของผิวหน้า และ $n^{(1)}, n^{(2)} \ldots n^{(k)}$ คือเวกเตอร์ตั้งฉากในแต่ละผิวหน้า และกำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) $f_1 \geq f_2 \geq f_3$ โดยที่ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) ตัวแรก f_1 สะท้อนถึงการวางแนวที่อนุภาคส่วนใหญ่จะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน กรณีอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบน เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะตัวแรก f_1 คือการวางแนวของเวกเตอร์ปกติของผิวด้านใหญ่ทั้งสองด้าน สำหรับรูปหลายเหลี่ยมปกติ (เช่น ลูกบาศก์) ค่าลักษณะเฉพาะทั้งสามค่าจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวและบางมากๆ ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด f_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ และจากค่าลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการกำหนดลักษณะของรูปแบบอนุภาคแต่ละขนาดได้ดังนี้

ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C) = $\frac{f_3}{f_1}$ (1.1)

ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F) = $\frac{f_1 - f_2}{f_1}$ (1.2)

ค่าความยาว (Elongation: E) = $\frac{f_2 - f_3}{f_1}$ (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

ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C) = $\frac{c}{a}$ (6)

ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F) = $1 - \frac{c}{b}$ (7)

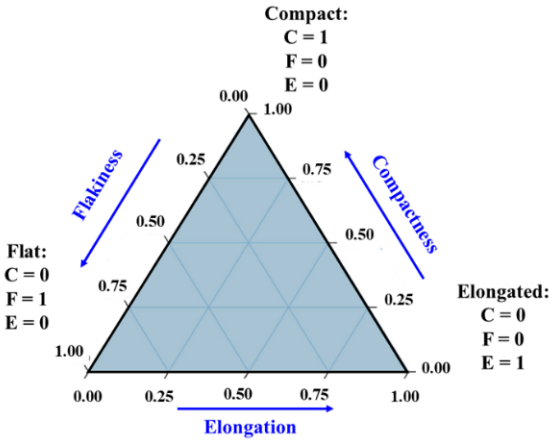
ค่าความยาว (Elongation: E) = $\frac{c}{b} - \frac{c}{a}$ (8)

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะตัวอย่างขอบเขตรูปแบบของอนุภาคในแต่ละรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่นกรณีที่ปริซึมมีการยืดตัวในทิศทางของแกน โดยที่ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (C) ส่วนค่าความแบนเรียบ (F) จะมีค่าเท่ากับ และค่าความยาว E มีค่าเท่ากับ ซึ่งลักษณะรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดสามารถแสดงได้จากตำแหน่งบนแผนภาพสามแกน (ternary) โดย

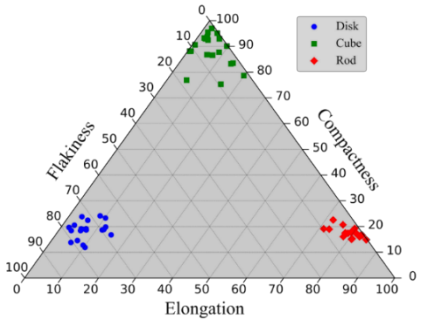
ใช้พิกัดของค่า C, F และ E ที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงถึงลักษณะรูปร่างของยางที่ใช้ในการทดสอบ

Geometry	Dimensions	Compactness (C)	Flakiness (F)	Elongation (E)
	a>>b=c	0	0	1
	a=b>>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 scanne

กล้อง 3D laser scanner เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D) ของวัตถุหรือพื้นที่ด้วยความแม่นยำสูง โดยใช้เทคโนโลยีการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งกระบวนการทำงานของกล้องนี้อาศัยหลักการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาสู่เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนกล้อง การวัดระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางไปกลับ ทำให้กล้องสามารถคำนวณระยะทางได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ในส่วนของการทำงาน กล้องจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปยังวัตถุและรับข้อมูลที่สะท้อนกลับมา ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นชุดของจุดข้อมูลที่เรียกว่า “point cloud” ซึ่งเป็นชุดของจุดจำนวนมากที่แสดงตำแหน่งเชิงพิกัดในระบบสามมิติ ข้อมูลนี้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างภาพโครงร่างของวัตถุที่สมบูรณ์ 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” ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางจากกล้องไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมา กล้องจะคำนวณระยะทางของแต่ละจุดจากข้อมูลนี้ และนำมาสร้างภาพสามมิติของวัตถุ ข้อมูลที่ได้จากการสแกนมีความละเอียดสูง ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการประมวลผลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การนำยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้เป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัย [3] มุ่งเน้นการศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมด้วยวัสดุใน CR (Concrete Rubber) โดยอ้างอิงจากการทดสอบ LAA และการวิเคราะห์ภาพสามมิติเพื่อประเมินผลกระทบของส่วนผสม CR ต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณ 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 สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของหิน งานวิจัย [5] แนะนำวิธีการวิเคราะห์มุมที่ช่วยตรวจจับและจำแนกหินรองรางตามระดับการเสื่อมสภาพได้ดีกว่าเดิม อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มเติมควรพิจารณาการใช้ตัวอย่างที่หลากหลายและจำนวนมากขึ้นเพื่อยืนยันผลลัพธ์

ดัชนีความแบน ยาว กลม และนูนของหินบัลลาสต์ ถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความแข็งแรงและความคงทนของหิน โดยจากงานวิจัย [1] ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ในขณะที่งานวิจัย [2] เสนอแนะดัชนีใหม่ที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วย Zingg Diagram ที่มีความ

สมมาตรตามแนวเส้นแบ่งครึ่งของกราฟ ทำให้การตีความค่าของดัชนีเหล่านี้ทำได้ง่ายขึ้น งานวิจัย [7] และ [8] แสดงให้เห็นว่าหินที่มีรูปร่างแบนและยาวมีแนวโน้มที่จะสึกหรอเร็วกว่าเนื่องจากพื้นที่สัมผัสกับแรงกระแทกมากกว่า ในขณะที่หินที่มีลักษณะกลมมนมีความทนทานต่อแรงเสียดทานได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานและความทนทานของหินบัลลาสต์

เทคนิคการวัดมุมการลาดตัวได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดอคติที่เกิดจากการเลือกพื้นที่ลาดตัวโดยอาศัยดุลยพินิจ งานวิจัย [10] นำเสนอเทคโนโลยีสแกนสามมิติเพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการวัดมุมการลาดตัวของไบโอแมส ขณะที่งานวิจัย [11] ได้พัฒนาอัลกอริธึม aMAoR ซึ่งสามารถลดอคติจากความคิดเห็นส่วนตัวและเพิ่มความแม่นยำในการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM)

ในแง่ของผลกระทบของรูปร่างอนุภาค งานวิจัย [12] พบว่า ความเว้าของอนุภาคมีผลต่อมุมการลาดตัวและความพรุนของวัสดุ โดยอนุภาคที่มีความแหลมมุมสูงและเว้าจะให้ผลแตกต่างจากอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมนทั่วไป นอกจากนี้ งานวิจัย [13] ได้พัฒนาเทคนิคโฟโตแกรมเมตรีแบบ 3 ซึ่งให้ผลการวัดที่แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม โดยลดอิทธิพลของความเบี่ยงเบนจากรูปทรงของกองวัสดุ

สำหรับการจำลององค์ประกอบไม่ต่อเนื่องบนชั้นหินโรยทาง งานวิจัย [14] ใช้การทดสอบมุมการลาดตัวร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบหลายพารามิเตอร์ (Multi-Parameter Response Surface Method) โดยออกแบบการทดลองด้วย Box–Behnken Design เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของสัมประสิทธิ์การคืนตัว (0.72), สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (0.56), และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขณะหมุน (0.27) ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้วช่วยให้การจำลอง 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

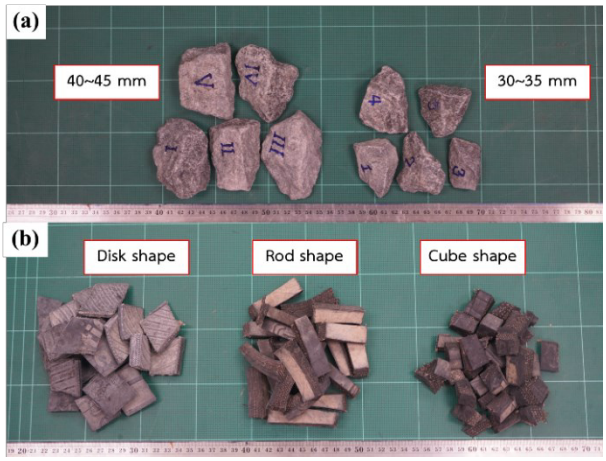
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบการกระจายขนาดคละของหินโรยทาง

ตัวอย่างหินโรยทางขนาดใหญ่สุดที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 50 มิลลิเมตร (2นิ้ว) ในที่นี้จะใช้ 30 กิโลกรัม เพื่อจะใช้ดำเนินการทดสอบหาขนาดมวลคละ (Sieve Analysis) ของหินโรยทางจริงในสนามตามมาตรฐาน มทช.(ท) 101.1-2545 วิธีการทดสอบหาส่วนคละของวัสดุมวลรวม (Aggregate)

3.2 วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบหินโรยทางขนาด 40-45 มม. และขนาด 30-35 มม. เศษยางรถยนต์ที่มีรูปแบบต่าง ๆ 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น, ยางทรงแท่ง, และยางทรงลูกบาศก์ จากรูปที่ 4 แสดงรูปร่างลักษณะของยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบโดยมีรายละเอียดขนาดและรูปร่างดังนี้ ยางทรงแผ่น ยางทรงแท่ง และ ยางทรงลูกบาศก์จะมีขนาดโดยประมาณ 35x35x8 มม.^{3} , 60x10x10 มม.^{3} และ 15x15x15 มม.^{3} ตามลำดับ



รูปที่ 4 รูปวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ a) ตัวอย่างหินบัลลาสต์ b) เศษยางรถยนต์รูปแบบต่างๆ

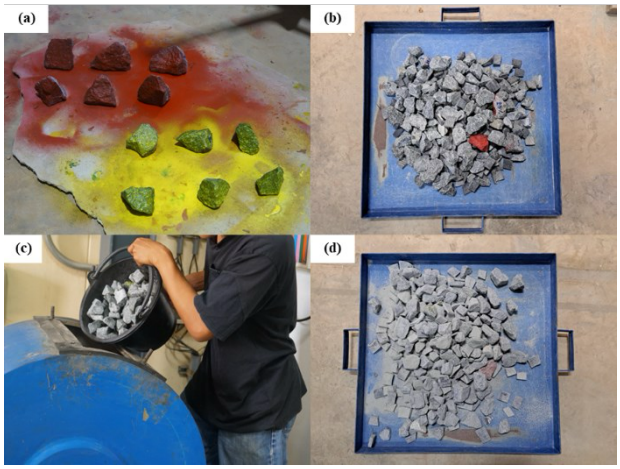
ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่สภาพวะแห้ง นำหินโรยทางชะล้างสิ่งปนเปื้อนด้วยน้ำและทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3 วิธีการทดสอบการเสื่อมสภาพหินโรยทาง

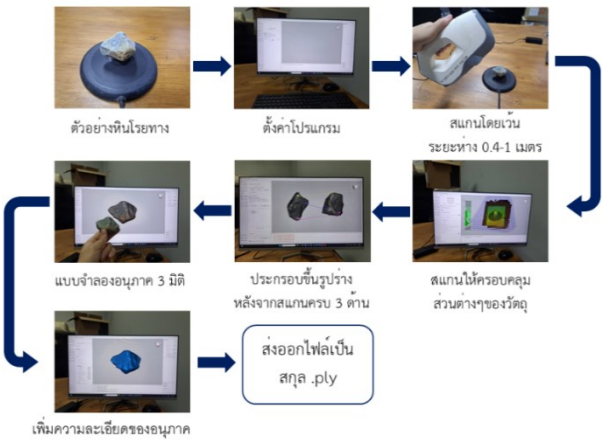
สำหรับการทดสอบหินโรยทางในสภาพแห้ง เริ่มต้นด้วยการนำตัวอย่างหินออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงเป็นระยะเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการจัดเตรียมชุดตัวอย่างวัสดุหินโรยทางชุดละ 10 กิโลกรัม ต่อมาสุ่มเลือกหินโรยทางจากแต่ละชุดจำนวน 6 ก้อน แบ่งเป็นขนาด 40-45 มม. และ 25-30 มม. ขนาดละ 3 ก้อน โดยพ่นสีและทำสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 5 a) หลังจากนั้นทำการสแกนหินก่อนการทดสอบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA)

ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมชุดตัวอย่างโดยผสมเศษยางเข้ากับหินโรยทางในสัดส่วน 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)

เมื่อหมุนครบจำนวนรอบที่กำหนด ให้นำชุดตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 5 d) แล้วใช้ผ้าเช็ดทำความสะอาดเศษฝุ่นที่ติดอยู่บนตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าการสึกหรอ โดยวัดน้ำหนักของวัสดุที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 12 ส่วนวัสดุที่ผ่านตะแกรงให้ทิ้งไป



รูปที่ 5 วิธีการทดสอบการเสื่อมสภาพหินโรยทาง a) การพ่นสีและสัญญาลักษณ์ตัวอย่าง b) ตัวอย่างหินก่อนทดสอบ c) ตัวอย่างหินในเครื่องทดสอบ d) ตัวอย่างหินหลังทดสอบ



รูปที่ 6 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่องสแกนสามมิติ

3.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ

เครื่องมือสแกนสามมิติที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นรุ่น ArtecEva ซึ่งเป็นเครื่องสแกนที่สามารถจับภาพวัตถุที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก มีความแม่นยำของจุด 3D เท่ากับ 0.1 mm มีระยะการทำงาน 0.4-1 m และระยะการจับปริมาตร 61,000 cm^3 โดยภาพที่บันทึกได้จะมีการประมวลผลด้วยโปรแกรม Artec Studio 17 ดังแสดงในรูปที่ 6

การศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่องมือสแกนสามมิติในการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของหินโรยทางรถไฟด้วยภาพสามมิติ หลังจากทดสอบ LAA เสร็จสิ้น จะนำตัวอย่างหินที่เป็นตัวแทนของชุดทดสอบมาทำการสแกนอีกครั้ง เพื่อประเมินพัฒนาการของการสึกหรอในแต่ละรอบการหมุน ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลเริ่มต้นด้วยการใช้โปรแกรม Artec Studio 17 สำหรับการสแกนหิน โปรแกรมนี้มีความสามารถในการสร้างโมเดลสามมิติของวัตถุ ช่วยให้สามารถคำนวณทั้งปริมาตรและพื้นที่ผิวของหิน ดังแสดงใน รูปที่ 5 หลังจากการสแกนเสร็จสิ้น ข้อมูลจะถูกส่งออกในรูปแบบไฟล์ .ply ซึ่งเป็นไฟล์มาตรฐานสำหรับเก็บข้อมูลโมเดลสามมิติ จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม MeshLab ซึ่งมีความสามารถในการตรวจสอบเฉดสีที่แสดงถึงการสึกหรอของพื้นผิวหิน โปรแกรมนี้จะแสดงผลเป็นภาพสีที่แสดงการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวหินอย่างชัดเจน ทำให้สามารถเปรียบเทียบและประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างก่อนและหลังการทดสอบได้

3.5 การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างหินบัลลาสต์กับแผ่นพื้นไม้

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 ผลการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างหินบัลลาสต์กับแผ่นพื้นไม้

3.6 การทดสอบมุมการกอง

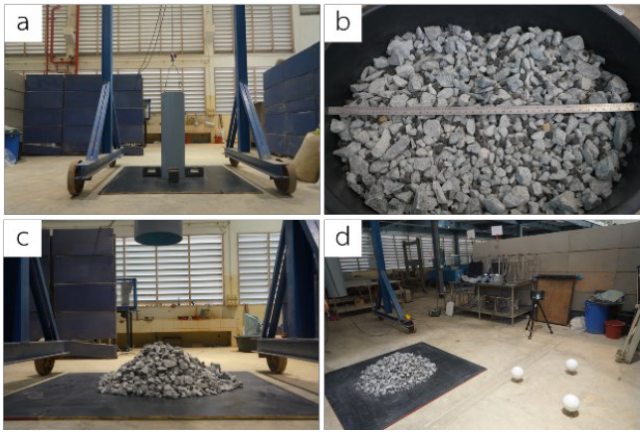
การทดสอบในครั้งนี้ใช้ยางรถยนต์ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น, ยางทรงแท่ง, และยางทรงลูกบาศก์ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) 500 1000 รอบ ซึ่งมีการสึกหรอไปบางส่วน และตัวอย่างหินที่ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบ ซึ่งยังคงสภาพสมบูรณ์ การทดสอบแต่ละตัวอย่างจะถูกดำเนินการ 3 ครั้ง 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

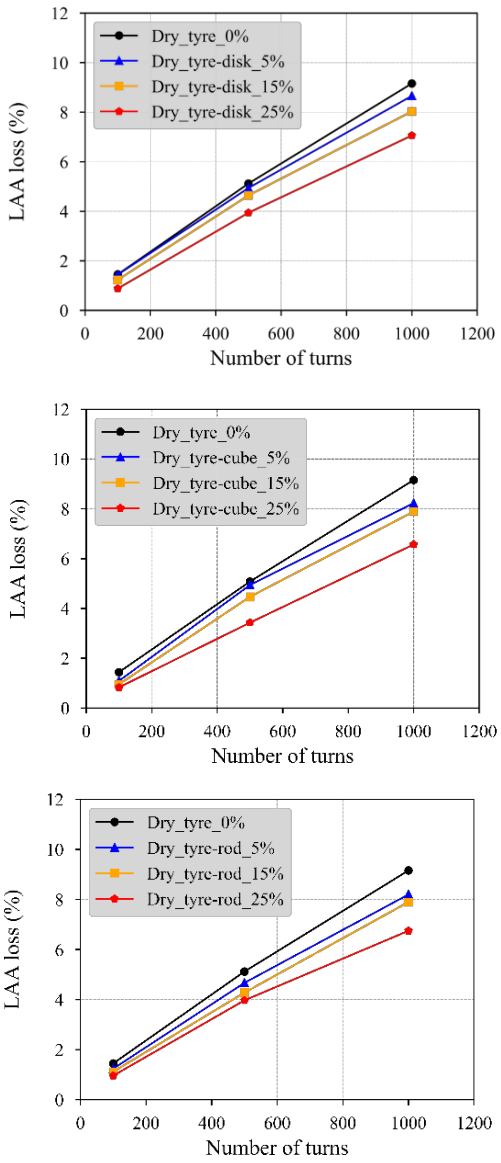
4.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของหินบัลลาสต์

จากผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์ในหินโรยทางช่วยลดค่าการสูญเสีย LAA หรืออัตราการสึกหรอของหินได้อย่างชัดเจน โดยแนวโน้มโดยรวมแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเศษยางเพิ่มขึ้นค่าการสูญเสีย LAA จะลดลง ซึ่งหมายความว่าเศษยางสามารถช่วยลดการแตกหักและเสียดสีของหินได้

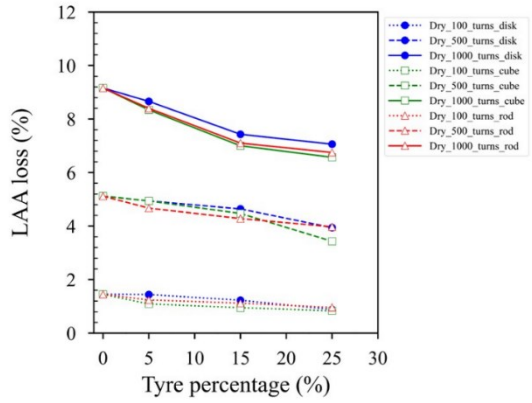
การทดสอบนี้เปรียบเทียบการใช้เศษยาง 3 รูปแบบ ได้แก่ ทรงแผ่น, ทรงลูกบาศก์ และ ทรงแท่ง ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0% , 5%, 15% และ 25% โดยทำการทดสอบภายใต้รอบการหมุนที่แตกต่างกัน 100 500 และ 1000 รอบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหินที่ไม่มีการผสมเศษยางเลย (0%) มีค่าการสูญเสีย LAA สูงที่สุด หมายความว่าหินเกิดการสึกหรอมากที่สุดเมื่อไม่มีเศษยางช่วยลดแรงกระแทก

เมื่อเปรียบเทียบ ชนิดของเศษยาง พบว่า เศษยางแบบแท่ง และลูกบาศก์ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้งสองชนิดสามารถช่วยลดค่าการสูญเสีย LAA ได้มากกว่าเศษยางแบบแผ่นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษยางรูปแท่งยาวและลูกบาศก์มีประสิทธิภาพในการช่วยลดแรงกระแทกและการสึกหรอของหินได้ดีกว่า ในขณะที่เศษยางแบบแผ่นมีค่าการสูญเสียสูงที่สุดในทุกระดับของรอบการหมุน ซึ่งอาจเป็นเพราะรูปทรงของมันไม่สามารถช่วยลดแรงกระแทกได้ดีเท่ากับเศษยางรูปทรงอื่น ๆ

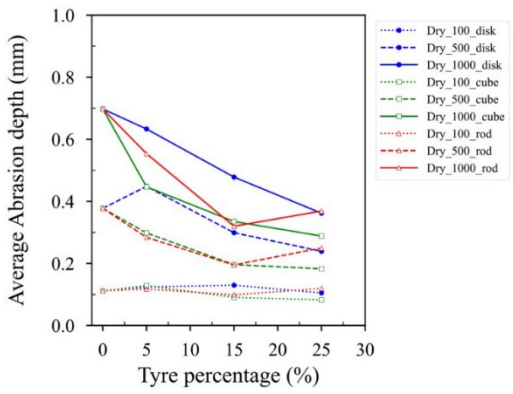
นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น (จาก 100 ⟶ 500 ⟶ 1000 รอบ) ค่าการสูญเสีย LAA ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากหินได้รับแรงเสียดสีและกระแทกมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางยังคงช่วยลดค่าการสึกหรอได้ในทุกกรณีแม้ในรอบการหมุนที่สูงขึ้น



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การสึกหรอกับจำนวนรอบการทดสอบ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การสึกหรอกับเปอร์เซ็นเศษยางรถยนต์



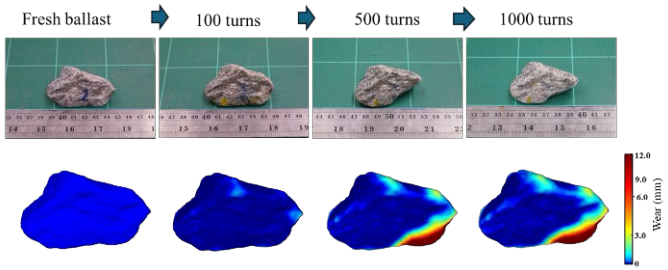
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเฉลี่ยของการสึกกร่อน กับปริมาณเศษยางรถยนต์

4.2 ผลการประเมินสัณฐานวิทยาของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ

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

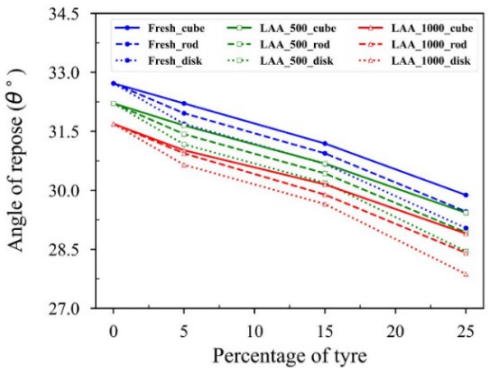
4.3 ผลการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางกับเปอร์เซ็นยางรถยนต์ในสัดส่วนผสมต่างๆ

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่ามุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือวัสดุที่ไม่มีการผสมยางสามารถกองตัวได้ที่มุมสูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง มุมของกองวัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้วัสดุไหลตัวได้ดีขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง จะพบว่าสัดส่วนยางที่ 15% ให้ผลที่ดีที่สุด

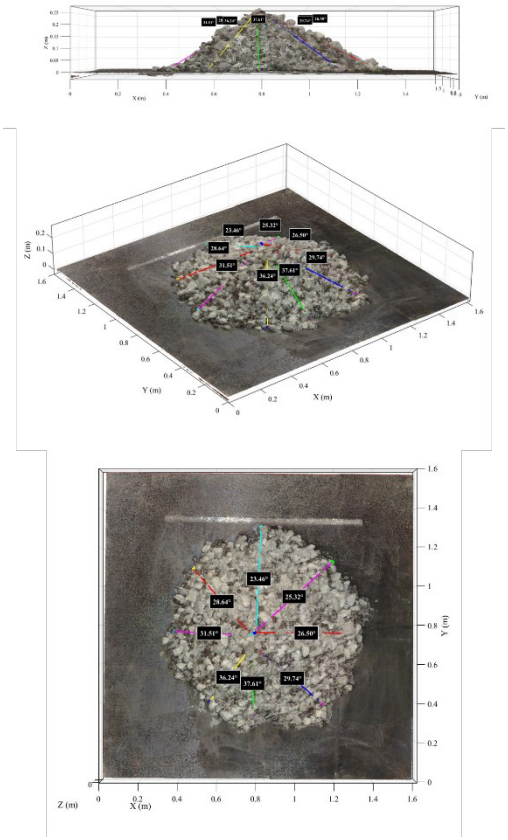
นอกจากนี้วัสดุที่ผ่านการหมุนในเครื่อง LAA มากขึ้นที่ 500 และ 1000 รอบ มีมุมการกองที่ลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ผ่านการหมุน (Fresh) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่พื้นผิวของอนุภาคมีความเรียบขึ้นและขอบคมลดลง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง ส่งผลให้วัสดุสามารถไหลตัวได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างของยาง พบว่ายางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมาคือยางรูปทรงแท่ง และต่ำสุดคือยางรูปทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่ายางที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม ลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด สามารถสร้างแรงต้านทานการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดี ลดการเลื่อนตัวของอนุภาค ในทางกลับกัน ยางรูปทรงแผ่นมีมุมการกองต่ำที่สุด เนื่องจากมีพื้นผิวแบนราบ ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบซ้อนทับกัน ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น

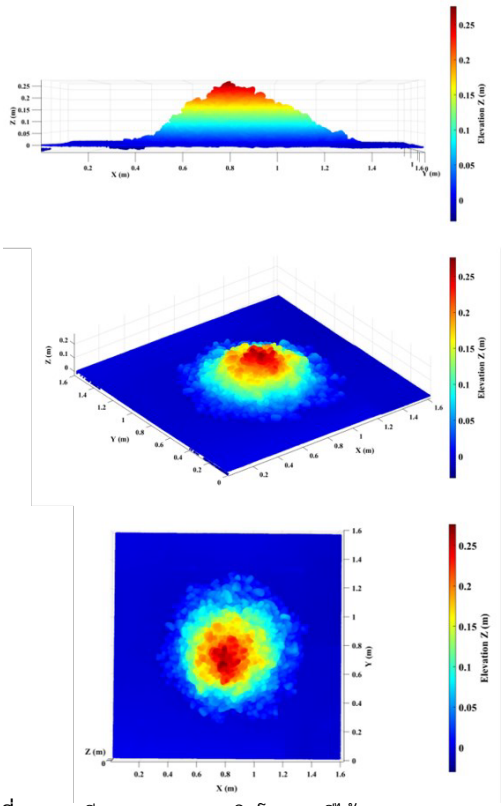
สามารถดูตัวอย่างมุมการกองของหินโรยทางและเฉดสีความสูงของกองหินได้ ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการกองของหินโรยทางกับปริมาณยางรถยนต์ในสัดส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 13 มุมการกองของหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม Matlab



รูปที่ 14 เฉดสีความสูงของกองหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม Matlab

5.สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบของการเติมเศษยางรถยนต์ในหินโรยทางต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของวัสดุ โดยพิจารณาค่าการสูญเสีย 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

ในด้านผลกระทบจากรอบการหมุนของเครื่อง LAA พบว่าวัสดุที่ผ่านการหมุนมากขึ้นมีค่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะที่ 1000 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกระแทกและแรงเสียดสีที่มากขึ้นทำให้วัสดุมีโอกาสแตกหักและสึกกร่อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมเศษยางในปริมาณที่เหมาะสมยังสามารถช่วยลดผลกระทบของการสึกหรอได้

จากผลการทดสอบมุมการกองของหินโรยทาง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเศษยางเพิ่มขึ้น มุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้วัสดุสามารถไหลตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางพบว่าสัดส่วนยางที่ 15% ให้ผลที่ดีที่สุด นอกจากนี้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และต่ำสุดคือทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่า เศษยางรูปทรงลูกบาศก์สามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่าเศษยางรูปทรงอื่น เนื่องจากมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด สามารถล็อกตัวเข้ากับอนุภาคของหินได้ดี ลดการเลื่อนตัวของวัสดุ และช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างโดยรวม

ดังนั้นการใช้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์ในสัดส่วน 15% จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมกับหินโรยทาง เนื่องจากสามารถลดค่าการสูญเสีย LAA ได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรับแรงเฉือนได้ดีกว่าเศษยางรูปทรงอื่น ส่งผลให้วัสดุมีเสถียรภาพสูงขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างทางรางให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น พร้อมทั้งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการนำเศษยางมาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศกรรมนี้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุริยาวุธ ประอ้าย ผศ.ดร.ธเนศ ทองเดชศรี ดร.ปาลินี สุมิตสวรรค์ และ นายชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์ ที่ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่า ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินโครงงานวิศวกรรมฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท บัญชากิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนหินโรยทางสำหรับการศึกษา รวมถึง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อนร่วมงาน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้าน ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงงานวิศวกรรมฉบับนี้

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., Fragkopoulos, 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., Ferellec, 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)

สมบัติของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง

Properties of Sediment Soil Improved with Geopolymer from Rubber Ash

กนกอร สาหินกอง[1] นันภัสส์ พิศาลคุณาวัฒน์[2] ฟ้ารุ่ง วงค์เทพ[3] สุวรรณษา สุธาพจน์[4] และรศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์[5]

[1,2,3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: nanpat2010@gmail.com*

บทคัดย่อ

ดินตะกอนกว๊านพะเยามีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการใช้งานด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะโครงสร้างพื้นฐานการใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดิน ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมได้ งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าไม้ยางเป็นวัสดุปอซโซลานิคเพื่อปรับปรุงดินตะกอนกว๊านพะเยาผ่านกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) โดยวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเถ้าไม้ยาง อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ และระยะเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุที่ปรับปรุง ผลการศึกษานี้จะช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับศักยภาพของจีโอพอลิเมอร์ในการเสริมความแข็งแรงของดิน และเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ดินตะกอนกว๊าน,เถ้าไม้ยาง,จีโอพอลิเมอร์,และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

Abstract

The sedimentary soil of Kwan Phayao has low mechanical properties, limiting its use in civil engineering applications, especially for infrastructure. Geopolymer technology offers an environmentally friendly solution to improve soil properties by utilizing industrial waste materials. This study examines the use of rubber ash as a pozzolanic material to enhance the properties of Kwan Phayao sedimentary soil through the geopolymerization process. It analyzes the effects of rubber ash content, the ratio of alkaline solution, and curing time on the unconfined compressive strength of the treated material. The findings of this study will provide a better understanding of the potential of geopolymer technology in strengthening soil and serve as a guideline for the development of sustainable construction materials.

Keywords: sedimentary soil of Kwan Phayao, rubber ash, geopolymer, and unconfined compressive strength

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

บทความนี้พูดถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในพื้นที่กว๊านพะเยา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญในจังหวัดพะเยา ปัจจุบันกว๊านพะเยาประสบปัญหาการกักเก็บน้ำได้น้อยลง เนื่องจากบริเวณรอบๆกว๊านถูกโอบล้อมไปด้วยภูเขาเมื่อเกิดฝนตกจะเกิดการพังทลายชะล้างหน้าดิน ทำให้ตะกอนถูกพัดพาลงสู่กว๊านและสะสมอยู่ในกว๊านพะเยา ทำให้เกิดการตื้นเขินของดินตะกอน ทางหน่วยงานกรมชลประทานจังหวัดพะเยา จึงได้เข้ามาแก้ไขปัญหานี้โดยการขุดลอกดินตะกอนที่สะสมออกจากกว๊านพะเยา เพื่อเพิ่มความลึกและความสามารถในการกักเก็บน้ำ ดินตะกอนที่ขุดขึ้นมาถูกกองทิ้งไว้รอบๆกว๊าน ซึ่งถือว่าเป็นขยะหรือวัสดุเหลือทิ้งที่ยังไม่ได้ถูกจัดการอย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำดินตะกอนเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมการทาง แต่ว่าดินตะกอนกว๊านพะเยานั้นมีความชื้นตามธรรมชาติสูงและประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากดินมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เพื่อแก้ปัญหานี้ นักวิจัยได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอน โดยใช้เทคนิคการปรับปรุงดิน เช่น การผสมซีเมนต์หรือวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของดิน แต่การใช้ซีเมนต์นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง และในกระบวนการผลิตซีเมนต์ยังทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงพยายามหาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้ทดแทนซีเมนต์ หนึ่งในแนวทางที่น่าสนใจคือการใช้เถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าชีวมวล มาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนให้มีความแข็งแรงสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้และสามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างถนนได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนกว๊านพะเยาโดยใช้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง โดยใช้เถ้าไม้ยางจากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล บริษัทท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี เพื่อนำมาใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางให้ได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (ทล.-ม. 204/2556) และรองพื้นทาง (ทล.-ม. 206/2564) ซึ่งตัวอย่างนี้จะใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าไม้ยางเท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ของน้ำหนักดินแห้ง และใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ (Na_2SiO_3:NaOH) เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าไม้ยางจากโรงไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล จังหวัดสุราษฎร์ธานี

2.เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง

3.เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง

4.เพื่อนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นนำมาประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุดในประเทศ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและศึกษามาตรฐานกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง

2. ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกว๊านพะเยา จังหวัดพะเยา เถ้าชีวมวลที่ได้จากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล บริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสารละลายอัลคาไลน์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว การทดสอบความคงทน

1.4 ประโยชน์

1. ได้ศึกษาคุณภาพและสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์และเถ้าไม้ยาง

2. ได้ความรู้เกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเถ้าไม้ยางเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพเพื่อเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้าง

3. เพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้วัสดุที่เป็นของเสียมาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

4. เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการทรัพยากรที่ถูกต้องของดินตะกอนและเถ้าไม้ยางจากโรงไฟฟ้าชีวมวลและเกิดผลประโยชน์สูงสุดแก่ชุมชน

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อทำงานวิจัยดินตะกอนกว๊านพะเยา												
2	หาแหล่งวัตถุดิบ เช่น ดินตะกอน, เถ้าไม้ยาง												
3	หาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนและเถ้าไม้ยาง												
4	ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง												
5	ทดสอบความคงทนของดินผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง												
6	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง												
7	จัดทำรูปแบบรายงาน และนำเสนองานวิจัย												

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาบน้ำจืดธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในภาคเหนือและอันดับ 3 ของประเทศไทย ปัจจุบันกว๊านพะเยาประสบปัญหาการกักเก็บน้ำได้น้อย เนื่องจากมีลักษณะภูมิประเทศล้อมไปด้วยภูเขาเมื่อเกิดฝนตกทำให้การไหลของน้ำจากภูเขาจะเกิดการชะล้างพังทลายของดิน ส่งผลให้กว๊านกักเก็บน้ำได้น้อยลง ด้วยสาเหตุนี้ทางหน่วยงานกรมชลประทานได้ดำเนินการขุดลอกดินตะกอนออกจากกว๊าน เพื่อเพิ่มปริมาณกักเก็บน้ำ

ปัจจุบันหน่วยงานทางภาครัฐได้มีการดำเนินนโยบายในการปรับปรุงระบบนิเวศบริเวณกว๊านพะเยา สำหรับพัฒนาแหล่งน้ำ ทางหน่วยงานกรมชลประทาน จังหวัดพะเยา ได้ดำเนินการขุดลอกเอาดินตะกอนที่เกิดจากการสะสมของดินตะกอนกว๊านพะเยา อันเนื่องจากการจากการพังทลาย ชะล้าง ตกตะกอนและซากพืชซากสัตว์สะสมลงสู่กว๊านพะเยา

2.2 เถ้าไม้ยาง

เถ้าไม้ยางมาจากอุตสาหกรรม ที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปยางพาราโดยหลังจากนั้นจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ปริมาณที่เหลือทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งรวมไปถึงปัญหาการกักเก็บ และค่าใช้จ่ายในการกำจัด เพื่อลดปัญหานั้นจึงนำวัสดุเถ้าไม้ยางที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงนำมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรงและสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์

2.3 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงและประเทศต่างๆ

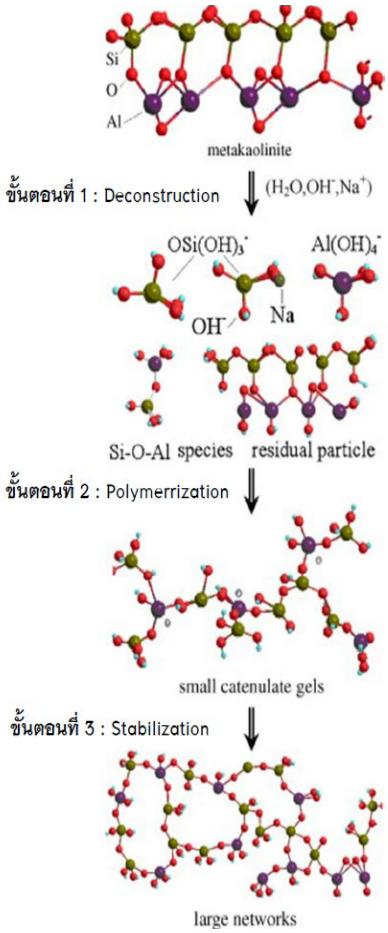
กรมทางหลวงประเทศไทย ได้เลือกใช้ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (UCS) ที่บ่มอายุ 7 วัน [1] [2]

สถาบัน	เกณฑ์การออกแบบ
กรมทางหลวง (ทล.ม. 206/2532)	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน 1) มีค่าไม่น้อยกว่า 2,413 กิโลปาสกาล สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก (ทล.ม. 203/2556) 2) มีค่าไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลปาสกาล สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทาง (ทล.ม. 204/2556) 3) มีค่าไม่น้อยกว่า 689 กิโลปาสกาล สำหรับก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง (ทล.ม. 206/2532)
British Road Research Laboratory, United Kingdom	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลปาสกาล
National Association of Australian State Road Authority (NAASRA), Australia	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 1,034-1,724 กิโลปาสกาล

ตารางที่ 2 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงและประเทศต่างๆ

2.4 จีโอพอลิเมอร์

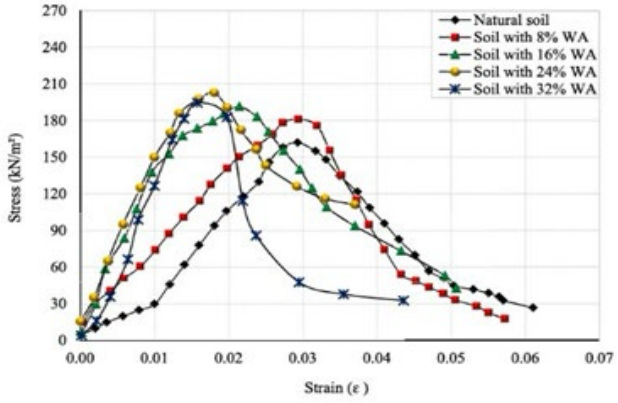
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่โครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก [3]



รูปที่ 1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ (Yao et al., 2009)

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Rizgar A. Blayi et.al (2024) ได้ศึกษาสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินตะกอนที่ผสมเถ้าไม้ยาง โดยใช้สารละลายด่าง Na_2SiO_3 และ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเถ้าไม้ยางสามารถใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและการลดการซึมน้ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุทางถนน [4]

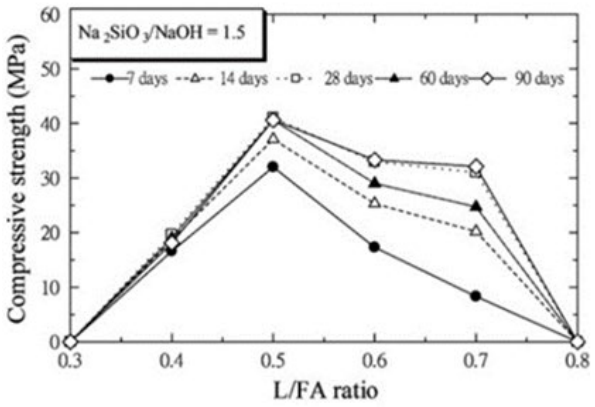


รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนผสมเถ้าไม้ยาง (Rizgar et.al ,2024)

ยงยุทธ บำรุงพล และคณะ (2022) ได้ศึกษากำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชีวมวลและจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้อัตราส่วนดินลูกรัง:เถ้าชีวมวล (NS:NH) 90:10 10:90 30:70 และ 50:50 ที่ NH เข้มข้น 8 โมลาร์ หลังบ่ม 7 วัน ได้ทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังปรับปรุงมีค่ากำลังอัดสูงสุด 1,066 kPa (NS:NH 50:50) ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานงานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง [5]

Hassan et al., (2019) ได้ศึกษาดินขาวเผาและเถ้าลอยหรือ เถ้าแกลบ ซึ่งอาจผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชั่น และถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อชะอะลูมินาและซิลิกาออกมาจากสารตั้งต้น แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวและให้กำลังอัดได้ [6]

Sukmak et al. (2013) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินตะกอนเป็นมวลรวมละเอียดและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ (โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์) เป็นตัวกระตุ้น ทดลองด้วยอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH และอัตราส่วน L/FA ต่างๆ บ่มตัวที่อุณหภูมิ 65 และ 75°C ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารกระตุ้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ L/FA = 0.5 และ Na_2SiO_3/NaOH = 1.5 จากงานวิจัยจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนแสดงให้เห็นว่าดินตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง [7]



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมจีโอพอลิเมอร์ ที่ได้รับความร้อนที่ 65 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงสำหรับอัตราส่วน L/FA และ Na_2SiO_3 : NaOHที่แตกต่างกัน (Sukmak et.al , 2013)

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาวิจัยนั้นประกอบไปด้วย ดินตะกอนกว๊านพะเยา เถ้าไม้ยาง โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซิลิเกต ดังแสดงในภาพที่ 4



รูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) ดินตะกอนกว๊านพะเยา (b) เถ้าไม้ยาง (c) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (d) โซเดียมซิลิเกต

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก	เพื่อหาค่า LL PL PI และ SL	ASTM D4318 ASTM D 427
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ	ASTM D 854
การหาขนาดคละ	เพื่อหาขนาดคละและจำแนกดิน	ASTM D 442
การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน	เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและหน่วย น้ำหนักแห้งสูงสุด	ASTM D 1157
กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว	เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว	ASTM D 2166
การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง	เพื่อหาคุณสมบัติต่อความทนทานต่อการสึกหรอ	ASTM D 559-96

ตารางที่ 3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.2 การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวแบบดั้งเดิม ซึ่งต้องใช้ปริมาณตัวอย่างที่มากและทรัพยากรการทดสอบจำนวนมาก เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว โดยทั่วไปต้องใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่และทรัพยากรจำนวนมาก เพื่อแก้ปัญหานี้ มีการพัฒนา โมลทดสอบจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยโมลถูกผ่าครึ่งตามแนวยาว และมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเป็น 1:2 [8] ซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ ธัชชัย ใหม่ขันท์ (2560)

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \quad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

เนื่องจากโมล PVC ขนาดเล็กไม่สามารถใช้ค้อนบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานได้ จึงได้มีการประดิษฐ์ค้อนบดอัดขนาดเล็กขึ้นมาใหม่ โดยค้อนบดอัดใหม่นี้มีคุณสมบัติดังนี้:

- น้ำหนักค้อนรวมก้านยก: 1.62 กิโลกรัม
- ระยะยก: 35.5 เซนติเมตร

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค้อนในการบดอัดโมลจำนวนทั้งหมดที่ 23 ครั้ง ซึ่งในการทดสอบ 1 โมล จะมีทั้งหมด 3 ชั้น

3.3 อัตราส่วนผสมในงานวิจัย

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ส่วนผสม	S : FA	L/FA	Na_2SiO_3 : NaOH
S90FA10L0.4	90 : 10	0.4	1.5
S80FA20L0.4	80 : 20		
S70FA30L0.4	70 : 30		
S90FA10L0.5	90 : 10	0.5	
S80FA20L0.5	80 : 20		
S70FA30L0.5	70 : 30		
S90FA10L0.6	90 : 10	0.6	
S80FA20L0.6	80 : 20		
S70FA30L0.6	70 : 30		

**หมายเหตุ S คือ ดินตะกอนกว๊านพะเยา
FA คือ เถ้าไม้ยาง
L คือ สารละลายอัลคาไลน์

3.4 สารละลายอัลคาไลน์

งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ (Liquid alkaline activator, L) ต่อเถ้าไม้ยาง (ash) เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายอัลคาไลน์เป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนเท่ากับ 1.5 และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์

3.5 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายางจีโอพอลิเมอร์

1.การเตรียมดินตะกอน : ร่อนดินตะกอนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

2.การเตรียมเถ้าไม้ยาง : ร่อนเถ้าไม้ยางผ่านตะแกรงเบอร์ 100

3.ผสมดินตะกอนกับเถ้าไม้ยาง : ผสมดินตะกอนกับเถ้าไม้ยางด้วยอัตราส่วนต่างๆดังนี้ S : FA = 90:10 80:20 และ 70:30 ผสมดินตะกอนและเถ้าไม้ยางกับสารละลายอัลคาไลน์ตามอัตราส่วนที่กำหนด

4.นำส่วนผสมที่ได้ใส่ในแบบหล่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 4 นิ้ว ทำการอัดตัวอย่างด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.6 การบ่มตัวอย่างดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ายางจีโอพอลิเมอร์

การบ่มตัวอย่างที่อัดแล้วในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมเป็นเวลา 7 28 60 และ 90 วัน เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว้านพะเยา

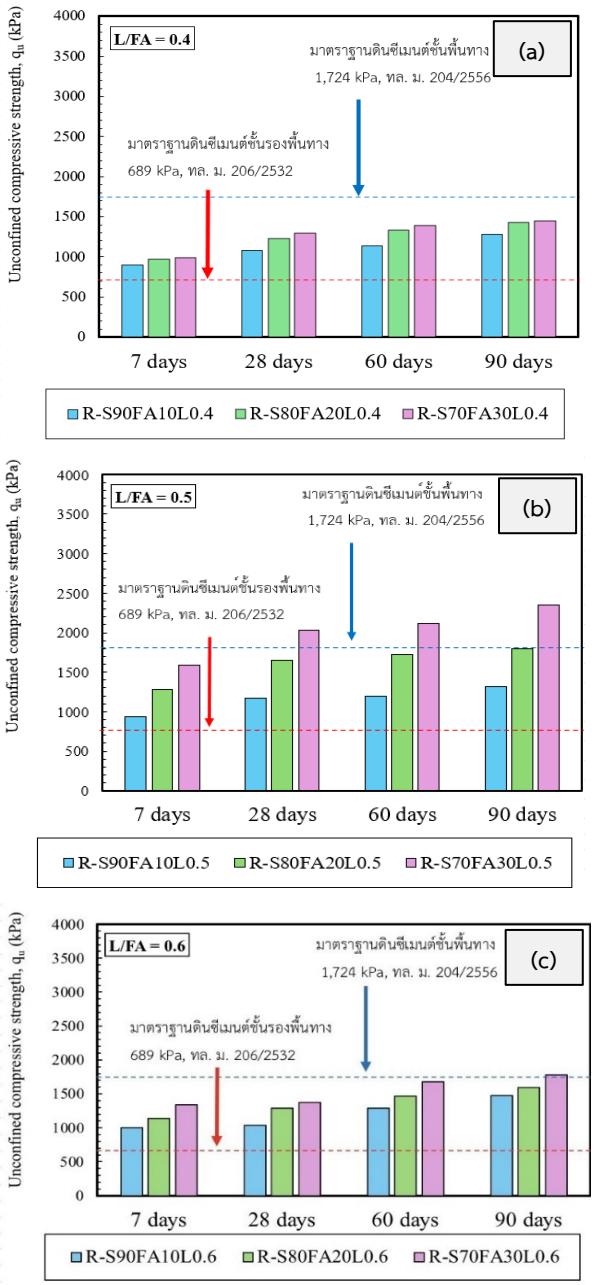
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว้านพะเยาในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว้านพะเยาซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบทางวิศวกรรม

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและจำแนกชนิดดินตะกอนกว้านพะเยาในทางวิศวกรรม

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 ASSHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ USCS	CL

4.2 ผลการทดสอบกำลังแรงอัดแกนเดียว

ทดสอบกำลังแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, qu) การทดสอบนี้ใช้เพื่อวัดความสามารถของวัสดุในการรับแรงอัดในทิศทางเดียว โดยไม่มีการรองรับด้านข้าง (Unconfined) และช่วยในการประเมินค่าความแข็งแรงของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง จะได้ค่าความเค้นสูงสุด (qu) จากการทดสอบ ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน Na_2Sio_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 1 และ 0.67 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง เท่ากับ L/FA เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแกนเดียว (qu) กับอายุการบ่มตัวของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง (Rubber Ash, R) ใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน Na_2Sio_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยางเท่ากับ (a) L/FA = 0.4, (b) L/FA = 0.5 และ (c) L/FA = 0.6

**หมายเหตุ R คือ เถ้าไม้ยาง

รูปที่ 5(a) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง ที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง L/FA เท่ากับ 0.4 โดยเปรียบเทียบวัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุทุกชนิดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยาง

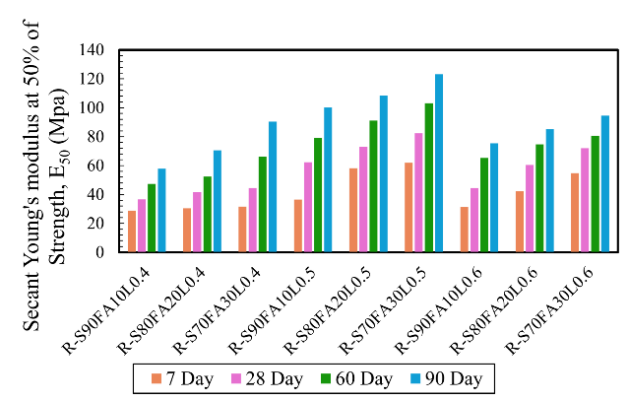
(Rubber Ash) ในวัสดุจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณเถ้าไม้ยางที่สูงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น [9] เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่าวัสดุผสมทุกชนิดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) แต่ยังไม่มีตัวอย่างใดที่ผ่านค่ามาตรฐานของชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) แม้จะบ่มนานถึง 90 วัน ตัวอย่างวัสดุที่ให้กำลังดีที่สุดคือ R-S70FA30L0.4 (สีชมพู) ซึ่งมีส่วนผสมเถ้าไม้ยางมากที่สุด 30% โดยตัวอย่างนี้ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าเถ้าไม้ยาง มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของวัสดุ ซึ่งวัสดุดินตะกอนผสมเถ้าไม้ยางทั้งหมดเหมาะสำหรับการใช้งานในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐาน

รูปที่5(b) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยาง โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยางในอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วน S:FA ที่ 90:10 80:20 และ 70:30 ภายใต้ระยะเวลาการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และการเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางช่วยเสริมความแข็งแรงอย่างชัดเจน วัสดุผสมที่มีอัตราส่วน S:FA เท่ากับ 70:30 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) และผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) ในทุกช่วงอายุ ยกเว้นที่ 7 วัน ซึ่งผ่านเพียงค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทางเท่านั้น โดยวัสดุที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 2348.65 (R-S70FA30L0.5) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มี FA 30% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการบ่มและปริมาณเถ้าไม้ยางช่วยเสริมกำลังรับแรงอัด เมื่อเพิ่มสารละลายอัลคาไลน์มากขึ้น ทำให้ NaOH สามารถละลายซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและการควบแน่นแบบลูกโซ่ (condensation-polymerization) นอกจากนี้ Na_2SiO_3 ยังช่วยยึดประสานโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และดินตะกอน ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น [10] โดยวัสดุผสมเถ้าไม้ยางทั้งหมดเหมาะสำหรับใช้ในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐาน

รูปที่ 5(c) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกวีนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง ที่มีอัตราส่วนอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง L/FA เท่ากับ 0.6 โดยเปรียบเทียบวัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งใช้อัตราส่วน S:FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุทุกชนิดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยาง (Rubber Ash) ในวัสดุจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณเถ้าไม้ยางที่สูงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization) ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่าวัสดุผสมทุกชนิดมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นรองพื้นทาง (689 kPa) แต่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐานของชั้นพื้นทาง (1,724 kPa) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง L/FA เท่ากับ 0.6 มีสารละลายมากที่สุด จะเห็นว่าเมื่อมีสารละลายที่มากเกินไปจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลง [11] เมื่อเทียบกับ L/FA เท่ากับ 0.5 ซึ่งวัสดุดินตะกอนผสมเถ้าไม้ยางทั้งหมดเหมาะสำหรับการใช้งานในชั้นรองพื้นทาง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของวัสดุผสมทุกชนิด

4.3 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด

ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสำหรับส่วนผสมมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2Sio_3 : NaOH) เท่ากับ 1.5

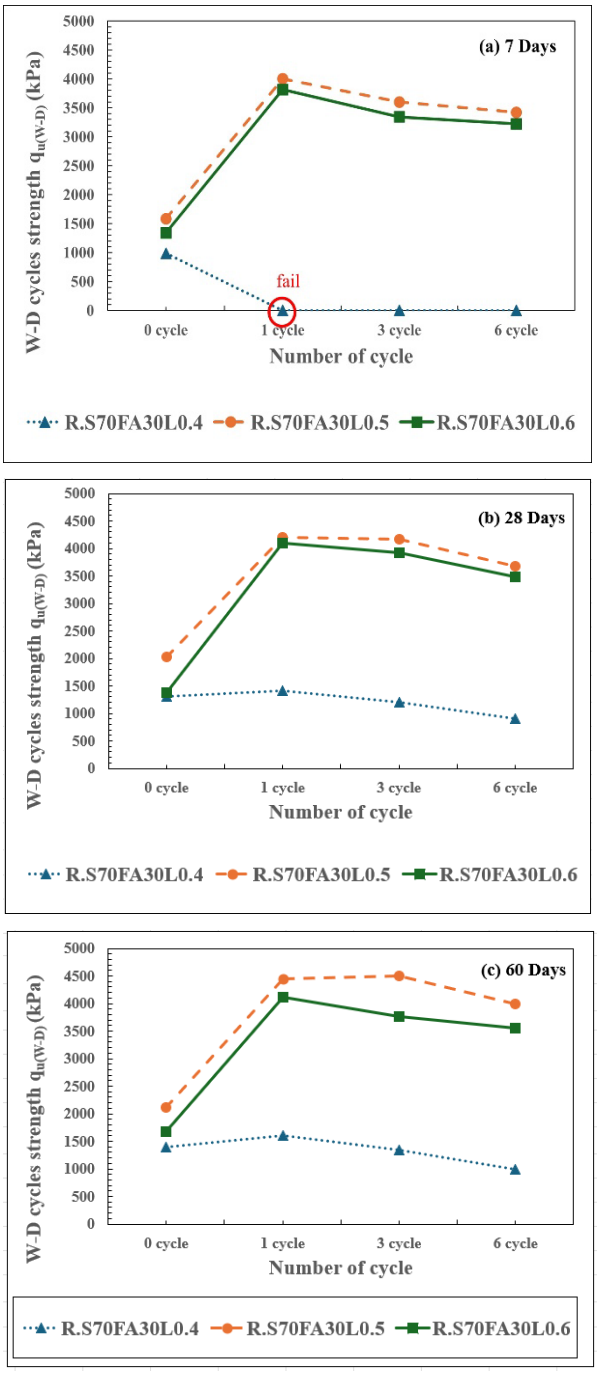


รูปที่ 6 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสำหรับส่วนผสมมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2Sio_3 : NaOH) เท่ากับ 1.5

รูปที่ 6 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ (E_{50}) ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าที่ใส่เข้าไปและระยะเวลาในการบ่ม จากเถ้าไม้ยางซึ่งใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง L/FA เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วน S:FA เท่ากับ 70:30 ตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน พบว่าค่า E_{50} เท่ากับ 61.90 82.31 103.04 และ 123.14 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 และนำตัวอย่างอบในตู้อบที่ ควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นผึ่งตัวอย่างให้ผิวแห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการออกแบบโครงสร้างและวัสดุที่ต้องรับมือกับสภาพเปียกและแห้งบ่อยๆ อีกทั้งยังสามารถคาดการณ์อายุการใช้งานของวัสดุ ซึ่งจะสามารถป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแกนเดียว (qu) กับอายุการบ่มตัวของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยาง (Rubber Ash, R) ใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน Na_2Sio_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยางเท่ากับ (a) 7 Days, (b) 28 Days และ (c) 60 Days

**หมายเหตุ R คือ เถ้าไม้ยาง

รูปที่ 7(a) สรุปผลการทดสอบ UCS ของ R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ของส่วนผสม R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6ถูกประเมินภายใต้อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 1.5 หลังจากบ่มเป็นเวลา 7 วัน โดยทำการทดสอบแบบ เปียก-แห้ง (W-D) ทั้งหมด 6 รอบ ก่อนการแช่น้ำ พบว่าทุกตัวอย่างมีค่า UCS ใกล้เคียงกัน หลังจากรอบ W-D ที่ 1 พบว่าค่า UCS ของ R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากระหว่างการทดสอบอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน [12] ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ในทางกลับกัน ตัวอย่าง R.S70FA30L0.4 พังทลายตั้งแต่รอบแรก เนื่องจากโครงสร้างการเชื่อมประสานไม่แน่นหนาเพียงพอ ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมและทำลายโครงสร้างของดินได้ เมื่อทำการทดสอบรอบ W-D ที่ 3 และ 6 พบว่า ค่า UCS ของ R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการแช่น้ำเป็นเวลานานและอุณหภูมิที่สูงเกินไปในกระบวนการอบแห้ง ส่งผลให้เกิด รอยแตกร้าวขนาดเล็ก และทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงในที่สุด

รูปที่ 7(b) การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ของ R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่าง R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 ที่มีสัดส่วนดินตะกอนกวีานต่อจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 1.5 หลังจาก บ่มเป็นเวลา 28 วัน โดยทำการ ทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง (W-D) ทั้งหมด 6 รอบ ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทั้งสามมีค่าสูงสุดในรอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของวัสดุอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้ม ลดลงตั้งแต่รอบที่ 3 ถึงรอบที่ 6 เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในรอบหลังๆ อาจเกิดจากกระบวนการแช่น้ำและอบแห้งซ้ำๆ ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างของตัวอย่าง และส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงในที่สุด

รูปที่ 7(c) การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ของ R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 หลังการบ่ม 60 วัน การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่าง R.S70FA30L0.4 R.S70FA30L0.5 และ R.S70FA30L0.6 ที่มีสัดส่วนดินตะกอนกวีานต่อจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 1.5 หลังจาก บ่มเป็นเวลา 60 วัน โดยทำการทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง (W-D) ทั้งหมด 6 รอบ ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง R.S70FA30L0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่รอบที่ 1 และคงที่ในรอบที่ 3 ก่อนจะลดลงในรอบถัดไป ในขณะที่ ตัวอย่าง R.S70FA30L0.4 และ R.S70FA30L0.6 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในรอบที่ 1 และลดลงเรื่อยๆ จนถึงรอบที่ 6 การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกเป็นผลมาจากกระบวนการแช่น้ำและอบแห้ง ซึ่งช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุ โดยพบว่าความร้อนมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุมีการเชื่อมประสานที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านการทดสอบซ้ำหลายรอบตัวอย่างสูญเสียน้ำ ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดและความแข็งแรงของวัสดุ

5. บทสรุป

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนโดยใช้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าไม้ยางสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางสามารถ สรุปผลได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยระยะเวลาการบ่มที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ส่วนผสมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดพบที่อายุการบ่ม 90 วัน โดยใช้สัดส่วนเถ้าไม้ยางต่อดินตะกอนเท่ากับ 70:30 และสารละลายอัลคาไลน์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1.5 รวมถึงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าไม้ยาง (L/FA) เท่ากับ 0.5 (R-S70FA30L0.5) ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดที่ 2348.65 kPa

2. ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนเถ้าที่มากขึ้นส่งเสริมความเป็นด่างของสารละลายอัลคาไลน์ ทำให้ NaOH สามารถชะล้างซิลิกาและอะลูมินาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้รับการกระตุ้น นอกจากนี้ สารละลาย Na_2SiO_3 ยังทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างจีโอพอลิเมอร์และดินตะกอน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน L/FA จนถึงค่าที่เหมาะสม ก่อนที่แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง

3.สารละลายอัลคาไลน์ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณเถ้ายางไม้และสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปอาจส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่มากเกินความจำเป็นสำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเชื่อมประสานของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของโพรงและรอยแตกร้าว ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดในที่สุด

4. การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ที่อายุบ่ม 60 วัน ที่มีสัดส่วนดินตะกอนกว๊านต่อจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 1.5 โดยทำการทดสอบแบบเปียกสลับแห้ง (W-D) ทั้งหมด 6 รอบ ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง R.S70FA30L0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่รอบแรก และคงที่ในรอบที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง อย่างไรก็ตาม ในรอบถัดไปค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการแช่น้ำและอบแห้งซ้ำ ๆ ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างของตัวอย่าง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงในที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนตลอดการวิจัย รวมถึงคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ทรัพยากรที่จำเป็น ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและครอบครัวที่เป็นแรงผลักดันสำคัญในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวง ทล.-ม. 204 (2556). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

[2] กรมทางหลวง ทล.-ม. 206 (2564). มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง

[3] Yao, X., et.al. (2009). Geopolymerization process of alkalimetakaolinite characterized by isothermal calorimetry. Thermochimica Acta, 493(1-2), 49-54

[4] Rizgar A. Blayi et.al. (2024). Cleaner Engineering and Technology. Cleaner Engineering and Technology, 18. 100726.

[5] ยงยุทธ บำรุงพล และคณะ (2022). Improvement of Lateritic Soilby Using Biomass Ash Geopolymer. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 27.

[6] Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. Journal of Cleaner Production, 223, 704-728.

[7] Sukmak et al. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. Construction and Building Materials, VoL.40, pp. 566-574.

[8] ธัชชัย ใหม่ขันท์ (2560). การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย. (หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,มหาวิทยาลัยพะเยา)

[9] Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P,Chindaprasirt P. NaOHactivated (2011). ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, Fuel2011;90 (6), 2118–24.

[10] Fernández-Jiménez A, Palomo A, Sobrados I, Sanz J (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous and Mesoporous Materials 91, pp. 111–119.

[11] Sukmak P., Sukmak G., Horpibulsok S., Setkit M., Kassawat S., Arulrajah A., (2017). Palm oil fuel ash-soft soil geopolymer for subgrade applications: strength and microstructural evaluation. Road Materials and Pavement, Design ISSN: 1468-0629.

[12] Thanh-Phong Ngo , Quoc-Bao Bui, Vu To-Anh Phan , Huu-Bang Tran, (2022). Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting–drying cycles at different conditions of pH and salt, Construction and Building Materials, 329.

สมบัติของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Properties of Sediment Soil Improved with Cement and Palm Oil Fuel Ash

นวพล บุญสุขนิกร[1,*] วุฒิไกร จันทร์พรม[2], นภสร แบนเพชร[3], อลงกต ธิน้อมธรรม[4], และ รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์[5]

[1,2,3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: 64103767@up.ac.th*

บทคัดย่อ

กว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญของจังหวัดพะเยา ซึ่งในปัจจุบันประสบปัญหาการตื้นเขินอันเนื่องมาจากการสะสมของตะกอนที่ถูกพัดพามากับกระแสน้ำ ส่งผลให้ปริมาณการกักเก็บน้ำลดลง หน่วยงานภาครัฐจึงดำเนินการขุดลอกและดูดตะกอนออกจากกว๊านพะเยาเป็นประจำทุกปี ทำให้เกิดการกองทิ้งของดินตะกอนในบริเวณโดยรอบในปริมาณมาก ส่งผลให้ดินตะกอนกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ/หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยทำการปรับปรุงดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0–10 และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0–20 พร้อมทั้งทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่อายุการบ่ม 7,28, 60 และ 90 วัน รวมถึงการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง นอกจากนี้งานวิจัยยังได้วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวโดยใช้แบบจำลองสมการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองสมการตัวแปรควบคุม

คำสำคัญ: ดินตะกอนกว๊านพะเยา, การปรับปรุงดิน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, กำลังรับแรงอัด, ความคงทน

Abstract

Kwan Phayao is an important freshwater source in Phayao Province. However, it is currently facing a sedimentation problem caused by the accumulation of sediments carried by water currents, leading to a reduction in its water storage capacity. To address this issue, government agencies have undertaken annual dredging and sediment removal operations in Kwan Phayao. Consequently, a large amount of excavated sediment has been left unused around the reservoir, creating an environmental concern due to improper disposal.

This research aims to study the engineering properties of Kwan Phayao sediment improved with Type 1 Portland cement and/or palm oil fuel ash. The sediment was stabilized using cement in proportions ranging from 0% to 10% and palm oil fuel ash in proportions ranging from 0% to 20%. Various tests were conducted, including modified Proctor compaction, unconfined compressive strength (UCS) testing at curing ages of 7, 28, 60, and 90 days, and durability testing using wetting and drying cycles. Additionally, the study analyzed UCS test results using multiple regression models and controlled variable models..

Keywords: Kwan Phayao sediment, soil stabilization, Portland cement, palm oil fuel ash, unconfined compressive strength, durability

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาปภาคเหนือถูกล้อมรอบไปด้วยภูเขาเมื่อเกิดฝนตกจะเกิดการพังทลายชะล้างหน้าดิน ทำให้ตะกอนถูกพัดพาลงสู่กว๊านพะเยา ส่งผลให้กว๊านพะเยาตื้นเขินจากการทับถมของดินตะกอน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กว๊านพะเยากักเก็บน้ำได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานกรมชลประทานจังหวัดพะเยาได้ดำเนินการขุดลอกตะกอนภายใต้ท้องกว๊านเพื่อเพิ่มปริมาณกักเก็บน้ำ ซึ่งตะกอนที่ถูกขุดลอกกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งอยู่รอบๆ บริเวณกว๊านพะเยาเป็นจำนวนมาก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นว่า ดินตะกอนที่ถูกกองทิ้งไว้มาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมการทาง อย่างไรก็ตามถ้าจะนำดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ในงานวิศวกรรมการทาง จำเป็นจะต้องปรับปรุงคุณภาพดินก่อน เพราะว่าดินตะกอนกว๊านประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ และอนินทรีย์และมีความชื้นตามธรรมชาติสูงทำให้ดินมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคนิคปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติในทางวิศวกรรม โดยการปรับปรุงดินตะกอนด้วยการผสมปูนซีเมนต์ แต่ในการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง กระบวนการผลิต

ปูนซีเมนต์ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน มีการปล่อยก๊าซ CO_2 สู่ชั้นบรรยากาศ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะหาวัสดุเพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง จึงจำเป็นที่จะต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการทดแทน ด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าปาล์มได้มาจากการเผาผลของปาล์มน้ำมัน เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนใหญ่เถ้าปาล์มจะถูกนำไปกองทิ้งไว้ทำให้สูญเสียพื้นที่โดยสูญเปล่า ทำให้เกิดมลภาวะการฟุ้งกระจายในอากาศอีกด้วย โดยใช้เถ้าปาล์มจากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล บริษัทท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อนำมาใช้ในงานวิศวกรรมผิวทางให้ได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (ทล.-ม. 204/2556) และรองพื้นทาง (ทล.-ม. 206/2564)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนในกว๊านพะเยามาใช้งานทางด้านวิศวกรรมผิวทาง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพทางวิศวกรรมของดินตะกอนในกว๊านพะเยา ที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าปาล์ม
3. นำวัสดุเหลือทิ้งภายในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการนำความรู้ทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่น

1.3 ขอบเขต

การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทานของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม มีขอบเขตการวิจัยของโครงการ ดังต่อไปนี้

1.รวบรวมงานวิจัยและศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วย การผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม

2.ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกว๊านพะเยา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และเถ้าปาล์มที่ได้จากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล บริษัทท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี

3.ศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมและทางเคมีของดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม

4.การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 28, 60, และ 90 วัน และการทดสอบ ความคงทน ด้วยวิธีเปียกและแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. การปรับปรุงดินตะกอนที่มีการปนเปื้อนหรือมีคุณภาพต่ำด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้พื้นที่ดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การใช้ดินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยสามารถลดต้นทุนในการจัดหาวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ที่มีราคาแพงได้

3. การใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด และส่งเสริมการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่

4. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบทางวิศงวกรรมผิวทาง หรืองานวิจัยอื่น ๆ

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับแผนของการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งเป็นขั้นตอนตามลำดับวิธีวิจัย ดังแสดงใน ตาราง 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อทำงานวิจัยดินตะกอนกว๊านพะเยา												
2	สำรวจแหล่งดินตะกอน เถ้าปาล์มและนำตัวอย่างมาทดสอบ												
3	หาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน กว๊านพะเยาและปาล์ม												
4	ทดสอบ UCS ของดินผสมปูนซีเมนต์และดินผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าปาล์ม												
5	ทดสอบความคงทนของ ดินผสมปูนซีเมนต์และดินผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าปาล์ม												
6	ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม												
7	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง												
8	จัดทำรายงานและนำเสนองานวิจัย												

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กรมชลประทานจังหวัดพะเยา (2563) กล่าวว่าดินตะกอนที่พบในพื้นที่นี้ซึ่งมีความสำคัญต่อระบบนิเวศและการจัดการทรัพยากรในทะเลสาบ

- ลักษณะทั่วไปของดินตะกอนในกว๊านพะเยา

ดินตะกอนในกว๊านพะเยามักเกิดจากการสะสมของตะกอนที่พัดพามาจากลำห้วยและแหล่งน้ำรอบๆอันประกอบด้วยดินเหนียว, ดินทราย , และตะกอนอินทรีย์ที่มาจากพืชและสัตว์ในทะเลสาบและดินตะกอนในกว๊านพะเยามักมีความสามารถในการเก็บน้ำได้ดีและมีปริมาณธาตุอาหารที่สามารถสนับสนุนการเจริญเติบโตของพืชน้ำและพืชบกการสะสมของดินตะกอนอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของทะเลสาบ เช่น การลดความลึกของน้ำ, การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการทางเคมีและชีวภาพในน้ำ, และการเปลี่ยนแปลงของแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ

การศึกษาดินตะกอนในกว๊านพะเยามีความสำคัญในการวิเคราะห์ปริมาณการสะสม, คุณสมบัติของดิน, และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการจัดการที่มีประสิทธิภาพ

การจัดการดินตะกอนในทะเลสาบพะเยาเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาคุณภาพน้ำ,การป้องกันการกัดเซาะ, และกาดูแลรักษาความหลากหลายทางชีวภาพ

2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มคือผลพลอยได้จากการเผาไหม้ส่วนต่างๆของต้นปาล์ม ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นผงละเอียดและประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียม, โพแทสเซียม, และฟอสฟอรัส

ถ้าปาล์มมีแร่ธาตุที่ช่วยเพิ่มคุณภาพของดินและใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนทานและเถ้าปาล์มสามารถใช้เป็นตัวกรองในกระบวนการบำบัดน้ำเพื่อกำจัดสารพิษและตะกอน การจัดการเถ้าปาล์มอย่างไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและน้ำ [1],[2-5]

Hussin et al. (1996) ได้ศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันถูกบดให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต นอกจากนี้ ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตได้ นอกจากนี้ เถ้าปาล์มยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายกรด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง

2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (pozzolan) เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการทำปฏิกิริยากับปูนขาว (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ที่เกิดจากการเติมน้ำในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อสร้างสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลานสามารถมาจากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (fly ash), เถ้าปาล์มน้ำมัน, ซิลิกาฟูม (silica fume), และตะกรันจากเตาเผาเหล็ก (slag) [6]

Santhosh et al. (2022) ได้ศึกษาการผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน ลงในดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลของดินได้หลายประการ [7],[8]

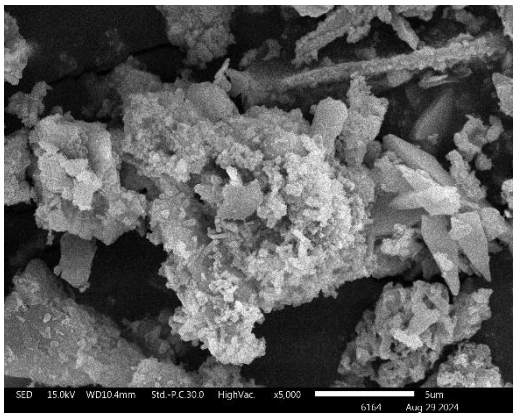
2.2.1 เถ้าปาล์มช่วยลดความเหนียวของดิน ทำให้ดินมีความสม่ำเสมอและสามารถรับแรงได้ดีขึ้น.

2.2.2 เพิ่มความแข็งแรงในการรับแรงอัด เถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ดินแข็งแรงขึ้นผ่านปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งช่วยเสริมโครงสร้างของดิน.

2.2.3 ปรับปรุงสมบัติกันซึมและความทนทาน: การเติม เถ้าปาล์มน้ำมัน ช่วยลดการซึมน้ำและการซึมผ่านของไอออนคลอไรด์ ทำให้ดินทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น.

2.2.4 เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของดิน โดยเฉพาะในดินที่มีแรคาโอไลไนต์ต่ำ ทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น.

สรุปแล้วเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นวัสดุที่มีประโยชน์ในการปรับปรุงดินตะกอน โดยช่วยเพิ่มความแข็งแรง ลดความเหนียว ปรับปรุงสมบัติกันซึมและเพิ่มความทนทานของดิน ทำให้สามารถใช้ในงานก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น และการใช้วัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงดินตะกอนด้วยซีเมนต์เป็นวิธีการที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานก่อสร้างที่ต้องการความทนทานและความแข็งแรงสูง [9]



รูปที่ 1 เถ้าปาล์มร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงให้เห็นว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการบดหรือได้จากโรงงานโดยตรงจะมีพื้นผิวค่อนข้างหยาบ มีความพรุนสูง รูปร่างโดยรวมเป็นก้อนกลมติดกัน และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดแล้วจะมีรูปร่างไม่คงที่ อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยม มีขนาดเล็กลง และมีความพรุนต่ำกว่าก่อนการบด

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นประกอบด้วย ดินตะกอนกว๊านพะเยา ที่เก็บได้จากการขุดทะเลสาบบริเวณรอบกว๊านพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีโปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์ และคอนกรีตรีไซเคิลดังตารางที่ 2



(a) (b) (c)

รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) ดินตะกอนกว๊านพะเยา (b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (c) เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา

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



รูปที่ 3 กองดินตะกอนที่ขุดลอกมาจากกว๊านพะเยา

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (unconfined compression test) ดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน จากตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.35 ลูกบาศก์เซนติเมตรและความสูงเท่ากับ 10.71 ลูกบาศก์เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างโดยนำดินตะกอน มาอบให้แห้งแล้วทุบเป็นผงนำมาร่อนผ่านจะแกรงเบอร์200 และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันคนให้เข้ากันและเติมน้ำ 0.073ลิตร แล้วทำการใส่ในตัวอย่างทรงกระบอกในท่อ PVC และตำทั้งหมด 3ชั้น ชั้นละ 25ครั้ง หลังจากนั้นนำไปห่อ ด้วยพลาสติก แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในกล่องพลาสติกเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเมื่อครบอายุการบ่มตัวนำไปตรวจสอบขนาดของ ตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบในเครื่องกดสำหรับอัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) โมล PVC (b) ค้อนบดอัดที่ประดิบขึ้นมาใหม่

ตารางที่ 3 ตารางออกแบบส่วนผสมในงานวิจัย

ส่วนผสม	ดินตะกอน (%) โดยน้ำหนักดิน	ซีเมนต์ (%) โดยน้ำหนักดิน	เถ้าปาล์มน้ำมัน (%) โดยน้ำหนักดิน
C0P0	100	0	0
C0P5	95	0	5
C0P10	90	0	10
C0P15	85	0	15
C0P20	80	0	20
C3P0	97	3	0
C3P5	92	3	5
C3P10	87	3	10
C3P15	82	3	15
C3P20	77	3	20
C5P0	95	5	0
C5P5	90	5	5
C5P10	85	5	10
C5P15	80	5	15
C5P20	75	5	20
C7P0	93	7	0
C7P5	88	7	5
C7P10	83	7	10
C7P15	78	7	15
C7P20	73	7	20
C10P0	90	10	0
C10P5	85	10	5

C10P10	80	10	10
C10P15	75	10	15
C10P20	70	10	20

3.3 การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับการทดสอบกำลังรับ แรงอัดแกนเดี่ยว

การพัฒนาโมลทดสอบจากท่อ PVC เป็นการปรับปรุงวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ช่วยลดข้อจำกัดด้านทรัพยากรและความซับซ้อนของการทดสอบ การใช้โมลทดสอบนี้ยังช่วยให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยและการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โมลทดสอบจากท่อ PVC กำหนดความสูงให้มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเทียบกับความสูงเป็น 1 ต่อ 2 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของธัชชัย ใหม่ขันท์ (2560)



(a) (b)

รูปที่ 5 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) โมล PVC (b) ค้อนบดอัดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่

เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักเท่ากันกับดินที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จึงมีการใช้วิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัด โดยใช้สมการ 3.1 เป็นเครื่องมือในการคำนวณพลังงานที่ต้องใช้ในการบดอัดตัวอย่างดินให้อยู่ในหน่วยน้ำหนักที่กำหนด วิธีการนี้ช่วยให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จำเป็นในการทดสอบความแข็งแรงและความคงทนของดิน

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \qquad (3.1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ

$$B = \frac{16.456 \times 240.537}{3 \times 1.63 \times 35.5} = 22.79 \approx 23 \text{ ครั้ง}$$

3.4 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

1.คำนวณอัตราส่วนของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มตามสัดส่วนที่กำหนด

2.การผสมวัสดุแห้ง: ผสมดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มในสภาพแห้งให้เข้ากันดี โดยใช้เครื่องผสมหรือมือ

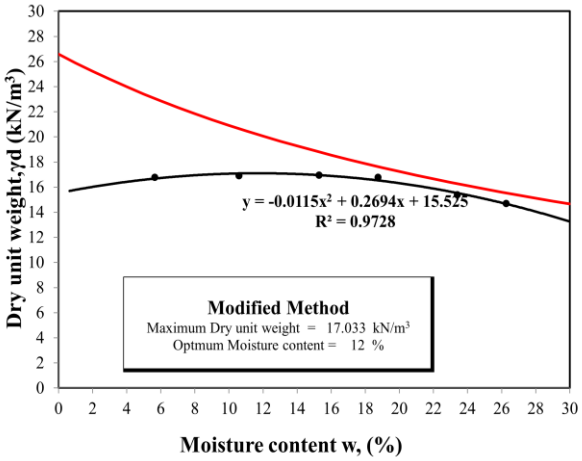
3.การปรับความชื้นเติมน้ำลงในส่วนผสมที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เติมและคลุกเคล้าจนได้ความชื้นที่เหมาะสมกับการทำงาน

4.นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ใส่ในแม่พิมพ์และทำการบดอัด โดยใช้เครื่องมือบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นและแข็งแรง

5.นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วไปบ่มในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเต็มที่ โดยปกติจะบ่มเป็นเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน

4. ผลการศึกษา

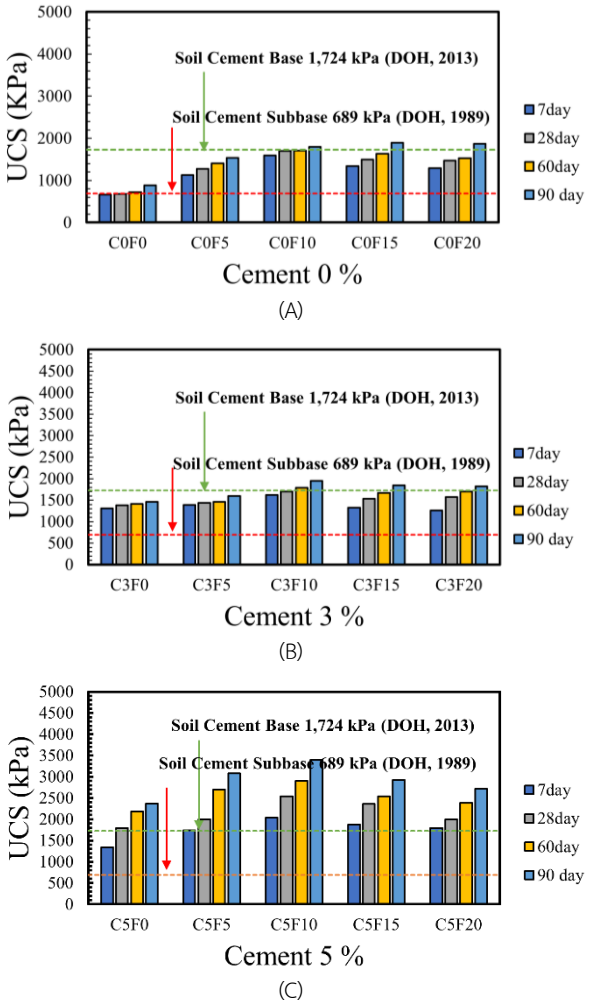
4.1 ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา (Modified compaction test)

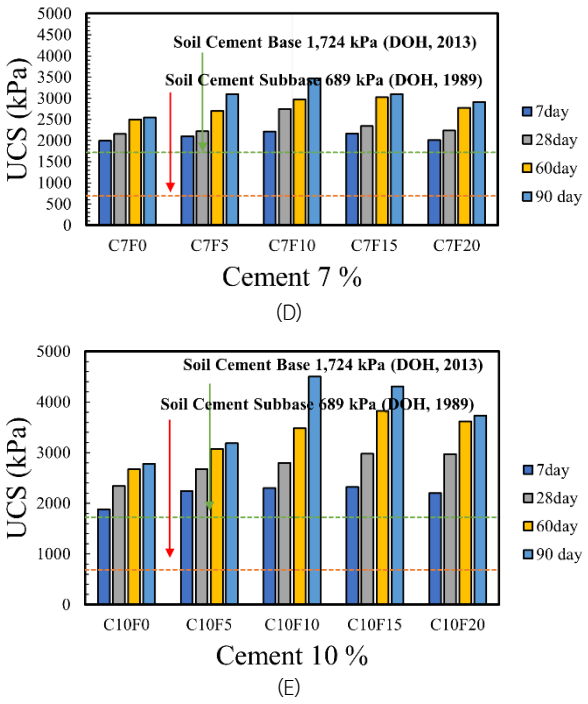


ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตัวอย่างของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ พบว่ามีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight) อยู่ระหว่าง 17.03 KN/m^3 และปริมาณความชื้น เท่ากับ 12.00%

4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดรับแกนเดี่ยวของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเดี่ยว (Unconfined compressive strength, UCS) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป แต่การเพิ่มเถ้าลอยผสมเข้าไปในดินกลับแสดงผลแตกต่างกันไปโดยค่ากำลังรับแรงอัด USC จะมีการพัฒนาสูงสุดที่ปริมาณเถ้าลอยระหว่าง 0–10% ทั้งนี้พบว่าในกรณีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% จะส่งผลให้ค่ากำลัง USC ที่อายุบ่ม 90 วัน อยู่ใน
ระดับที่สูงสุดและเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 15% กับ 20% ค่ากำลัง USC ที่อายุเดียวกันจะลดลงเล็กน้อยแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของส่วนผสม





รูปที่6 กราฟ UCS ดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน (A) ปูนซีเมนต์ 0% (B) ปูนซีเมนต์ 3% (C) ปูนซีเมนต์ 5% (D) ปูนซีเมนต์ 7% (E) ปูนซีเมนต์ 10%

จากภาพ A ซึ่งแสดงผลการทดสอบค่า UCS ของดินตะกอนกว๊านที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ (0%) พบว่า ตัวอย่าง C0F0 และ C0F5 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังค่อนข้างน้อย เมื่อถึงตัวอย่าง C0F10 พบว่าค่า UCS ที่7 28 60 และ 90วัน ให้ค่ากำลังอยู่ที่ 1589.08 , 1699 , 1710 , 1800 kPa ตามลำดับมีการพัฒนากำลังมากขึ้นอย่างชัดเจน แต่ในช่วงหลังจากนั้น ตัวอย่าง C0F15 และ C0F20 มีค่า UCS ลดลงทีละน้อย ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันในตัวอย่างมากเกินไป ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเม็ดดินลดลงและทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย อ้างอิงมาจาก [10]

จากภาพ B ซึ่งแสดงผลการทดสอบ UCS ของดินตะกอนกว๊านที่ผสมปูนซีเมนต์ 3% จะเห็นได้ชัดว่ามีความต่างการกันระหว่างตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่ปูนซีเมนต์ ซึ่งค่าของตัวอย่าง C3F0 , C3F5 ยังมีค่า UCS ที่ไม่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง แต่เมื่อตัวอย่าง C3F10 พบว่าค่า UCS ที่ 7 28 60 และ90วัน ให้ค่ากำลังอยู่ที่ 1620 , 1700 , 1786.38 , 1949.53 kPaตามลำดับมีการพัฒนากำลังมากขึ้นอย่างชัดเจน เพราะว่ามีปูนซีเมนต์เข้ามาช่วยทำให้เกิดการเชื่อมผสาน ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจากปูนซีเมนต์จะสร้างสาร CSH และ CAH จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งจะทำให้เกิดการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในหรือก่อน 28วัน และหลังจาก 28วัน จะเกิดปฏิกิริยาปอสโซลานิกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งจะช่วยเพิ่มค่า UCS มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง
จากสูตรสมการ

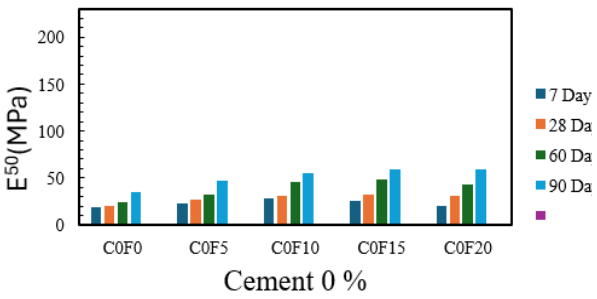
$Ca(OH)2+SiO2+H2O \longrightarrow$ C-S-H (Calcium Silicate Hydrate)

$Ca(OH)2+Al2O3+H2O \longrightarrow$ C-A-H (Calcium Aluminate Hydrate)

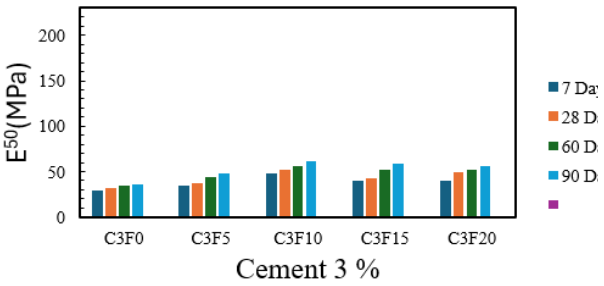
อ้างอิงมาจาก [10],[13]

จากภาพ C ซึ่งแสดงผลการทดสอบ UCS ของดินตะกอนกว๊านที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด UCS ของดินตะกอนกว๊านที่ผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 5% (ภาพ C) พบว่าปูนซีเมนต์ในปริมาณ 5% มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 3% อย่างชัดเจน โดยค่ากำลังรับแรงอัดส่วนใหญ่มีค่าเกินมาตรฐานของ Soil Cement Base ตามที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ยังพบค่าบางส่วนที่ไม่ผ่านมาตรฐานดังกล่าว และสังเกตได้ว่าในตัวอย่าง C5F15 และ C5F20 ค่ากำลังรับแรงอัดเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ และการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ แต่หากเติมเถ้าลอยในปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้ ความหนาแน่นและความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเถ้าลอยที่มากเกินไปจะไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่งผลให้เกิดเจล CSH น้อยลง ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต [11]

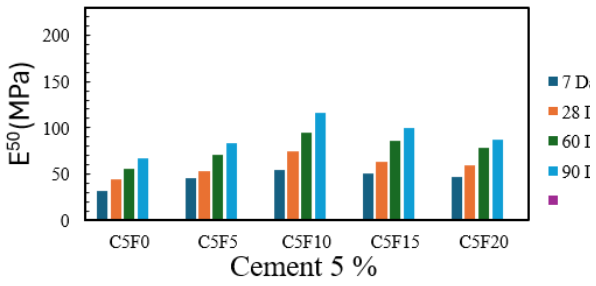
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินตะกอนกว๊านที่ผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 10% (ภาพ E) พบว่าปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10% มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่โดดเด่น โดยค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่มที่ 7, 28, 60 และ 90 วัน ซึ่งสะท้อนถึงผลของการบ่มที่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าตัวอย่าง C10F15 และ C10F20 มีแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกันและพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์กับเถ้าปาล์มมีการพัฒนากำลังมากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าปาล์มที่ทำงานร่วมกับกระบวนการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ในตัวอย่างดินตะกอน [12]



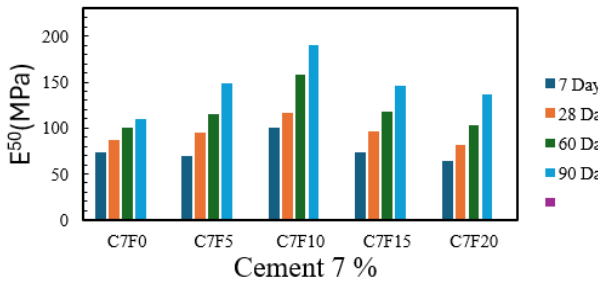
(A)



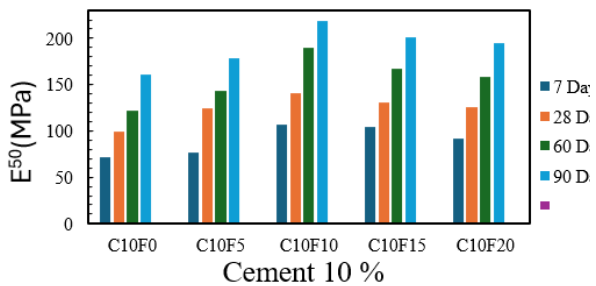
(B)



(C)



(D)

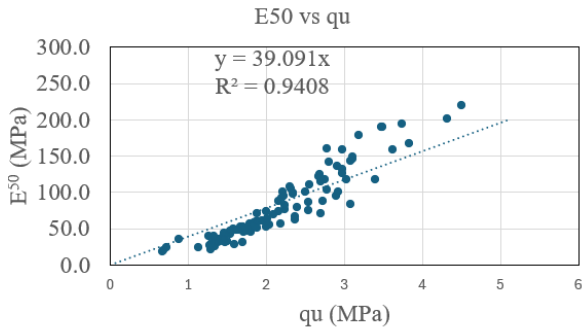


(E)

รูปที่7 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน (A) ปูนซีเมนต์ 0% (B) ปูนซีเมนต์ 3% (C) ปูนซีเมนต์ 5% (D) ปูนซีเมนต์ 7% (E) ปูนซีเมนต์ 10%

4.3 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ค่าความยืดหยุ่น E50 และค่ากำลังรับแรงอัด UCS มีความสัมพันธ์กันโดยตรง เมื่อค่า UCS เพิ่มขึ้น ค่า E50 ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่เติมเข้าไปรวมถึงระยะเวลาการบ่ม โดยสามารถสรุปแนวโน้มของค่าที่เหมาะสมได้ดังนี้ - ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมอยู่ที่ **10-15%** - อายุการบ่มก่อน 28 วัน เถ้าปาล์ม **10%** จะให้ค่า E50 สูงสุด - อายุการบ่มหลัง 28 วัน เถ้าปาล์ม **15%** จะให้ค่า E50 สูงสุด - ค่า E50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงต้น และช้าลงในช่วงบ่มหลัง 28 วัน ดังนั้น การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับปูนซีเมนต์สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวโน้มพฤติกรรมคล้ายกับดินที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารปรับปรุงคุณภาพ

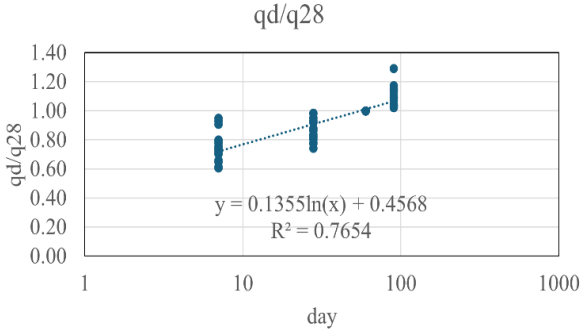


รูปที่8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E^{50} กับ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดิน (qu)

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E^{50} กับ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดิน (qu) พบว่าทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่มากขึ้นจะส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า ดินที่สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นจะมีความแข็งแรงหรือความสามารถในการต้านทานการเสียรูปสูงขึ้นด้วย

ถ้าดิน มีค่า E_{50} สูง ⟶ โครงสร้างบนดินมีโอกาสทรุดตัวน้อยลง

ถ้าดิน มีค่า qu สูง ⟶ ดินสามารถรับน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างได้มากขึ้น



รูปที่9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง qd/q28 กับ อายุของตัวอย่างดิน (day)

กราฟแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน qd/q28 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างดิน ซึ่งหมายความว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยเป็นการเพิ่มขึ้นแบบลอการิทึม ซึ่งหมายความว่าในช่วงแรกการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป

5. สรุปผล

การวิจัยนี้การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาโดยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนของดินสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรมผิวทาง ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดิน โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5-10% และปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมอยู่ที่ 10-15% นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ช่วยเสริมสร้างโครงสร้างของดิน ส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติระบุว่าแบบจำลองสมการถดถอยพหุคูณที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความเชื่อมั่นมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนในอนาคต

ทั้งนี้ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร่วมกับปูนซีเมนต์ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มสมบัติทางวิศวกรรมของดินเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนวัสดุก่อสร้าง และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน สามารถนำไปใช้งานในภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุพการีทุกท่าน ผู้เป็นกำลังใจสำคัญและคอยสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด ทั้งในด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิต ท่านได้มอบโอกาสแห่งการเรียนรู้ให้แก่ข้าพเจ้านับตั้งแต่วัยเยาว์จนถึงปัจจุบัน หล่อหลอมให้ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่นอดทน และพร้อมก้าวไปสู่ความสำเร็จในชีวิต ข้าพเจ้าขอระลึกถึงพระคุณของท่านด้วยความเคารพอย่างสูงสุด และขอขอบพระคุณจากใจสำหรับทุกสิ่งที่ท่านได้มอบให้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ **รศ.ธนกร ชมภูรัตน์** อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยของข้าพเจ้า ซึ่งให้ความเมตตาคำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ท่านได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ พร้อมทั้งแนะแนวทางที่ช่วยเสริมสร้างศักยภาพของข้าพเจ้า ทั้งในด้านวิชาการและการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดัน

สำคัญที่ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวข้ามอุปสรรคต่าง ๆ และดำเนินการศึกษาจนสำเร็จลุล่วง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ **นายวรากร สุยะต๊ะ** รุ่นพี่นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ และการสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสเรียนรู้และทำงานวิจัยภายใต้การดูแลของพี่ รวมถึงได้รับประสบการณ์อันล้ำค่าที่ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างเป็นระบบและประสบความสำเร็จตามเป้าหมาย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะแนวทาง และช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการศึกษาค้นคว้า นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณรุ่นพี่ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนให้คำแนะนำ และแบ่งปันประสบการณ์อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ครอบครัว เพื่อนร่วมอุดมการณ์ และทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในการสนับสนุนข้าพเจ้า ทั้งในด้านวิชาการและด้านจิตใจ ทุกกำลังใจและความช่วยเหลือที่ได้รับ ล้วนเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จ หากมีข้อผิดพลาดประการใดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Chindaprasirt, C. Chottitanorm and S. Rukzon, “Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, 23, 2011, pp. 499-503.

[2] S. Rukzon, P. Chindaprasirt and R. Mahachai, “Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash”, International Journal Mineral Metallurgy Materials, 16, 2009, pp. 245-247.

[3] P. Chindaprasirt, S. Rukzon S and V. Sirivivatnanon, “Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash”, Construction and Building Materials 22(5, 2008, pp. 932-938

[4] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, “Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash”, Construction and Building Materials, 21, 2007, pp. 1492-1499

[5] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, “Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel as and fly ash”, International Journal Mineral Metallurgy Materials, 16(4), 2009, pp. 475-481.

[6] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, “Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash”, Construction and Building Materials, 21, 2007, pp. 1492-1499.

[7] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, “Durability of concrete using of two kinds of pozzolanicmaterials”, TRF Senior Research Scholars Progress II Faculty of Engineering, Khon Kean University, 2013, August 2

[8] P. Chindaprasirt, and V. Sata, “Cement and Geopolymer Composite Material”, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 2014, pp. 1-188.

[9] สำเริง รักซ้อนชัย จาตุรพิทักษ์กุลสมชาย ชูชีพสกุล และปริญญา จินดาประเสริฐการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา . 16 (2): 38-43.

[10] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Addison Wesley Longman Ltd.

[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.

[13] 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, voi. 13, no. 11 pp. 6430,2021

การปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง

Improvement of Sediment Soil Properties with Cement and Rubber Wood Ash

อมรรัตน์ ขุนทะวาด[1] ณัฐกฤตา พาพันธ์[2] พรไพลิน ดีเทียน[3,*] และ รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ [4]

[1,2,3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: 64101967@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการนำดินตะกอนกว๊านพะเยา จ.พะเยา วัสดุเหลือทิ้งจากการขุดลอกดินตะกอนมาพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำดินตะกอนมาใช้ประโยชน์ด้านวิศวกรรมการทางและศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) ของดินตะกอนกว๊านพะเยาผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าไม้ยาง โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ปริมาณ ปูนซีเมนต์ อัตราส่วนร้อยละ 0 3 5 7 และ 10 และเถ้าไม้ยาง 0 5 10 15 และ 20 ของน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 28 60 แล90 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มค่า UCS เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุ และการเติมเถ้าไม้ยางพาราช่วยเพิ่มค่า UCS ผ่านปฏิกิริยาปอซโซลานิก การใช้เถ้าไม้ยางในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ค่า UCS ลดลง เนื่องจากสารอัลคาไลน์ออกไซด์ส่งผลให้โครงสร้างดินเกิดการขยายตัว โดยสัดส่วนเถ้าไม้ยางที่เหมาะสมที่สุดคือ 15% ค่า UCS จะมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วภายใน 28 วันแรก และเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงหลังจากนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E50) มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่า UCS และมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างชัดเจน ดินตะกอนที่ปรับปรุงแล้วมีความสามารถช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดและความแข็งแรงของวัสดุและยังคงรักษาคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้งานในงานก่อสร้างที่ต้องการความคงทนและเสถียรภาพของวัสดุ

คำสำคัญ : ดินตะกอนกว๊านพะเยา, ปฏิกิริยาไฮเดรชัน, ปฏิกิริยาปอซโซลาน, เถ้าไม้ยาง, กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

Abstract

This research presents the introduction of Kwan Phayao sediment in the provincePhayao, waste materials from dredging sediment to develop engineering properties. The objective is to use sediment for engineering purposes and study the appropriate ratio for the single core compressive strength (UCS) of Kwan Phayao sediment mixed with cement. and rubber wood ash By testing the single core compressive strength at a ratio of 100 cement0, 3, 5, 7 and 10 and rubber wood ash 0, 5, 10, 15 and 20 of dry soil weight respectively. At a curing age of 7, 28, 60 and 90 days, it was found that increasing the amount of cement increased the UCS value because the hydration reaction that occurred reinforced the material structure. And adding rubber wood ash increases the UCS value throughPozzolanic behavior Using excessive amounts of rubber wood ash can cause UCS values to decrease because alkaline oxides cause soil structure to expand. The optimal proportion of rubber wood ash is 15% UCS values develop rapidly within the first 28 days and increase at a reduced rate thereafter. Elastic modulus (E50) values tend to correspond to UCS values and are clearly positively correlated. Improved sediment has the ability to help develop compressive strength and material strength and maintainLong-term material properties This is beneficial in construction applications that require durability and stability of the material

Keywords: Phayao Lake sedimentary soil, hydration, pozzolan, rubber ash, unconfined compressive strength

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกว๊านพะเยาประสบปัญหาการตื้นเขินของดินตะกอน เนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำที่ไหลลงสู่กว๊านพะเยาทำให้เกิดการทับถมของดินตะกอน ส่งผลให้กว๊านพะเยากักเก็บน้ำได้น้อยลง จึงจำเป็นต้องมีการขุดลอกอย่างสม่ำเสมอ ทางหน่วยงานกรมชลประทานจังหวัดพะเยาจึงได้มีการขุดลอกดินตะกอนในทุกๆปี ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาภายหลัง ดินตะกอนกว๊านถือว่าเป็นขยะสิ่ง แวดล้อม เนื่องจากดินตะกอนถูกกองทิ้งไว้รอบๆบริเวณกว๊านพะเยา

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำดินตะกอนที่เป็นขยะสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่นเหล่านี้มาจัดการให้เกิดประโยชน์ จึงได้มีการ ศึกษา

ความเป็นไปได้ในการใช้ดินตะกอนมาปรับปรุงคุณสมบัติให้สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดินซีเมนต์ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางอย่างไรก็ตามการนำดินตะกอนมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมักจะพบปัญหาดินที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในทางวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำและการบวมตัวสูง ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ จากปัญหาข้างต้นจึงได้มีการนำเทคนิคมาปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้ใช้ในงานผิวทางได้ โดยใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์จะใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงและยังปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดปัญหาโลกร้อน เพื่อเป็นการลดต้นทุนจำเป็นจะต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการทดแทนด้วยวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าชีวมวล ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนกว๊านพะเยาโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าไม้ยาง ซึ่งตัวอย่างนี้จะใช้ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 0 3 5 7 และ 10 และเถ้าไม้ยางในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ของน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมผิวทาง
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าไม้ยาง
3. เพื่อนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาประยุกต์ ใช้ในทางวิศวกรรมให้เกิดประโยชน์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. รวบรวมงานวิจัยและศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง
2. ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกว๊านพะเยา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าไม้ยางที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี
3. ศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมและทางเคมีของดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยขั้นต้นด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดิน และการทดสอบทางเคมี และการทดสอบการชะละลาย เป็นต้น
4. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกน ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน และการทดสอบ ความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาและดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง
2. ได้แบบจำลองที่มีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง
3. ทราบถึงพฤติกรรมการสูญเสียจากการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของดินตะกอนกว๊านพะเยาและดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง
4. ได้แนวทางในการนำเอาดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ในงานวิศวกรรมการทาง
5. เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ใหม่ ๆ ที่เกี่ยวกับแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทางวิศวกรรม เพื่อเป็นแรงสนับสนุนให้มีการนำทรัพยากรที่เหลือใช้หรือใช้งานได้ไม่หลากหลายให้นำมาใช้งานได้มากขึ้น
6. เถ้าไม้ยางเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาถูกกว่าวัสดุเสริมกำลังแบบอื่น ๆ สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้าง และทำให้การปรับปรุงดินมีความคุ้มค่ามากขึ้น

1.5 แผนการดำเนินการวิจัย

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อทำงานวิจัยดินตะกอนกว๊านพะเยา												
2	หาแหล่งวัตถุดิบ เช่น ดินตะกอน, เถ้าไม้ยาง												
3	หาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน												
4	ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าไม้ยาง												
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง												
6	จัดทำรูปแบบรายงาน และนำเสนองานวิจัย												

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา

เป็นแหล่งน้ำจืดหรือทะเลสาบขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย มีความจุเก็บน้ำได้ประมาณ 33.84 ล้านลูก บาศก์เมตร และมีพื้นที่ประมาณ 20.53 ตารางกิโลเมตร เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ถูกล้อมรอบด้วยภูเขาทำให้มีลุ่มน้ำ 10 แห่งที่พัดพาตะกอนลงสู่กว๊านพะเยา ส่งผลให้เกิดการสะสมของดินตะกอนและทำให้กว๊านพะเยาเสื่อมโทรมในปี 2551-2557 มีการดูดตะกอนขึ้นมามากกว่า 290,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดิน

ดินมักมีคุณสมบัติไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน วิศวกรนิยมใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อ เพิ่มความเสถียรภาพและคุณสมบัติทาง

วิศวกรรม แบ่งเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ การปรับปรุงเชิงกล การปรับปรุงทางไฮดรอลิก การปรับปรุงด้วยการผสมสารเคมี และการปรับปรุงด้วยการเสริมกำลังมีหลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้เน้นที่ปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันทำให้เกิดซีเมนต์เจล ซึ่งจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินโดยการลดช่องว่างของเม็ดดิน การเชื่อม เม็ดดินเข้าด้วยกัน และการป้องกันการบวมตัวของดิน

2.3 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูน ซีเมนต์กับน้ำและเกิดเป็นสารเชื่อมประสาน เรียกว่า ซีเมนต์เหลว (Cement Gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบ ด้วยสารแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในสมบัติการแข็งตัวทั้งด้านระยะเวลาและความแข็งแรง [13]

2.4 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

Lambe et al. (1959) และ Moh (1962) กล่าวว่าเมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 อย่าง คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH),แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต(CAH)และปูนขาวไฮเดรตที่คายตัวออกมา (Released Hydrate Lime) กระบวนการดัง กล่าวส่งผลทำให้เกิดการแข็งตัวของสารประ กอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต(CAH) ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานทำให้เกิดการรวมตัวกันแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีความแข็งแรงเพิ่มตามายุบ่ม [11]

Herzog and Mitchell (1963) กล่าวว่าการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นการเกิด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นกระบวนการช่วงแรก และปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่ในเม็ดดินกับแคลเซียมไอออน (Calcium Ions) ที่เกิดจากปูนขาวไฮเดรตที่ คายออกมา (Released Hydrated Lime) จะเป็นกระบวน การทุติ ยภูมิที่ทำให้เกิดแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังอัดของดิน ซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุของการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักโดยทั่วไปว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน [8]

Pendola et al. (1969) สรุปกลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ว่า เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เคมี (Physical-Chemical) ระหว่างปูนซีเมนต์, น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วย 4 กลไก คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซี เมนต์(Hydration of Cement) เป็นกระบวนการ สำคัญที่สุด โดยจะเกิดขึ้นขณะที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดการประสานแน่นระหว่างเม็ดดินและก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมาก บ้างน้อยบ้างตามการคละของขนาดของดิน ทำให้เม็ดที่ไม่ถูกปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่าย ดังกล่าวนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุแล้วยังแทรกตัวระหว่างช่องว่างทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยน แปลง ความชื้นรอบๆ อีกด้วย

2.การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวก (Cat ion Exchange) เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวก (Cation) หรือเกิดการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้าบวก (Cation) บนผิวของเม็ดดินซึ่งเป็นสมบัติที่สังเกตได้จากการลดของค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ของดินประ เภทมีแรงยึดเกาะ (Choesive Soil) ที่มีความชื้นอยู่ผสมกับปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังจากผสมปูนซีเมนต์ซึ่งถือว่าเป็นปฏิกริยารองจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

3.ปฏิกิริยาคาร์บอเนต (Carbonation) เป็นกระบวนการเชื่อมแน่นจากที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับปูนขาว (Lime) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮรเดรชั้นของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) กับซิลิกาหรืออะลูมินาในดินทำให้เกิด สารประกอบแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกับในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแต่ปฏิกิริยานี้อาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

4.ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวอิสระ (Free Lime) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์กับซิลิกาหรืออะลูมินาในดินทำให้เกิดสารประสานแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกันในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแต่ปฏิกิริยานี้ต้องอาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลัง ของวัสดุเพิ่มขึ้น [12]

2.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินที่ผสมซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้เสนอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์ลงไปแล้ว แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ภายใต้การบดอัดขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement Hydration) ปูนซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน

2.ภายใต้การบ่มระยะสั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเกิดซีเมนต์เหลว (Cement Gel) เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินและ ปูนขาวที่ตายตัวออกมา (Released Lime) เริ่มเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ที่มีพลัง (Active Soil Silica) และอะลูมินาในดินที่มีพลัง (Active Soil Alumina) ในสารละลายจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของปฏิกิริยาของซิลิกาในดินและปฏิกิริยาของอะลูมินาในดินและผลของ ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแพร่ตามอนุภาคของดิน

3.ภายใต้การบ่มระยะยาวอนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดกระบวนการสเตรชันของปูนซีเมนต์อย่างสมบูรณ์มีผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น [10]

2.6 เถ้าไม้ยางพารา (para-wood ash)

เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเผาเศษไม้ ปีกไม้ และขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือทิ้งจากโรงเลื่อย โรงงานเฟอร์นิเจอร์โดยทำการเผาที่อุณหภูมิสูง (1,000 องศาเซลเซียส) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเถ้าจากการเผาที่เกิดขึ้นเรียกว่า “เถ้าลอย (fly ash)” ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80-85 ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด เถ้าชนิดนี้มีน้ำหนักเบาและมี ขนาดเล็กประมาณ 1-200 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ คือ ซิลิกอนออกไซด์(SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) เฟอร์ริกออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์(CaO) [3]

2.7 องค์ประกอบและปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าไม้ยางพารา

ดนุพลและจิรชาติ (2543) ได้ศึกษามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17% ซึ่งเป็นปริมาณมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้อง ผสมปูนขาว [1]

อภิสิทธิ์ (2547) กล่าวว่าปฏิกิริยาเคมีของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสาน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

1. ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange) เป็นปฏิกิริยาการแทนที่ของแคตไอออนซึ่งมีวาเลนซีสูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออนที่มีวาเลนซีต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น Ca^{2+} แทนที่ Na ที่มีอยู่ในดินทำให้อนุภาคของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผล ให้ดินมีสภาพดีขึ้นโดยมากมักเกิดจากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในสารปอซโซลานทำให้มี Ca^{2+} ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซีต่ำกว่าได้

2. ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคตไอออนจากเถ้าลอยที่เข้าไปในมวลดินและเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียวและเมื่อความเข้มข้นของไอออน สูงขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินซึ่งจะทำให้วงน้ำ (Double Layer) หดตัวแคบเข้า ทำให้อนุภาคดินเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของเม็ดดินรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

3. ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ ประกอบหลักของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ไฮโดริกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการ เชื่อมประสานขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังความ สัมพันธ์ข้างล่าง

$$Cao + H_2O \longrightarrow Ca(OH_2)$$
$$3Ca(OH)_2+2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$
$$3Ca(OH)_2+2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_33H_2O.$$

จากความสัมพันธ์ทางเคมีข้างต้นจะทำให้ได้สารประสานที่ดี จะต้องมีแคลเซียม ออกไซด์ (CaO) ปริมาณหนึ่ง ทำให้เกิดปฏิ กิริยาเคมีกับสารซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียม ออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [5]

2.8 งานวิจัยอื่นๆ

สันติ ชำตรี และคณะ (2014) จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าไม้ยางพาราพบว่ามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงมากเมื่อนำเถ้าไม้ยางพาราไปผสมกับคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตสามารถที่จะรับกาลังอัดได้สูงด้วย [4]

เทอดศักดิ์(2559),Kang and Weibin, (2018)ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อไหร่ก็ตามที่มีการเติมปูนซีเมนต์เข้าไปมากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดน้อยลง และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็จะลดลงตามไปด้วย [7],[9]

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาวิจัยนั้นประกอบด้วย ดินตะกอนกว๊านพะเยา ปูนซีเมนต์ และเถ้าไม้ยาง โดยตัวอย่างดินตะกอนได้จากการสูบจากท้องกว๊านพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าไม้ยางจากจากโรงไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าชีวมวลบริษัท ท่าฉาง กรีน เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสุราษฎร์ธานี ดังรูป ก ข ค



(ก) (ข) (ค)

รูป 1 (ก) ดินตะกอนกว๊านพะเยา (ข) ปูนซีเมนต์ (ค) เถ้าไม้ยาง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกว๊านพะเยา

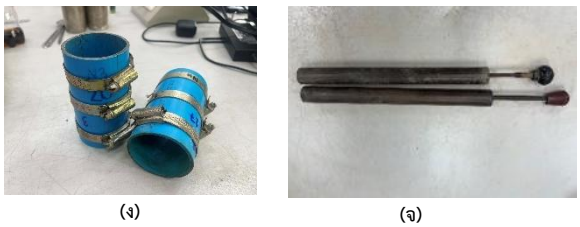
คุณสมบัติของดิน	ผลการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs)	2.71
ขีดจำกัดเหลว (LL)	42.60 %
ขีดจำกัดพลาสติก (PL)	23.46 %
ขีดจำกัดการหดตัว (SL)	19.52 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4	99.93 %
ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200	92.00 %
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	17.03 kN/m^3
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม	12.00 %
การจำแนกตามเกณฑ์ ASSHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ USCS	CL

ตารางที่ 2 ออกแบบส่วนผสมงานวิจัย

ส่วนผสม	ดินตะกอน (%) โดยน้ำหนักดิน	ซีเมนต์ (%) โดยน้ำหนักดิน	เถ้าไม้ยาง (%) โดยน้ำหนักดิน
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	75	5	15
C5F20	93	7	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

3.2 การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัด

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว มีการใช้ตัวอย่างในปริมาณมากและค่อนข้างใช้ทรัพยากรสำหรับทดสอบที่เยอะ ดังนั้นจึงมีการประดิษฐ์โมลทดสอบ PVC สำหรับตัวอย่างการทดสอบขึ้นมาด้วยการใช้ท่อ PVC ขนาด 2 in ทำเป็นโมล โดยการผ่าครึ่งตามแนวยาวของท่อ และกำหนดความสูงของโมล PVC นี้ให้มีอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเทียบกับความสูงเท่ากับ 1 ต่อ 2 ดังรูป ง เนื่องจากประดิษฐ์โมล PVC ขึ้นมาใหม่ทำให้การบดอัดไม่สามารถใช้ค้อนบดอัดทดสอบแบบเดิมได้ ดังนั้นจึงได้ทำการประดิษฐ์ค้อนบดอัดที่มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถนำมาใช้บดอัดให้เข้ากับโมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้ ดังรูป จ [2]



(ง) (จ)

รูป 2 (ง) โมลทดสอบ PVC (จ) ค้อนบดอัด

3.3 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

1. จัดเตรียมส่วนผสมโดยเตรียมดินตะกอนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าไม้ยางร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 100 ตามสัดส่วนที่คำนวณไว้

2. ผสมส่วนผสมเถ้าไม้ยาง ปูนซีเมนต์และดินตะกอนให้เข้ากัน เติมน้ำตามสัดส่วนโดยค่อยๆเติมและผสมให้เข้ากัน

3. นำส่วนผสมใส่โมล PVC ที่เตรียมไว้และทำการบดอัดโดยใช้ค้อนบดอัดแบ่งใส่ 3 ครั้ง เพื่อให้มีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ

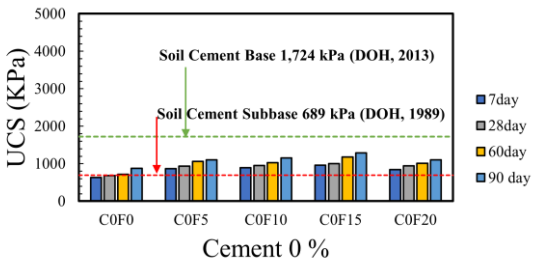
4. นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วเข้าบ่มในตู้อุณหภูมิ โดยแบ่งเป็นระยะเวลา 7 28 60 และ 90 วัน

บทที่ 4 ผลการทดสอบ

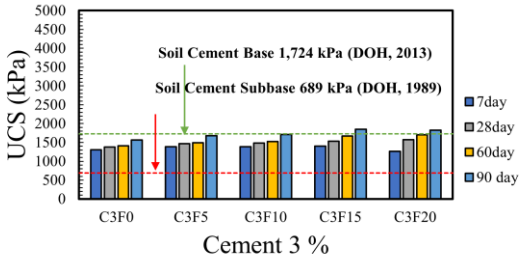
4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง พบว่า ค่า UCS จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซี เมนต์ที่ผสมเข้าไป ซึ่งการเพิ่มซีเมนต์เข้าไปจะทำดินตะกอนและซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงทำให้มีความสามารถในการรับแรงอัดแกนเดียวได้มากขึ้น [4] และการเพิ่มเถ้าไม้ยางจะส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวมากขึ้น ซึ่งมีค่า UCS มากกว่าซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าไม้ยาง เนื่องจากเถ้าไม้ยางมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก 58.17 % สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่จับตัวเป็นก้อนแข็งได้ [6] แต่หากเพิ่มเถ้าไม้ยางมากเกินไปค่า UCS จะลดลงเนื่องจากเถ้าไม้ยางมีสารประ กอบอัลคาไลน์ออกไซด์(Na2O,K2O) มาก จึงส่งผลให้ตัวอย่างดินทำปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของตัวดินทำให้การรับแรงอัดลดลง [4]

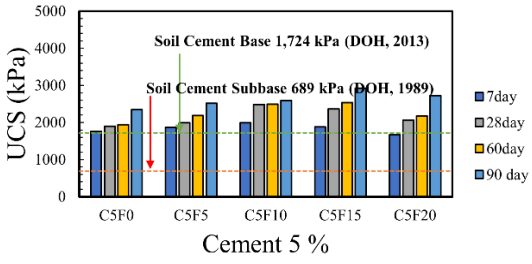
จากปัจจัยของอายุการบ่ม พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์จะเกิดขึ้นอย่างรวด เร็วในช่วง 28 วันแรก ค่า UCS จะเพิ่มสูงขึ้น และหลังจาก 28 วันหลังค่า USC จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าลง ตัวอย่างที่ผสมเถ้าไม้ยางจะมีการพัฒนาค่า USC หลังจาก 28 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคจากเถ้าไม้ยาง



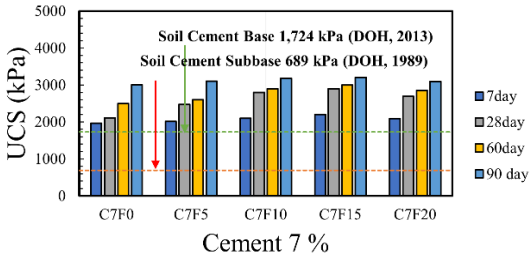
(a)



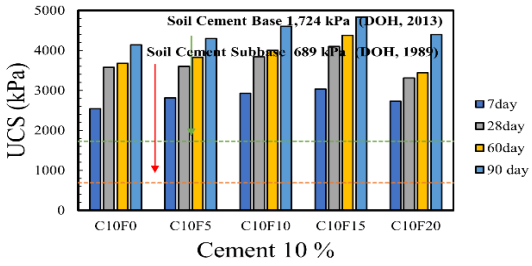
(b)



(c)



(d)



(e)

รูป 3 (a) (b) (c) (d) (e) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS (kPa) และ Cement 0 5 10 15 20 %

จากรูป (a) Cement 0% ดินตะกอนที่ไม่ผสมซีเมนต์(Cement 0%) ตัวอย่างการทดสอบในช่วงอายุการบ่ม 7 วัน พบว่าตัวอย่างที่ C0F0 ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 689 kPa แต่ตัวอย่าง C0F5,C0F10,C0F15 และC0F 20 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 689 kPa และทุกส่วนผสมยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นพื้นทางไม่น้อยกว่า 1,724 kPa ซึ่งพบว่าส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมากที่สุดคือ C0F15 ที่มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยาง 15% โดยน้ำหนักของดิน ที่อายุการบ่ม 7,28,60 และ 90 วัน ให้ค่ากำลัง957.34,1000.00,1179.57 และ 1290.68 kPa ตามลำดับ

จากรูป (b) Cement 3% ดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% และเถ้าไม้ยาง 5,10,15 และ 20 % ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างการทดสอบ C3 F0 C3F5 C3F10 C3F15 และC3F20 ผ่านเก ณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง และตัวอย่าง C3F15 และ C3F20ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นพื้นทาง ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีการผสมซีเมนต์เข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงทำให้มีความสามารถในการรับแรงอัดแกนเดียวได้มากขึ้น [4] ซึ่งค่ามากที่สุดคือตัวอย่าง C3F15 มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยาง 15% และปูนซีเมนต์ 3% โดยน้ำหนักของดิน ที่อายุการบ่ม 7 28 60 และ90 วัน ให้ค่ากำลัง 1406.21,1534.65, 16 69.05 และ1845.45 kPa ตามลำดับ แต่หากใส่ส่วนผสมเถ้าไม้ยางมากเกินไปจะทำให้ค่า UCS ลดลงเนื่องจากเถ้าไม้ยางมีสารประกอบ อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na2O,K2O) มาก จึงส่งผลให้ตัวอย่างดินทำปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของตัวดินทำให้การรับแรงอัดลดลง [4]

จากรูป (c) Cement 5% ดินตะกอนผสมซีเมนต์ 5% และเถ้าไม้ยาง 5 ,10,15 และ 20 % ตามลำดับ พบว่า ตัวอย่างการทดสอบ C5F0 C5F5 C5F10 C5F15 และC5F20 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นพื้นทาง ตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ 5% หากมีการเพิ่มเถ้าไม้ยางมากเกินไปจะทำให้การรับแรงอัดลดลง ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นพื้นทางคือตัวอย่าง C5F15 มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยาง 15% และปูนซีเมนต์ 5% โดยน้ำหนักของดิน ที่อายุการบ่ม7 28 60 และ 90 วัน ให้ค่ากำลัง 1990.00,2539.02,2650.00 และ2924.54 k Pa ตามลำดับ

จากรูป (d) Cement 7 % ดินตะกอนผสมซีเมนต์ 7% และเถ้าไม้ยาง 5,10,15 และ 20 % ตามลำดับ พบว่า ตัวอย่างการทดสอบ C7F0 C7F5 C7F10 C7F15 และC7F20 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นพื้นทาง ตัวอย่างที่ผสมเถ้าไม้ยาง C7F5 C7F10 C7F15 และ C7F20 มีค่า USC มากกว่าตัว อย่าง C7F0 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าไม้ยาง แต่จากในตัวอย่าง C7F20 ซีเมนต์ 7% เถ้าไม้ยาง 20 % พบว่ามีค่า USC ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์ก่อให้เกิดการขยายตัวของตัวดินทำให้การรับแรงอัดลดลง ตัวอย่างที่เหมาะสม คือ C7F15 มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยาง 15% และปูนซีเมนต์ 7% โดยน้ำหนักของดิน ที่อายุการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ให้ค่ากำลัง 2200.00 ,2900.00,3000.00 และ3200.00 kPa ตาม ลำดับ

จากรูป (e) Cement 10 % ดินตะกอนผสมซีเมนต์ 10 % และเถ้าไม้ยาง 5,10,15 และ 20 % ตามลำดับ พบว่า ตัวอย่างการทดสอบ C10F0 C10F5 C10F10 C10F15 และC10 F20 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของชั้นพื้นทาง จากตัวอย่าง C10F0 C10F5 C10F10 C10F15 และ C10F20 พบว่ามีค่า USC มากที่สุดจากการทดสอบทั้งหมด เนื่องจากมีการผสมปูนซีเมนต์ที่ 10 % ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในการทดสอบทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาไฮ

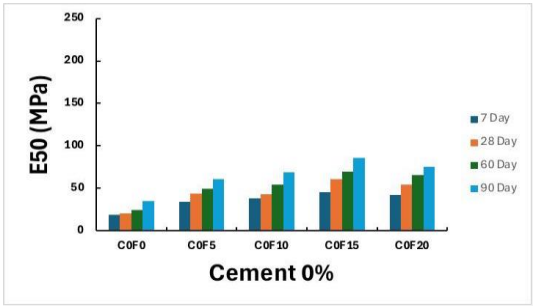
เดรชั่นมากขึ้น ปริมาณเถ้าไม้ยางที่เหมาะสมที่สุด คือ 15 % ในตัวอย่าง C10F15 เถ้าไม้ยาง 15% และปูนซีเมนต์ 10% โดยน้ำหนักของดิน ที่อายุการบ่ม 7,28,60 และ 90 วัน ให้ค่ากำลัง 3034.32 ,4100.12 ,4376.66 และ4832.93 k Pa ตามลำดับ

ดังนั้นตามสาเหตุที่ทำให้ค่า USC เพิ่มขึ้นเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่กระทำกับดินตะกอนส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงและเสถียรมากขึ้น การเพิ่มเถ้าไม้ยางเข้าไปผสมกับดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าช่วยเพิ่มค่า USC ด้วยเช่นกัน เนื่องจากในเถ้าไม้ยางมีสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ทำปฏิกิริยากับสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO2) และสารอลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) เป็นส่วนประกอบในเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ค่า USC จะมีค่าเปลี่ยนไปตามปริมาณส่วน ผสมและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม.

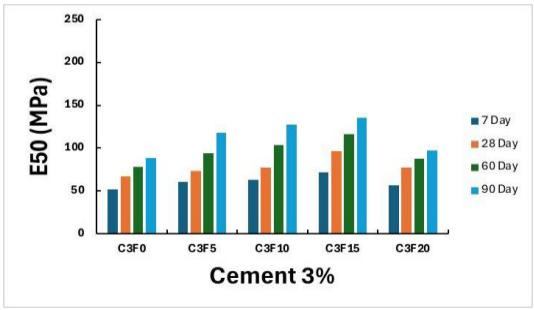
4.2 E50

ข้อมูลค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Moduluselastic at 50% of maximum compressive strength, E50) ที่ได้จากการทดสอบหาค่า UCS นั้นพบ ว่ามีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันกับค่า UCS โดยค่า E50 จะแปรผันตามปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางด้วยเช่นกัน โดยเมื่อใส่ปริมาณของปูนซีเมนต์หรือเถ้าไม้ยางลงไปในตัวอย่างดินตะกอนกว้านพะเยาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ก็จะทำให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นแล้วก็จะส่งผลไปถึงการพัฒนาเพิ่มขึ้นของค่า E50 ด้วยเช่นกัน โดยค่า E50 จะเพิ่มขึ้นแบบเดียวกันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวด้วย

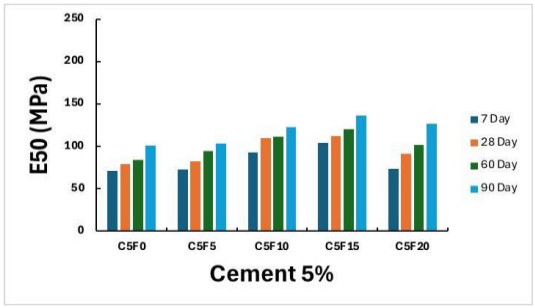
ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากกราฟ พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า E50 ในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันก็พบว่าค่า E50 นั้นก็มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงอายุการบ่มหลัง 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมค่า E50 และค่า UCS พบว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่า E50 มีค่ามากน้อยตามปริมาณของปูนซีเมนต์ ในส่วนปริมาณของเถ้าไม้ยางพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าไม้ยางจะอยู่ที่ 10-15% ของน้ำหนักดินที่ทำให้ค่า E50 มีค่าที่สูงที่สุดในแต่ละปริมาณของปูนซีเมนต์ โดยที่อายุการบ่มก่อน 28 วัน ปริมาณเถ้าไม้ยางที่ทำให้ค่า E50 มีค่าสูงที่สุดคือที่ 10% และอายุการบ่มที่หลัง 28 วัน ปริมาณเถ้าลอยที่ทำให้ค่า E50 มีค่าสูงที่สุดคือที่ 15% ซึ่งจะพบว่ามีความสอดคล้องเหมือนกับกับค่า UCS อย่างชัดเจน



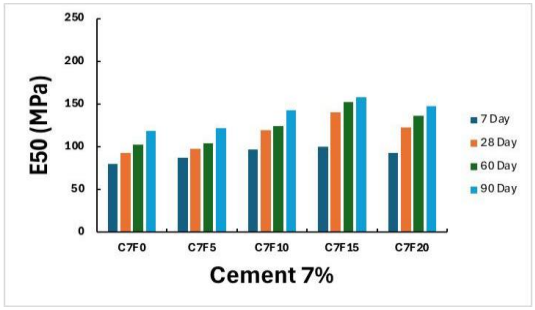
(1)



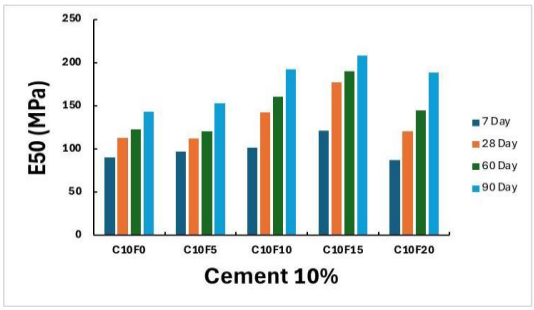
(2)



(3)



(4)



(5)

รูป 4 (1) (2) (3) (4) (5) ความสัมพันธ์ระหว่าง E50 (MPa) และ Cement 0 5 10 15 20%

Cement 0 % จากรูป (1) ที่อายุการบ่ม 7 ,28 ,60 และ 90 วัน พบว่า ช่วงอายุการบ่ม ที่ 7 ถึง 28 วัน มีค่า E50 น้อยตามปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง ซึ่งมีพฤติกรรมสอดคล้องกับ ค่า UCS ส่วนค่าอายุการบ่มที่ 60 ถึง 90 วัน มีปริมาณค่าสูง เนื่องจาก มีปริมาณเถ้าไม้ยางมากกว่า ส่วนปริมาณเถ้าไม้ยางที่เหมาะสมจะอยู่ ที่ 10-20 % ของน้ำหนักดินแห้ง ค่า E50 มีค่าสูงในแต่ละปริมาณของปูนซีเมนต์โดยอายุการบ่ม 60-90 วัน โดยปริมาณที่มีค่า E50 สูงสุดคือ 15 % หรือ C0F15 ซึ่ง มีวามคล้ายกันกับค่า UCS

Cement 3% จากรูป (2) ค่า E50 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน ภายใต้ปริมาณซีเมนต์ 3% ค่า E50 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับค่า UCS ที่มักเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุเซตตัวและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยางเพิ่มขึ้น ค่า E50 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าไม้ยาง ส่งผลให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยค่า E50 สูงสุดคือ 15% หรือ C3F15

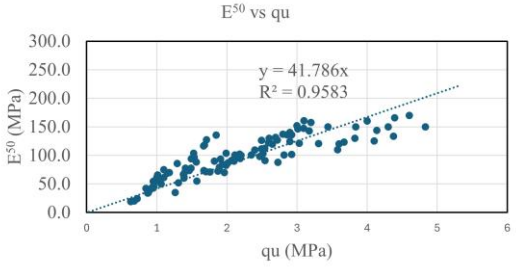
Cement 5 % จากรูป (3) ค่า E50 ในระยะเวลาการบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน E50 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ UCS โดยเมื่อวัสดุแข็งแรงขึ้น ค่า E50 และ UCS จะเพิ่มขึ้นพร้อมกัน เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง และค่า E50 เพิ่มขึ้นตามเวลา สอดคล้องกับพฤติ กรรมของ UCS ที่สูงขึ้นตามอายุการบ่ม

Cement 7% จากรูป (4) E50 ใน Cement 7% พบว่า ค่า E50 เพิ่มขึ้นตามเวลา (7 วัน - 90 วัน) ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุมีความแข็งแกร่งมากขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ การเติมเถ้าไม้ยาง จาก C7F0 - C7F20 มีผลทำให้ค่า E50 เปลี่ยนแปลง โดยค่า E50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ C7F10 และC7F15 ก่อนจะลดลงเล็ก น้อยที่ C7F20 ค่า E50 ใน Cement 7% สูงกว่าทั้ง Cement 3% และ 5% การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ช่วยเพิ่มกำลังวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของ UCS

Cement 10%ตากรูป (5) ค่า E50 (MPa) เพิ่มขึ้นตาม ระยะเวลาการบ่ม 7 - 90 วันซึ่งแสดงถึงการพัฒนาโครงสร้างของวัสดุเถ้าไม้ยาง E50 และ UCS มีความสัมพันธ์โดยตรง UCS ที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่ม E50 C10F10 และ C10F15 ให้ค่า E50 สูงสุด เป็นจุดที่วัสดุแข็งแรงที่สุด C10F20 มีค่า E50 ลดลง การเติมเถ้าไม้ยางมากเกินไปอาจลดความแข็งแรง Cement 10% ให้ค่า E50 สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มกำลังวัสดุ

4.3 E50 vs qu

จากกราฟนี้แสดงถึง ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Positive Linear Relationship) โดยระ หว่างตัวแปร qu (MPa) และ E50(MPa)

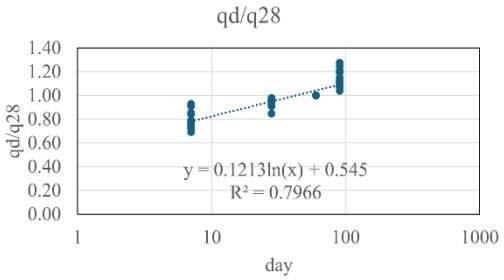


(1.1)

รูป 5 (1.1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E50 (MPa) และ qu (MPa)

อธิบายได้ว่า เมื่อ qu เพิ่มขึ้นทำให้ค่า E50 เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่า E50 ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งมีผลต่อค่า qu ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้น วัสดุจึงมีพฤติกรรมแข็งตัวตามอายุการบ่ม

4.4 qd/q28



(1.2)

รูป 6 (1.2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง qu/q28 และ day

แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจาก 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรกของช่วงการบ่มที่อายุ 7-28 วัน โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าช่วงหลังอายุการบ่มที่ 60-90 วัน ซึ่งผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับวัสดุที่มีปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น เถ้าไม้ยาง ที่มีปฏิกิริยาทางเคมีอย่างต่อเนื่องหลังจากอายุการบ่มที่ 28 วัน การใช้สมการนี้สามารถช่วย คาดการณ์กำลังรับแรงอัดในระยะยาวได้ หากค่า qd/q28 > 1.0 วัสดุยังพัฒนาความแข็งแรงต่อไปหลัง 28 วัน ซึ่งเป็นข้อดีของวัสดุที่มีการบ่มระยะยาว

บทสรุป

งานวิจัยการปรับปรุงสมบัติของดินตะกอนกว้านพะเยาด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าไม้ยาง พบว่า

1.กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) ของดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมเข้าไป โดยมีปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างดินตะกอนกับปูนซีเมนต์ส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้นและสามารถรับแรงอัดได้สูงขึ้น นอกจากนี้การเติมเถ้าไม้ยางยังช่วยเพิ่มค่า UCS เนื่องจากเถ้าไม้ยางมีปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยเสริมสร้างโครงสร้างของวัสดุให้แข็งแรงยิ่งขึ้น แต่หากเติมเถ้าไม้ยางในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ค่า UCS ลดลง เนื่องจากมีสารประกอบอัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O) ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของดิน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง

2.ระยะเวลาการบ่มมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด โดยค่า UCS มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 28 วันแรก เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ช้าลงหลังจาก

28 วัน ตัวอย่างที่มีการเติมเถ้าไม้ยางยังคงมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่อไปหลังจาก 28 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าไม้ยางที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.ค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (E50) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับค่า UCS โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางส่งผลให้ค่า E50 เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และยังพบว่าปริมาณเถ้าไม้ยางที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มค่า E50 อยู่ที่ 10-15% โดยน้ำหนักของดินแห้ง ปริมาณเถ้าไม้ยางที่ให้ค่า E50 สูงสุดในช่วงก่อน 28 วันอยู่ที่ 10% และหลัง 28 วันอยู่ที่ 15% ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า UCS

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และ E50 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกแบบเชิงเส้น คือ เมื่อค่า UCS เพิ่มขึ้น ค่า E50 ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของวัสดุที่มีความแข็งแรงและเสถียรมากขึ้น อีกทั้งผลการวิเคราะห์อัตราส่วน qd/q28 ยังแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน แต่ในอัตราที่ลดลงตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น เถ้าไม้ยาง ที่ยังคงมีปฏิกิริยาทางเคมีอย่างต่อเนื่องหลังจากอายุการบ่ม 28 วัน

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า การผสมปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยางสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดินตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า การเติมเถ้าไม้ยางในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความแข็งแรงของวัสดุ ในขณะเดียวกันก็ยังคงรักษาคุณสมบัติการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะยาว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในงานก่อสร้างที่ต้องการความคงทนและเสถียรภาพของวัสดุ

กิตติกรรมประกาศ

บทความเรื่อง การปรับปรุงดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าไม้ยาง สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะฯ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งบทความครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดีผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้
สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานบทความฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

อ้างอิง

[1] ดนุพล ดันนโยกาสและจิรชาติ เจ้าสินเจริญ.(2543).**ปูนสอผสมเถ้าลอยและเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา.**วารสารสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 489-500.

[2] ธัชชัย ใหม่ขันท์.(2560)**การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย.** วิทยานิพนธ์:วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา

[3] ปริญญาจินดาประเสริฐท.**เถ้าลอยในงาน คอนกรีต**.สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพมหานคร.หน้า 110, 2547

[4] สันติ ชำตรี, ปิติ จันทรูไทย และสราวุธ จริตงาม(2014). **การปรับปรุงคุณภาพดินโดยผสมเถ้าไม้ยางพารา.**

[5] อภิสิทธิ์ กล่ำเหม็ง.(2547).**พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของหินแกรนิตที่ปรับเสถียรภาพด้วยเถ้าลอยผสมซีเมนต์สำหรับวัสดุก่อสร้างทาง.**วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[6] อรุณ สุวรรณสุทร.(2552).**การปรับปรุงคุณสมบัติด้านธรณีเทคนิคของดินเหนียวอ่อนด้วยเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยาง.**วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาตร์บัณฑิต มหาลัยสงขานครินทร์.

[7] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ์.2559.**RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต RCA** .การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.125-134.

[8] Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963).**Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement.**Highway Research Record. No. 36. pp. 146-171.

[9] Kang, M. and Weibin,L.(2018).**Effect of the AggregateSize on Strength,Properties of Recycled Aggregate Concrete**,Advances in Materials Science and Engineering Journal, Volume 2018,Article ID 2428576, 8 pages.

[10] Mitchell, J.K. and EI Jack, S.A. (1966).**The Fabric of Soil-Cement and Its Formation.** Proceedings of 14" National Conference Clay and Clay Minerals. Vol. 26., pp. 297- 305.

[11] Moh, Z.C. (1962). **Soil Stabilization with Cement and Sodium Additive.** Journal of SMFD. Vol. 88., No. SM.6. pp.81-105.

[12] Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hudson, W.R. (1969). **Evaluation of Factors Affecing the Tensile Properties of Cement-Treated Materials.** University of Texas at Austin Research Report. Vol. 98, No. 3, 93 p.

[13] The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd.(2000)

พฤติกรรมด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

Strength and durability behavior of soft Bangkok clay stabilized by cement and graphene oxide

ก้องภพ คำน้อย[1] ณัฏฐณิชา แก้วทอง[2] โสภิตา เสือเมือง[3*] และ ธนกร ชมภูรัตน์[4]

[1,2,3] นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[4] รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64101507@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยการผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ดัชนีความเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาตรน้ำในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 และปริมาณกราฟีนออกไซด์ (GO) ตั้งแต่ 0.015 ถึง 0.1% โดยทำการหล่อตัวอย่างรูปร่างทรงกระบอก และบ่มที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ เป็นระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน หลังจากครบระยะเวลาการบ่ม นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มกราฟีนออกไซด์ในช่วง 0.015–0.025% ปรับปรุงกระบวนการไฮเดรชัน และสร้างผลึกมีความหนาแน่น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์เกิน 0.05% ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนการทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่า รอบการเปียกและแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเทียบกับสภาพปกติ เนื่องจากการบวมตัว และการหดตัวของดินทำให้เกิดรอยร้าวและลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ LI 1.3B/w_c0.4GO0.025 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด สุดท้ายนี้การศึกษาพบว่า การผสมกราฟีนออกไซด์ในดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, ปูนซีเมนต์, กราฟีนออกไซด์, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ความคงทนสภาวะเปียกสลับแห้ง

Abstract

This study aims to improve the quality of Bangkok soft clay by incorporating cement and graphene oxide (GO) and evaluating its strength and wetting and drying durability. The experimental variables include a liquidity index (LI) of 1.3 and 1.6, a binder-to-water content ratio (B/w_c) of 0.2 and 0.4, and GO concentrations ranging from 0.015% to 0.1%. Cylindrical specimens were cast and cured at laboratory temperature for 7, 14, 28, and 60 days before being subjected to unconfined compression test. The results indicate that adding GO within the range of 0.015–0.025% enhances the hydration process and improve the formation of dense crystalline structures, leading to increased compressive strength. However, GO concentrations exceeding 0.05% alter the crystalline structure, reducing compressive strength. Wetting and drying cycles, an increase in cycles results in strength reduction due to soil swelling and shrinkage, causing cracks and weakening particle bonding. The optimal mix was found to be LI 1.3B/w_c0.4GO0.025, which affected the highest compressive strength. Finally, this study demonstrates that incorporating GO into cement-stabilized clay can enhance the compressive strength and durability of Bangkok soft clay.

Keywords: soft Bangkok clay, cement, graphene oxide, unconfined compression strength, wetting and drying durability

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกรุงเทพฯ และเขตปริมณฑล มีปริมาณประชากรในพื้นที่มากถึง 5.6 ล้านคน [25] และนอกจากนี้ยังเป็นแหล่งรวมความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ แต่ประสบปัญหาด้านการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากบริเวณดังกล่าวนี้มีสภาพชั้นดินของพื้นที่เป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีชื่อเรียกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (soft Bangkok clay) เป็นดินเหนียวที่มีความยืดหยุ่นสูง อ่อนตัวมาก เนื่องจากปริมาณน้ำสูงใกล้เคียงกับขีดจำกัดของเหลว มีศักยภาพในการทรุดตัวสูง และมีกำลังรับแรงเฉือนโดยธรรมชาติต่ำ [3] ซึ่งดินเหนียวดังกล่าวครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ผิวดินลึกลงไปถึง 20 เมตร [4] ทำให้การก่อสร้างอาคารขนาดเล็กไปจนถึงอาคารขนาด

ใหญ่มีปัญหาด้านโครงสร้างฐานรากเป็นจำนวนมาก จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้ และเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับประชากรในพื้นที่

การวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในปัจจุบันเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย พบว่าวิธีการผสมลึก (deep mixing, DM) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วโลกรวมถึงในประเทศไทยด้วย โดยสารเคมีที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ (cement) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างฐานราก โดยดำเนินการเจาะลงไปในดินเหนียวอ่อน จากนั้นฉีดปูนซีเมนต์ลงไปในดิน ทำการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อน เพื่อใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดิน (soil cement column) [13] ส่วนการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมเข้ากับดินเหนียวและน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเรียกว่า ไฮเดรชัน (hydration) ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrated, CSH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrated, CAH) และ ปูนขาว (hydrated lime) ที่แยกตัวออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นสารเชื่อมยึดหลัก เรียกปฏิกิริยาว่า Cement Hydration [22] ปูนซีเมนต์ที่ผสมลงในดินเหนียวจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงแบกทานของดิน ความคงทนของดินเพิ่มขึ้น และการบวมตัว-การหดตัวจะลดลง [21] คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยวิธีการผสมลึกในห้องปฏิบัติการ

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคระดับนาโน จากงานวิจัยของ Lee et al. (2020) [8] กล่าวถึงความเป็นไปได้ของการใช้กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO) เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกำลังอัดของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ และสารเติมแต่งอื่นประกอบไปด้วย เถ้าลอย (fly ash, FA) ซิลิกาฟูม (silica fume, SF) นาโนซิลิกา (nano silica, NS) และตะกรันเหล็ก (ground granulated blast furnace slag, GGBS) พบว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากวัสดุผสมปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าสารเติมแต่งอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นประมาณ 10.6 ถึง 41.5% และจากการวิเคราะห์ปริมาตรช่องว่าง (Pore volume) ในมวลดิน พบว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยกราฟีนออกไซด์นี้มีปริมาตรช่องว่างน้อยกว่าสารเติมแต่งอื่น ดังนั้นคณะผู้วิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปในการใช้กราฟีนออกไซด์มาผสมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

ในงานวิจัยของ Chompoorat et al. (2022) [1] ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ (OPC) และเถ้าลอย (fly ash, FA) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test, UC) รวมไปถึงการศึกษาผลกระทบของรอบเปียกสลับแห้ง (wetting – drying cycle) 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 สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จากงานวิจัยพบว่า ผลลัพธ์ด้านกำลังที่ได้ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมาก เมื่อนำตัวอย่างไปสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ สาเหตุเกิดจากผลของการแตกร้าว เนื่องจากสภาวะการอบแห้งทำให้ตัวอย่างหดตัว ในขณะที่สภาวะการเปียกทำให้ตัวอย่างบวมตัว ดังนั้นไม่ว่าในส่วนผสมจะมีวัสดุเป็นปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยอย่างไร ค่ากำลังรับแรงอัด (q_u) จะได้รับผลกระทบจากจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ และกราฟีนออกไซด์ในสภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อประเมินผลด้านความคงทนของตัวอย่าง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมด้านกำลัง และความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ โดยการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) และการทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) โดยการนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงอัดในรอบที่ 1 3 และ 6

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ ในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฐานราก

1.2.2 เพื่อศึกษาความคงทนภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฐานราก

1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าวัสดุผสมเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างในอนาคต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯและกราฟีนออกไซด์ ในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยขอบเขตงานดังต่อไปนี้

1.3.1 ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ คือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบริเวณพื้นที่อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ และพื้นที่ใกล้เคียง ความลึกประมาณ 8 ถึง 18 เมตร

1.3.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (cement, C)

1.3.3 กราฟีนออกไซด์ที่ใช้คือ กราฟีนออกไซด์แบบผง (graphene nanoplatelet, GNP)

1.3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพประกอบไปด้วย การทดสอบขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limit and indices test) มาตรฐาน ASTM D 4318 และ ASTM D 427 การ ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (specific gravity test) มาตรฐาน ASTM D 854 และการหาขนาดคละเม็ดดิน (grain size analysis test) มาตรฐาน ASTM D 422-63

1.3.5 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1.3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ และกราฟีนออกไซด์ ประกอบด้วย

- อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) กราฟีนออกไซด์ (GO)
- ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6
- อัตราส่วนปริมาณกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1%

1.3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ และกราฟีนออกไซด์ ในสภาวะเปียกสลับแห้ง ประกอบด้วย

- อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) กราฟีนออกไซด์ (GO)
- ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6
- อัตราส่วนปริมาณกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1%

1.3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ และกราฟีนออกไซด์ 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 แล้วนำไปทดสอบแรงกดทางเดียว เฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ ในห้องปฏิบัติการมีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับดังต่อไปนี้

1.4.1 ได้ทราบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

1.4.2 ได้ทราบการสูญเสียด้านกำลังรับแรงอัด โดยทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

1.4.3 ส่งเสริมให้มีการนำกราฟีนออกไซด์มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างในอนาคตได้

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	พ.ศ. 2567							พ.ศ. 2568	
		มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ
1	ค้นคว้าศึกษางานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง									
2	ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์									
3	ออกแบบอัตราส่วนผสมสำหรับการทดสอบ จากนั้นเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสม ปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ แล้วขึ้นรูปตัวอย่าง									
4	ทดสอบกำลังรับแรงอัดทางเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ตามสัดส่วนผสมที่สภาวะปกติ									
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ									
6	สรุปผลการทดสอบ และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									

ระยะเวลาการดำเนินการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

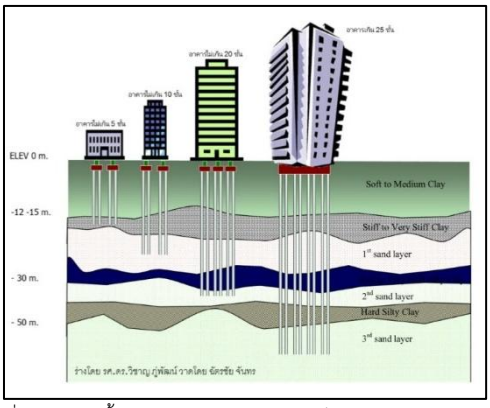
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดทำโครงงานนี้ ประกอบด้วยหกส่วนคือ

2.1.1 ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay)

ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) เป็นตะกอนชั้นบนที่พบในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง รวมถึงกรุงเทพและเขตปริมณฑล มีความหนาประมาณ 15-25 เมตร เนื่องจากเป็นดินชั้นบนสุดจึงมีส่วนเกี่ยวพันกับการดำรงชีวิตของคนในพื้นที่ราบภาคกลางตอนล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรุงเทพและเขตปริมณฑล ซึ่งมีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่มากมาย แต่ดินเหนียวกรุงเทพกลับมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่องานฐานรากเพราะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีน้ำหนักกดทับมากๆ จะบีบน้ำออกไปจากเนื้อดิน ทำให้เกิด

การหดตัวลงมากจนทำให้ฐานรากแตกร้าวเสียหาย ดังนั้น การออกแบบของวิศวกรจึงต้องระมัดระวังต่อเรื่องนี้เป็นอย่างยิ่ง ต้องศึกษาให้เข้าใจจึงสามารถออกแบบให้เหมาะสมได้ ชั้นตะกอนดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย ดังรูปที่ 1 [14]



รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินและความยาวของเสาเข็มของอาคารขนาดต่างๆ (สุทธิศักดิ์, 2556) [14]

2.1.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

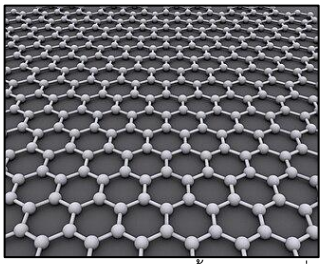
Lambe et al. (1959) [9] และ Moh (1962) [11] ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH CAH และการแพร่กระจายปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (released hydrate lime) กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH โดยสารทั้งสองจะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ ซึ่งสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง สำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (hydrated lime) ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (reaction product) จะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพส (cement paste) และจะแข็งตัวตามเวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวด้วย โดย Moh (1965) [12] ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้

Cement + H_2O	---------->	CSH + CAH + $Ca(OH)_2$
$Ca(OH)_2$	---------->	Ca^{++} + $2(OH)^-$
Ca^{++} + $2(OH)^-$ + SiO_2 (Soil silica)	---------->	CSH
Ca^{++} + 2 ($OH)^-$ + SiO_2 (Soil alumina)	---------->	CAH

ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะเปลี่ยนจากวัสดุประเภทที่มีความเป็นพลาสติก กลายเป็นวัสดุที่เปราะมากขึ้น ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะเกิดขึ้นที่ความเครียดต่ำ ความชื้นของดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลง ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของดินจะสูงขึ้น คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลานิค ระหว่างดิน น้ำ และซีเมนต์ที่ผสมเข้าไป [21]

2.1.3 กราฟีนออกไซด์ (GO)

กราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งเดิมเรียกว่าออกไซด์ของกราไฟต์ หรือกรดกราไฟต์ เป็นสารประกอบของคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่แปรผัน ซึ่งได้จากการบำบัดกราไฟต์ด้วยสารออกซิไดเซอร์ที่แรงและกรดเพื่อแยกโลหะส่วนเกิน กราฟีน (Graphene) หรือ แกรฟีน เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน เคียงข้างกับ เพชร กราไฟท์ ท่อนาโนคาร์บอน และฟูลเลอรีน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมรังผึ้งทั่วไป ดังรูปที่ 2 แกรฟีนสามารถอธิบายได้ว่า เป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟต์ที่เป็นชั้นๆ กราฟีนที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา (แกรฟีน ขนาด 1 ตารางเมตรมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัมเท่านั้น) เกือบโปร่งใส เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี มีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับวัสดุอื่นๆ และกับแสง กราฟีนอยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อนำไปใช้หลายอย่าง รวมถึง หน้าจอแสดงผล วงจรไฟฟ้า และเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีน้ำหนักเบา บาง ยืดหยุ่นแต่ยังคงทน เช่นเดียวกับการแพทย์ กระบวนการทางสารเคมีและอุตสาหกรรมต่างๆ [20]



รูปที่ 2 กราฟีนเป็นโครงสร้างตารางแบบรังผึ้งหนาเพียงหนึ่งอะตอมที่ประกอบขึ้นโดยการวางตัวของอะตอมของคาร์บอนหลายๆอะตอม (Wikipedia, n.d.) [20]

2.1.4 การทดสอบความคงทนของดินที่ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

จากการศึกษาของสัญฐิติ และคณะในปีพ.ศ. 2561 [23] ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง (wetting and drying) ด้วยการนำดินตะกอนขุดและเถ้าลอยมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลับแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM D559 ซึ่งจำลองสภาวะเปียกด้วยการแช่น้ำ 5 ชั่วโมง และสภาวะแห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 42 ชั่วโมง ทั้งหมด 6 รอบ จากนั้นนำรอบที่ 1 3 และ 6 มาทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และพบว่า ดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยมีความคงทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุง สรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยช่วยเพิ่มความคงทนของดินตะกอนขุด

และสามารถช่วยให้ดินมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้นในการเผชิญกับสภาวะที่เปียกสลับแห้งสลับกัน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ผลของแผ่นกราฟีนออกไซด์ของโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์

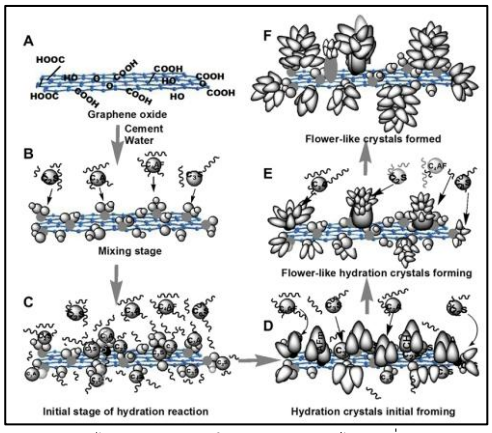
Lv et al. (2013) [10] ศึกษาผลกระทบของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ (GO) ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อเติม GO 0.03% ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 78.6% ความต้านทานการงอเพิ่มขึ้น 60.7% และกำลังอัดเพิ่มขึ้น 38.9% เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ทั่วไป และมีกลไกการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการใช้กราฟีนออกไซด์ (GO) ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นของซีเมนต์ โดยกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนจำนวนมากบนพื้นผิวของ GO เช่น กลุ่มไฮดรอกซี (OH) ทำปฏิกิริยากับ C_3S, C_2S และ C_3A ในปูนซีเมนต์ ควบคุมการก่อตัวของผลึกไฮเดรชันผ่านเอฟเฟกต์เทมเพลต (Template Effect) โดยมี PC (Plasticizer) ช่วยชะลอปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ GO และช่วยให้ GO มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงผลึกไฮเดรชันให้เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 3 ส่งผลให้วัสดุแข็งแรงขึ้น และอาจมีการนำไปใช้ปรับปรุงความเหนียวของปูนซีเมนต์ในอนาคต

2.2.2 คุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุผสมซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

จากงานวิจัยเรื่องความแข็งแรงของวัสดุผสมซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ Chintalapudia et al. ในปี ค.ศ. 2020 [2] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติคอนกรีตที่เติมกราฟีนออกไซด์ในอัตราต่างๆ (0.01% - 0.05% ของน้ำหนักซีเมนต์) พบว่าการเพิ่มกราฟีนออกไซด์ (GO) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยการใช้ GO ในปริมาณ 0.02% และ 0.03% ทำให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 28.5% และ 46.4% ตามลำดับ ภายใน 28 วันของการบ่ม ซึ่งเกิดจากการให้ความชื้นที่สูงขึ้นและการมีอยู่ของแคลเซียมเมตาซิลิเกต (Metasilicate, $CaSiO_3$) ที่มีลักษณะเป็นผลึกและเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของส่วนผสมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกราฟีนออกไซด์ในปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.3 ผลของกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติการไหลของปูนซีเมนต์

Yu et al. (2015) [16] ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการวิจัยนี้ ซิลิกาฟูม (SF) ถูกใช้เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูม (SF) และกราฟีนออกไซด์ที่ห่อหุ้มซิลิกาฟูม (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 แผนผังกลไกการเจริญเติบโตของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นผ่านการควบคุมของ GO บนผลึกไฮเดรชั่นของซีเมนต์ Lv et al. (2013) [10]

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

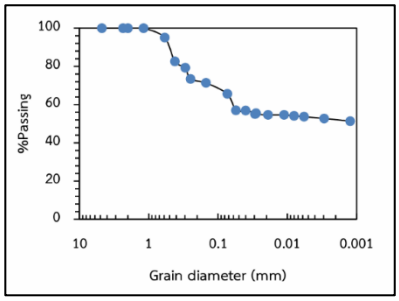
ในงานวิจัยนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ กราฟีน และสารลดน้ำพิเศษ (Plasticizer, PS) โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ จากพื้นที่อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งมีความลึกประมาณ 8 ถึง 18 เมตร และพื้นที่ใกล้เคียง ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกราฟีนออกไซด์ที่ใช้เป็นแบบผงชื่อว่า Graphene Nanoplatelets (GNP) และขนาดคละของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังแสดงในรูปที่ 4 รูปวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ดังที่แสดงในรูปที่ 5

3.2 การสังเคราะห์กราฟีน

เริ่มต้นชั่งน้ำ 500 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (รูปที่ 6a) ต่อมาชั่งกราฟีนและสารลดน้ำพิเศษ (PS) ปริมาณ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ แล้วผสม PS กับน้ำและคนให้เข้ากัน (รูปที่ 6b) ตามด้วยเติมผงกราฟีนและคนด้วยมือ (รูปที่ 6c) นำสารผสมใส่เครื่องคนสารแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) และนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงไป ปิดฝาด้วยแผ่นพลาสติก และทำการคนสารที่ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 6d) หลังจากนั้นนำไปผ่านเครื่องสั่นสะเทือนอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner) กำลังไฟ 220 วัตต์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (รูปที่ 6e) จากนั้นจะได้กราฟีนในรูปของเหลวพร้อมใช้สำหรับการนำไปผสมตัวอย่าง (รูปที่ 6f)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

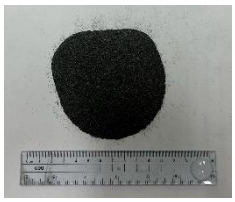
คุณสมบัติของดิน	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	2.64
ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)	77.80 %
ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)	35.78 %
ขีดจำกัดแห้ง (shrinkage limit)	16 %
ดัชนีพลาสติก (plastic index)	42.02 %
ดัชนีเหลว (liquid limit)	0.63
ปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content)	62.24 %
หน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight)	10.36 kN/m^3
เปอร์เซ็นต์การร่อนตะแกรงผ่านเบอร์ 200	56.98 %
การจำแนกประเภทดิน (soil classification, USCS)	CH



รูปที่ 4 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ


(a)


(b)


(c)


(d)

รูปที่ 5 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (a) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (b) ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ ประเภท 1 (c) ผงกราฟีนออกไซด์ และ (d) PC (Plasticizer)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อหาค่ากำลังแรงอัดของวัสดุผสม จากดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ โดยการเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้ง นำมาบดเป็นผง แล้วผสมกับปูนซีเมนต์ จากนั้นเติมกราฟีนในรูปแบบของเหลวและน้ำผสมให้เข้ากัน จากนั้นหล่อในท่อ PVC เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 3.7 × 7.6 ซม. ห่อด้วยพลาสติกและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน หลังจากบ่ม วัดขนาดตัวอย่างแล้วทดสอบในเครื่องกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลลัพธ์ที่ได้ค่า q_u คำนวณจากแรงอัดสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งช่วยประเมินความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุผสม และยืนยันคุณภาพของดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว


(a)


(b)


(c)


(d)


(e)


(f)

รูปที่ 6 การสังเคราะห์กราฟีน (a) เตรียมส่วนผสม (b) ผสมน้ำกับพลาสติกไซเซอร์คนด้วยมือให้เข้ากัน (c) เทผงกราฟีนออกไซด์ลงไปคนให้เข้ากัน (d) นำส่วนผสมไปใส่เครื่องคนสารแม่เหล็ก (e) หลังจากครบ 24 ชั่วโมง นำส่วนผสมมาใส่ในเครื่องสั่นสะเทือนด้วยอัลตราโซนิค และ (f) กราฟีนในรูปแบบของเหลวที่พร้อมใช้สำหรับการนำไปผสมตัวอย่าง

3.3.2 การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability) ตามมาตรฐาน ASTM D559 มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการสูญเสียค่ากำลังของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ โดยนำดินเหนียวอบแห้งมาบดเป็นผง ผสมกราฟีนในรูปแบบเหลวและน้ำ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นหล่อในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.7 ซม. และสูง 7.6 ซม. บ่มในอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 7 14 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 3.2 ตารางการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และกราฟีน

ลำดับที่	ดัชนีเหลว (LI)	C/w_c	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์กราฟีนต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (GO)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว			
				บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
1	1.3 (90.41)	0.2	0	✓	✓	✓	✓
2			0.015	✓	✓	✓	✓
3			0.025	✓	✓	✓	✓
4			0.05	✓	✓	✓	✓
5			0.075	✓	✓	✓	✓
6			0.1	✓	✓	✓	✓
7	1.6 (103.01)	0.4	0	✓	✓	✓	✓
8			0.015	✓	✓	✓	✓
9			0.025	✓	✓	✓	✓
10			0.05	✓	✓	✓	✓
11			0.075	✓	✓	✓	✓
12			0.1	✓	✓	✓	✓

ตารางที่ 3.3 ตารางการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนผสม ปูนซีเมนต์ และกราฟีน

ลำดับที่	ดัชนีเหลว (LI)	C/w_c	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์กราฟีนต่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ (GO)	การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง								
				บ่ม 7 วัน			บ่ม 28 วัน			บ่ม 60 วัน		
				รอบที่			รอบที่			รอบที่		
				1	3	6	1	3	6	1	3	6
1	1.3 (90.41)	0.2	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2			0.025	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3			0.05	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4			0.075	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5			0.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	1.6 (103.01)	0.4	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7			0.025	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8			0.05	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9			0.075	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10			0.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (soft Bangkok clay) กำลังได้รับความนิยมมากเนื่องจากสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำไปใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้ ในทางตรงกันข้ามดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เป็นดินเหนียวที่มีความยืดหยุ่นสูง อ่อนตัวมาก เนื่องจากปริมาณน้ำสูงใกล้เคียงกับขีดจำกัดของเหลวมีศักยภาพในการทรุดตัวสูงและมีกำลังรับแรงเฉือนโดยธรรมชาติต่ำ [3] ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้างฐานรากได้โดยตรง

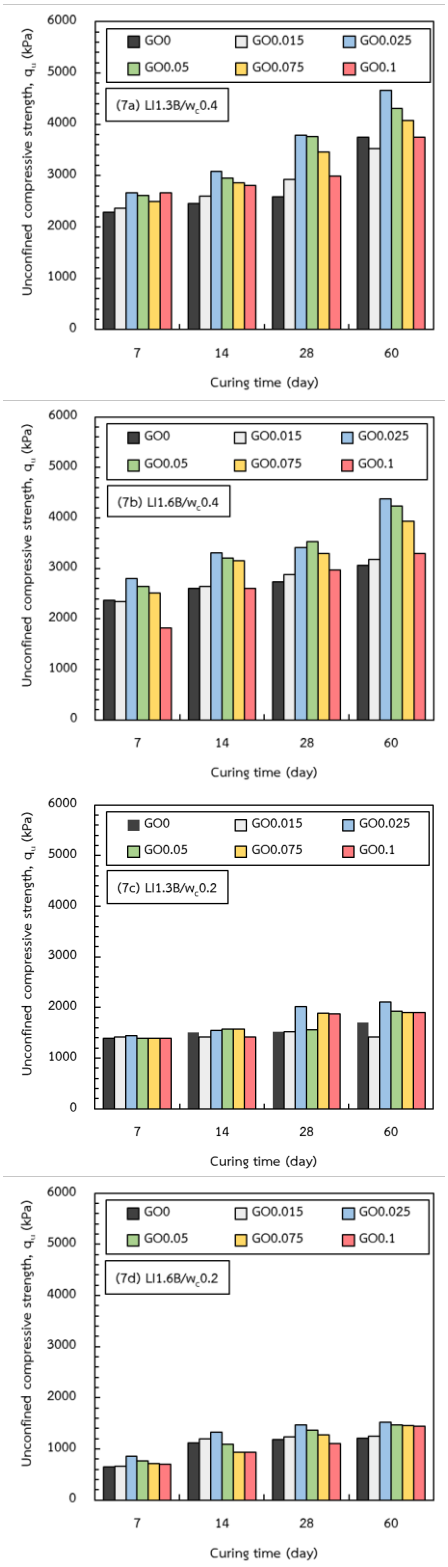
การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (C) และกราฟีนออกไซด์ (GO) โดยใช้อัตราส่วนผสมปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาตรในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 ใช้ดัชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 ปริมาณกราฟีนออกไซด์ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1% สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test, UC) ซึ่งบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 14 28 และ 60 วัน ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ UC ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ดังรูป 7a ถึง 7d จากผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสม LI ท่ากับ1.3 B/w_c เท่ากับ 0.4 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.025% (LI1.3B/w_c 0.4GO0.025) เป็นค่ามากที่สุด ดังรูป 7a ในอายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2612.235 kPa อายุการบ่มตัว 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 3784.196 kPa และอายุการบ่มตัว 60 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามีค่าเท่ากับ 4659.850 kPa ในทางตรงกันข้าม ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 B/w_c เท่ากับ 0.2 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.1% (LI1.6B/w_c 0.2GO0.1) เป็นค่าน้อยที่สุด ดังรูป 7d อายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 705.211 kPa อายุการบ่มตัว 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดค่าเท่ากับ 927.544 kPa อายุการบ่มตัว 60 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดค่าเท่ากับ 1440.109 kPa จะสังเกตได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่มตัว ผลการทดสอบเป็นไปทิศทางเดียวกับวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) [15] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับทดสอบคุณสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนผสมเถ้าลอย และวิจัยของ S.Kolias et al. (2005) [7] งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสภาพดินเหนียวด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์

นอกจากนี้ผลการทดสอบที่อายุการบ่มตัวเดียวกันพบว่า ปริมาณกราฟีนออกไซด์จาก 0.015 – 0.025% มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในมวลดิน มีผลกระทบที่สำคัญต่อการสร้างผลึก แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต,CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์,$CA(OH)_2$ ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์จะช่วยปรับปรุงกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของวัสดุ ส่งผลให้การสร้างผลึกดังกล่าวมีความหนาแน่นและมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lv et al. (2013) [10] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์ การสร้างผลึกไฮเดรชั่นร่วมกับกราฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อย ทำให้ได้ผลึกไฮเดรชั่นมีควาหนาแน่นและมีความแข็งแรงคล้ายรูปดอกไม้ เมื่อส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 B/w_c เท่ากับ 0.4 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.025% (LI1.3B/w_c 0.4GO0.025) ในอายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 3784.196 kPa ซึ่งเป็นส่วนผสมของปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ได้ดีและสม่ำเสมอส่งผลให้การกระจายตัวของผลึกมีความหนาแน่นสูงขึ้น โดยผลึกที่กระจายตัวได้ดีจะมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลต่างๆ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น [10] เมื่อเทียบกับปริมาณกราฟีน

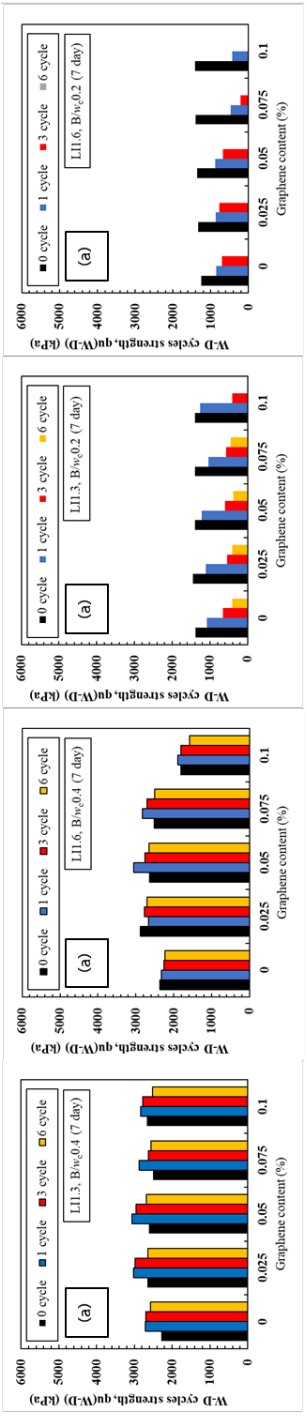
ออกไซด์จาก 0.050 – 0.1% พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ในส่วนผสมนี้ทำให้รูปร่างของผลึกไฮเดรชันเปลี่ยนแปลงไป แต่ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 B/w_c เท่ากับ 0.2 ปริมาณกราฟีนเท่ากับ 0.1% (LI1.6B/w_c 0.2GO0.1) ในอายุการบ่มตัว 7 วัน มีค่าการบ่มตัวมีค่าเท่ากับ 705.211 kPa ได้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับรูปหลายเหลี่ยมผิดปกติที่เกาะติดกัน ซึ่งแตกต่างจากผลึกที่มีลักษณะคล้ายดอกไม้ที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยมไม่สมมาตรและแตกออกได้ง่าย ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวในวัสดุ ส่งผลให้ความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุลดลง โดยการกระจายตัวของผลึกที่ผิดปกติจะไม่สามารถเสริมความแข็งแรงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเทียบกับการก่อตัวของผลึกไฮเดรชั่นที่คล้ายดอกไม้เหมือนกับการใส่ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมในวัสดุ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Lv et al. (2013) [10] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์

4.2 ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ข้อจำกัดด้านคุณสมบัติดิน ข้อจำกัดด้านความสามารถในการรับน้ำหนัก รวมไปถึงปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฉับพลัน ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงนำดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ มาปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมกราฟีนออกไซด์เพื่อทดสอบความคงทนของวัสดุ โดยวิธีเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) เพื่อจำลองสภาวะจริงในการใช้งาน โดยการทดสอบความคงทนโดยวิธีเปียกสลับแห้ง จะใช้อัตตราส่วนผสมปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำในมวลดิน (B/w_c) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 ใช้ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนปริมาณกราฟีนออกไซด์ เท่ากับ 0.015 0.025 0.050 0.075 และ 0.1% และอายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแห้ง นับเป็น 1 รอบของการจำลองสภาวะเปียกสลับแห้ง ทำทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6 จากการทดสอบพบว่ายิ่งระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในการทดสอบรอบที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงที่ 1, 1 และ 8% ตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ในการทดสอบรอบที่ 3 กำลังรับแรงอัดจะลดลงที่ 11, 8 และ 11% ตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และในการทดสอบรอบที่ 6 กำลังรับแรงอัดจะลดลงที่ 22, 25 และ 20% ตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดในสภาพปกติ ดังรูปที่ 14 ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ดังรูปที่ 10-13 เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวจะเกิดการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำในสภาวะเปียก ซึ่งน้ำจะซึมเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในดิน เมื่อน้ำในดินระเหยออกในช่วงสภาวะแห้ง อนุภาคดินเหนียวจะหดตัวจากการสูญเสียน้ำ กระบวนการนี้ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ขยายตัวขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผล



รูปที่ 7 ผลกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเทียบกับอายุการบ่มตัวตามปริมาณกราฟีนออกไซด์ 0-0.1%
(a) LI1.3B/w_c0.4, (b) LI1.6B/w_c0.4, (c) LI1.3B/w_c0.2 และ (d) LI1.6B/w_c0.2

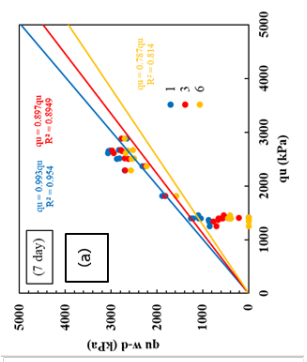


รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณกราฟีนออกไซด์ของส่วนผสม L11.3B/w_c0.4 (a) = 7 วัน, (b) = 28 วัน, (c) = 60 วัน

รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณกราฟีนออกไซด์ของส่วนผสม L11.6B/w_c0.4 (a) = 7 วัน, (b) = 28 วัน, (c) = 60 วัน

รูปที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณกราฟีนออกไซด์ของส่วนผสม L11.3B/w_c0.2 (a) = 7 วัน, (b) = 28 วัน, (c) = 60 วัน

รูปที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งต่อปริมาณกราฟีนออกไซด์ของส่วนผสม L11.6B/w_c0.2 (a) = 7 วัน, (b) = 28 วัน, (c) = 60 วัน



รูปที่ 14 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดต่อสภาวะเปียกสลับแห้งเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดในสภาพปกติ (a) = 7 วัน, (b) = 28 วัน, (c) = 60 วัน

ให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินลดลงและความแข็งแรงของดินก็จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของพีรพงษ์และคณะ (2561) [19] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง และงานวิจัยของ สัญฐิติ และคณะ (2561) [23] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของดินตะกอนปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุทาง

ในส่วนของการเพิ่มปริมาณกราฟีนออกไซด์ ในดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนออกไซด์ พบว่าที่ปริมาณกราฟีนออกไซด์ 0.050% ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ในส่วนผสม LI1.3,B/w_c0.4 ที่ระยะเวลาการบ่มตัว 60 วัน รอบที่ 1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของสิทธิอวิรุทธ์ และคณะ (2561) [24] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมของกำลังของดินเหนียวบวมตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและซีเมนต์ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า q_u ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ระยะเวลาการบ่ม และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และอีกปัจจัยที่มีผล คือ กราฟีนเกิดการกระจุกตัว ทำให้กราฟีนกระจายตัวไม่ทั่วถึงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง จึงเป็นเหตุให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย และเมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งทำให้น้ำซึมเข้าไปในมวลดิน ทำให้โครงสร้างในมวลดินบางจุดอ่อนตัวลง ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Lv et al. (2013) [10] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีส่วนผสมเป็นปูนซีเมนต์

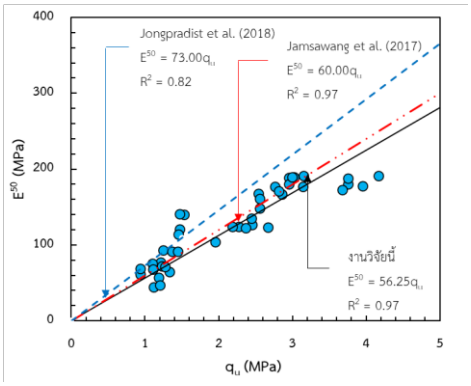
ข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุการบ่มตัวต้นที่ 7 28 และ 60 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดบางส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น บางส่วนผสมมีค่าลดลง เพราะค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงระยะการบ่มตัวต้นมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังไม่สิ้นสุด ในการทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งในช่วงอายุการบ่มตัว 7 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 14 จากการผสมปูนซีเมนต์และน้ำ เมื่อผ่านสภาวะเปียกในรอบที่ 1 และ 3 ทำให้เกิดการบ่มตัว ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของฆนากานต์ และคณะ (2563) [17] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในสภาวะเปียกสลับแห้งในรอบที่ 3 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อผ่านสภาวะแห้งการบ่มตัวจึงหยุดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง เนื่องจากการทดสอบสภาวะแห้ง อนุภาคดินจะหดตัวลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนในวัสดุ ส่งผลให้โครงสร้างภายในวัสดุเปลี่ยนแปลง โดยช่องว่างภายในวัสดุจะเพิ่มขึ้นทำให้น้ำซึมเข้าไปในวัสดุได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุ ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของศรีชาติ และคณะ (2565) [18] ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ลดลง เมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง เนื่องจากการผุกร่อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ซึ่งส่งผลให้ช่องว่างเพิ่มขึ้นและการซึมผ่านของน้ำมากขึ้น

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) [5] ที่มีอัตราส่วนผสมของดินเหนียวกับขี้เถ้าแกลบ เพื่อเติมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ค่าที่คำนวณได้คือ $E^{50} = 60.00q_u$(MPa) และ $R^2 = 0.97$ และ Jongpradit et al. (2018) [6] โดยอัตราส่วนผสมของงานวิจัยจะมีเถ้าชานอ้อย เป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงในองค์ประกอบทางเคมี โดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบางส่วน และผสมกับดินเหนียวอ่อนเพื่อสร้างดินเหนียวอ่อนที่ผสมปูนซีเมนต์มาแสดงในกราฟ ซึ่งค่าคำนวณที่ได้คือ $E^{50} = 73.00q_u$(MPa) และ $R^2 = 0.82$ เมื่อนำมาใส่ในกราฟเพื่อเทียบค่า พบว่า ค่าคำนวณที่ได้ในกราฟดังสมการที่ (1) ของงานวิจัยนี้มีค่าแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jamsawang et al. (2017) [5] ที่นำมาเทียบ

$$E^{50} = 56.25q_u \text{ (MPa) และ ค่า } R^2 = 0.97 \qquad (1)$$

โดยที่ E^{50} = โมดูลัสยืนหยุ่น (MPa)
q_u = ค่ารับกำลังรับแรงอัด (MPa)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E^{50} และ q_u ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

4.4 การพัฒนากำลังและระยะเวลาการบ่มตัว เมื่อเทียบกับกำลังที่ 28 วัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังและระยะเวลาการบ่มตัวเมื่อเทียบกับกำลังที่ 28 วัน (q_{uD}/q_{u28D}) และระยะเวลาการบ่มตัว (day) ได้เป็นสมการฟังก์ชันของ ln ดังสมการที่ (2) และ $R^2 = 0.80$ ซึ่งได้มาจากการคำนวณและเลือกค่าออกมา เมื่อนำค่าสมการที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้

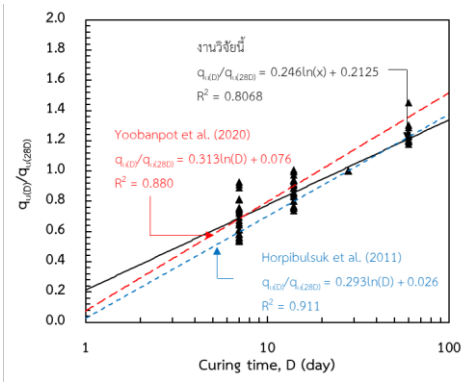
มาเทียบกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) [15] โดยมีอัตราส่วนผสมของตะกอนที่ขุดลอกออกมาซึ่งปรับเสถียรด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เมื่อคำนวณค่าสมการออกมาจะอยู่ที่ 0.313ln(D) + 0.076 และค่า R^2 = 0.88 และ Horpibulsuk et al. (2011)a [3] ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของดินเหนียว-น้ำ/ปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ เมื่อคำนวณออกมาค่าสมการอยู่ที่ q_{uD}/q_{u28D} = 0.293ln(D) + 0.026 และ R^2 = 0.91 มีความใกล้เคียงกันสูงมาก จึงได้นำค่าสมการที่คำนวณได้มาแสดงดังรูปที่ 8

$$q_{uD}/q_{u28D} = 0.246\ln(D) + 0.2125 \text{ และ } R^2 = 0.80 \qquad (2)$$

โดยที่

q_{uD} = ค่ารับกำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียวหลังจาก D วันของการบ่ม

q_{u28D} = ค่ากำลังที่ 28 วัน และ D คือระยะเวลาในการบ่มเป็นวัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q_{u(D)}/q_{u(28D)}$ และ Curing time, D (day) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า

1. การเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของดิน เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีส่วนช่วยในการเสริมโครงสร้างภายในของวัสดุ ทำให้เนื้อวัสดุมีความแน่นและแข็งแรงขึ้น

2. เมื่อนำวัสดุไปทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในที่เกิดจาก การบวมตัวและหดตัวของดิน ทำให้เกิดรูพรุนและรอยแตกร้าวทำให้โครงสร้างของวัสดุอ่อนแอลง

3. ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดในดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ คือ กราฟีนออกไซด์ 0.025%

4. กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และการใช้กราฟีนออกไซด์ยังสามารถช่วยลดต้นทุน แต่วัสดุนี้ยังมีปัญหาเรื่องความทนทานต่อสภาพเปียกสลับแห้งที่ต้องแก้ไข เพื่อให้ใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง พฤติกรรมด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และกราฟีนออกไซด์ เพื่อการสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาปริญญาตรีสามารถดำเนินงานจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะนำ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จัดสรรงบประมาณสนับสนุนโครงงานการวิจัย ปีการศึกษา 2567 สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] Chintalapudia K and Pannem R. (2020). Strength properties of graphene oxide cement composites. *Materials Today: Proceedings*, 45(4), pp.3971-3975.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., & Karahalios, A. (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, *27*(2), 301-313.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Moh, Z. C. (1962). Soil stabilization with cement and sodium additives. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(6), pp.81-105.

[12] Moh, Z. C. (1965). Reactions of soil minerals with cement and chemicals. *Highway Research Record*, (86).

[13] Suksiripattanapong C, Sakdinakorn R, Tiyasangthong R, Wonglakorn N, Phetchuay C and Tabyang W. (2022). Properties of soft Bangkok clay stabilized with cement and fly ash geopolymer for deep mixing application. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01081.

[14] Thitinan Micropile. (2020). สุทธิศักดิ์, ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Bangkok clay), (2556).
Retrieved from https://www.thitinan.co.th/bangkok-clay

[15] 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.

[16] Yu S, 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.

[17] ฆนากานต์ มาศโอสถ, พานิช วุฒิพฤกษ์, อิทธิพล มีผล, สยาม แกมขุนทด และ ศิริศักดิ์ คงสมศักดิ์สกุล (2563). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยจีโอโพลิเมอร์ดินขาว-เถ้าแกลบกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 4

[18] ชินวัตร ศรีชาติ และดลฤดี หอมดี (2565). ผลกระทบของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย. วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 31-33.

[19] พีรพงษ์ สิมารตัน์, พิทยา แจ่มสว่าง, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต และ กมลวัลย์ ลือประเสริฐ (2561). การปรบัปรุงคุณภาพตะกอนดินขุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง : กรณีศึกษาเขื่อนแม่สาบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23, นครนายก, 18-20 กรกฎาคม 2561, หน้า 6.

[20] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี (2568). **แก**รฟีน (Graphene).
Retrieved from https://th.wikipedia.org/wiki/แกรฟีน

[21] ศุภกิจ นนทนานันท์ และกมล อมรฟ้า (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า 120-125.

[22] สมพร มั่นใจ (2559). การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของ เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, หน้า 17-18.

[23] สัญฐิติ เจริญศิลป์, พิทยา แจ่มสว่าง, เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต. (2561). การปรบัปรุงคุณภาพตะกอนดินขุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23, นครนายก, 18-20 กรกฎาคม 2561, หน้า 1-3.

[24] สิทธิอวิรุทธ์, สุวิจักขณ์, (2561). การสำรวจโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมกำลังของดินเหนียวบวมตัวที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวและซีเมนต์. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 3353.

[25] สำนักทะเบียนกลาง (2563). จำนวนราษฎรทั่วราชอาณาจักร ตามหลักฐานการทะเบียนราษฎร.
Retrieved from https://stat.bora.dopa.go.th/stat/pk/pk_63.pdf

การปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน

Improvement of Sediment Soil with Geopolymer from Palm Oil Fuel Ash

เปรมยุดา ศิริสาร[1*] นรีนุช แก่นใจ[2,] สุภกิณห์ แก่นนาค[3,] ศฤงคาร นาคสินธุ์[4,] และ รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์[5]

[1,2,3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: 64101934@up.ac.th*

บทคัดย่อ

กว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญในภาคเหนือของประเทศไทยแต่กำลังเผชิญปัญหาการตื้นเขินจากการสะสมของดินตะกอน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำ กรมชลประทานได้ดำเนินการขุดลอกดินตะกอนเป็นประจำทุกปีอย่างไรก็ตามดินตะกอนยังไม่ได้ถูกนำมาใประโยชน์อย่างคุ้มค่า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำดินตะกอนจากกว๊านพะเยามาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันเนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการนำกากของผลปาล์มมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าจึงทำการนำมาผสมทดลองดินตะกอนกับเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยเน้นศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความคงทนของวัสดุภายใต้สภาวะเปียกและแห้งการทดลองใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมัน และบ่มตัวอย่างในช่วงเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดลองพบว่าสูตรที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินตะกอนที่ 0.5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ L/FA = 0.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าดินตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ดินตะกอน, จีโอพอลิเมอร์, เถ้าปาล์มน้ำมัน, กำลังรับแรงอัดแกนดียว, ความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

Abstract

Kwan Phayao is a significant lake in northern Thailand. However, it is currently facing sedimentation issues due to the accumulation of sedimentary soil, which negatively impact its water storage capacity. To mitigate this problem, the Royal Irrigation Department conducts annual dredging operations to remove excess sediments. Despite these efforts, the extracted sediments have not been effectively utilized.

This study aims to enhance the properties of dredged sediments from Kwan Phayao by incorporating geopolymer technology using oil palm ash. Oil palm ash is a byproduct of biomass power generation from palm fruit residues, making it a sustainable material for reuse. The study investigates the potential of mixing dredged sediments with oil palm ash to maximize its usefulness, focusing on unconfined compressive strength and durability under wet and dry conditions. Various alkaline solution ratios were tested, and samples were cured over different periods, including 7, 28, 60, and 90 days.

The experimental results indicate that the optimal mixture consists of a fly ash-to-sediment ratio of 0.5 and an alkaline solution ratio of L/FA = 0.5, yielding the highest compressive strength. These findings suggest that geopolymer-stabilized sediments have strong potential for engineering applications, providing an efficient and sustainable solution for managing dredged sediments from Kwan Phayao.

Keywords: sedimentary soil, geopolymer, oil palm ash, Unconfined compressive strength, durability under wet and dry conditions

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดินตะกอนที่เกิดจากการขุดลอกแหล่งน้ำ เช่น ดินตะกอนกว๊านพะเยาเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในปริมาณมาก ดินตะกอนเหล่านี้มักมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานก่อสร้างโดยตรง เนื่องจากมีความชื้นสูง และปนเปื้อนสารอินทรีย์และอนินทรีย์ อย่างไรก็ตามการนำดินตะกอนมาใช้ใหม่สามารถช่วยลดปัญหาการกำจัดขยะ ซึ่งการใช้

ดินตะกอนในสภาพนี้อาจทำให้โครงสร้างพื้นฐานที่ก่อสร้างจากวัสดุนี้เกิดการแตกร้าวหรือยุบตัวเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้เลือกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการการปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์ โดยการผลิตปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ปัจจุบันการปรับปรุงดินด้วยจีโอพอลิเมอร์ได้รับความสนใจมากขึ้นในสายงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงดิน โดยจีโอพอลิเมอร์ผลิตจากวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เถ้าชีวมวล ฯลฯ ซึ่งทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดอออกไซด์ น้อยกว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ถึง 80% ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้นการนำเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน มาทดแทนปูนซีเมนต์จะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ และยังเป็นการลดปริมาณขยะจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมัน

การนำดินตะกอนและเถ้าปาล์มมาผสมปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความทนทานและการกัดกร่อนได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีสารเคมีรุนแรง เช่น สารละลายกรด หรือพื้นที่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล การใช้งานในพื้นที่เหล่านี้ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและลดการเสื่อมสภาพได้ ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่างๆได้มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างถนนหรือสิ่งก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังเปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมในปัจจุบันด้านวัสดุและวิศวกรรม

บทความนี้เน้นถึงความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ๆ ในการปรับปรุงและนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในบริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงแนวทางใหม่ในการจัดการขยะและของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินตะกอนจากการขุดลอก และประเมินความเหมาะสมในการใช้ในงานถนน

2.ปรับปรุงดินตะกอนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เหมาะกับงานก่อสร้าง

3.วิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและดินตะกอนปรับปรุง ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.ส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์ในงานก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและมาตรฐานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน

2.ใช้ดินตะกอนจากกว๊านพะเยา จังหวัดพะเยา เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสารละลายอัลคาไลน์ (โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์) ในการทดสอบ

3.ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน การบดอัด กำลังรับแรงอัด ความคงทน

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.นำดินตะกอนและเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างผ่านกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ

2.ลดปริมาณขยะและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ พร้อมลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปูนซีเมนต์ ช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อน

3.เพิ่มความแข็งแรงและทนทานของดินตะกอนปรับปรุง ช่วยให้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษได้

4.ลดต้นทุนวัสดุก่อสร้าง ส่งเสริมการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน

*1.5 **แผนการดำเนินงานวิจัย***

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อทำงานวิจัยเพื่อทำงานวิจัยกินตะกอนกว๊านพะเยา	■											
2	หาแหล่งวัตถุดิบ เช่น ดินตะกอน, เถ้าปาล์ม	■											
3	หาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนและเถ้าปาล์ม		■										
4	ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม			■	■	■							
5	ทดสอบความคงทนของดินผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม						■	■	■				
6	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง									■	■		
7	จัดทำรายงานและนำเสนองานวิจัย											■	■

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาเป็นทะเลสาบน้ำจืดธรรมชาติขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ กว๊านพะเยาเป็นบึงขนาดใหญ่ที่ได้รวบรวมลำห้วยต่างๆมากถึง 18 สาย มีพื้นที่ 20.53 ตารางกิโลเมตร อดีตมีความลึกเฉลี่ย 2.62 เมตร ปัจจุบันมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 1.93 เมตร สามารถเก็บกักน้ำได้ 55.65 ล้านลูกบาศก์เมตร [1] ปัจจุบันกว๊านพะเยาประสบปัญหากักเก็บน้ำได้น้อย เนื่องจากบริเวณกว๊านพะเยามีลักษณะภูมิประเทศล้อมรอบด้วยภูเขา เมื่อเกิดฝนตกทำให้การไหลของน้ำจากภูเขาได้ชะล้างพังทลายของดิน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการทับถมกันของดินตะกอนและเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากขึ้นภายในกว๊านพะเยา ส่งผลให้

กว๊านพะเยาตื้นขึ้นและกักเก็บน้ำได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานชลประทานได้ดำเนินการขุดลอกดินตะกอนออกจากกว๊านพะเยา เพื่อเพิ่มปริมาณการกักเก็บน้ำในกว๊านพะเยา พบว่าจากการขุดลอกดินตะกอนกว๊านถูกทิ้งอยู่บริเวณรอบๆเป็นจำนวนมาก

ภาครัฐโดยกรมชลประทาน จังหวัดพะเยา ได้ดำเนินนโยบายขุดลอกดินตะกอนในกว๊านพะเยา เพื่อปรับปรุงระบบนิเวศและพัฒนาแหล่งน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

2.2 เถ้าปาล์ม

เถ้าปาล์มคือเถ้าที่เกิดจากการเผาเศษกะลาและเส้นใยของผลปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิ 800-900°C เพื่อผลิตไฟฟ้า โดยเถ้าปาล์มนี้มีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย ทำให้เกิดปัญหาการกำจัดและมลภาวะ เนื่องจากเถ้าปาล์มมีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อมีความชื้น เกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการประสานได้

Hussin et al. (1996) การศึกษาพบว่าการนำเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต 30% ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและต้านทานการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [2]

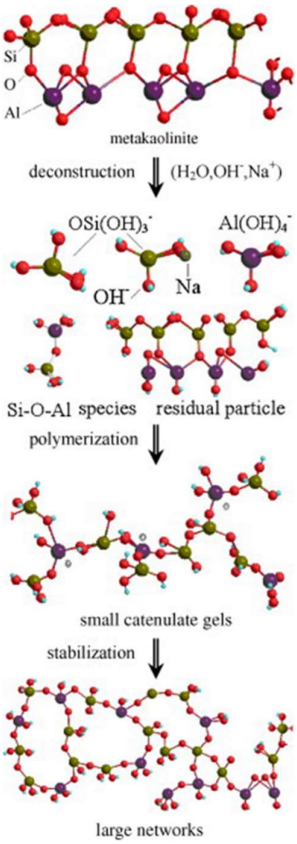


รูปที่ 2 เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

2.3 จีโอพอลิเมอร์

(Yip et al., 2005)การเกิดจีโอพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา แบ่งเป็นสามขั้นตอน ขั้นแรกคือการสร้างโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตที่เป็นโครงสร้างสามมิติ ขั้นที่สองคือการเกิดพอลิเมอไรเซชั่นซึ่งเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์จากอะลูมิเนตและซิลิเกตในสารตั้งต้นกับสารละลายด่าง ขั้นสุดท้ายคือการคงรูปหลังจากเก็บรักษาตัวอย่าง 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิคงที่ ทำให้โครงสร้างเจลขนาดเล็กเปลี่ยนเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น [3]

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หดตัวต่ำ ใช้พลังงานน้อยในการผลิตและมีราคาถูก การผลิตอิฐจีโอพอลิเมอร์ตั้งแต่การได้วัตถุดิบ การผลิตและการใช้งาน มีความคุ้มทุนมากกว่าอิฐคอนกรีต นอกจากนี้ยังใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมช่วยลดต้นทุน การเติมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอยและตะกรันถลุงเหล็ก ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพ เพิ่มความแข็งแรง ความทนแรงอัด ความทนกรด และลดการดูดซึมน้ำ จีโอพอลิเมอร์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอิฐทั่วไป และสามารถเพิ่มมูลค่าของเสียจากอุตสาหกรรมได้



รูปที่ 3 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Geopolymerization process) ที่มา : (Yao et al., 2009)

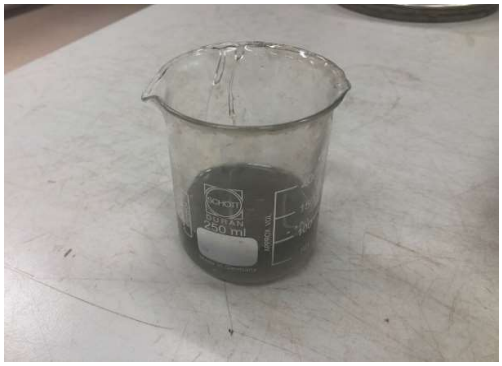
2.4 ***สารละลาย***

2.4.1 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกต หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว" เป็นสารประกอบที่มีโซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ใช้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีต โดยสามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบ ทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลือจากการไฮเดรชัน ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งแรงขึ้นและลดรูพรุนที่เกิดจากการระเหยของน้ำในคอนกรีตได้

กระบวนการโซเดียมซิลิเกต เริ่มจากการหลอมโซดาแอชกับซิลิกาให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1200 °C แล้วทำให้เย็นตัวเป็นก้อนแก้ว จากนั้นนำไปเข้าเครื่องบ่มอัตโนมัติเพื่อละลายเป็นน้ำแก้วอีกครั้ง สัดส่วนของโซเดียมกับซิลิกาจะกำหนดคุณสมบัติของโซเดียมซิลิเกต หากสัดส่วนใกล้เคียงกันมาก จะได้ผลึกของแข็งที่เรียกว่าโซเดียมเมตาซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากในอุตสาหกรรมผงซักฟอกและก่อสร้าง กำลังมีบทบาทสำคัญในฐานะตัวเชื่อมและสร้างโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งไม่ต้องการการเผาสูงแบบเซรามิกในอุตสาหกรรมเซรามิกใช้ในปริมาณน้อยโดยใช้ช่วยกระจายการลอยตัวเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตาและเป็นเคลือบใสที่ให้ความมันแบบบางๆ



รูปที่ 4 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate ,Na_2SiO_3)

2.4.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

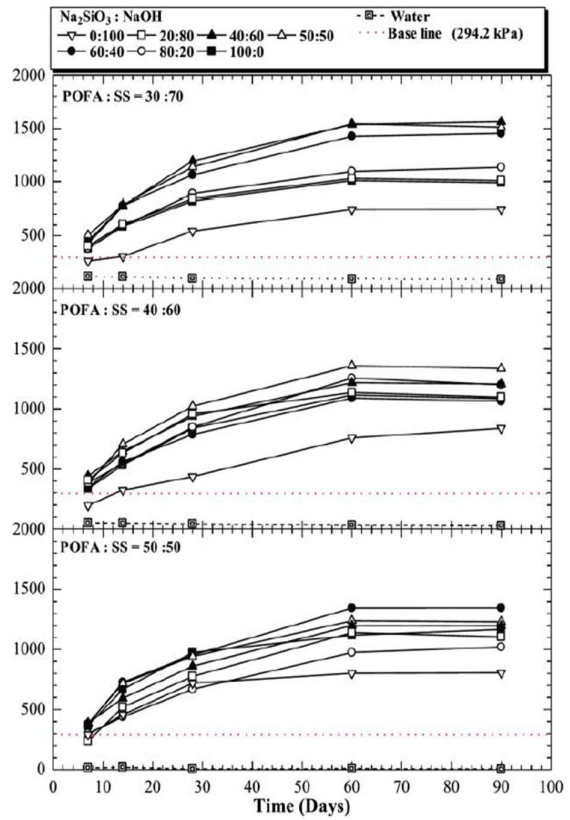
โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซดาไฟ เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ละลายในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียมและเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ดูดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ผลิตจากการแยกสารทางไฟฟ้าของน้ำเกลือใช้ในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ สบู่ ผงซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน โลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ และใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่เป็นกรดให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติ

โซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์เป็นของแข็งสีขาวที่มักทำเป็นเม็ดดูดความชื้นจากอากาศได้ดีมาก เมื่อทิ้งไว้จะเหลวลงและเนื้อสารน้อยลง จึงควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท เมื่อเตรียมสารละลายสารละลายจะปล่อยความร้อนออกมา ควรหลีกเลี่ยงการใช้ภาชนะพลาสติกเพราะอาจละลายได้



รูปที่ 5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

Sukmak et.al (2017) รูปที่ 6 ได้กล่าวว่า การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับดินตะกอนและการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ โดยความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ผสม นอกจากนี้ระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุผสมอีกด้วย การทดสอบด้านความทนทานต่อสภาพอากาศและสภาวะแวดล้อมแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมมีความทนทานต่อการชะล้างและการสึกกร่อนสูง เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทาน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มกับการรับกำลังแรงอัด
แกนเดียวที่มา : Sukmak et.al (2017)

2.5 มาตรฐานดินซีเมนต์ ชั้นรองพื้นทางกรมทางหลวง

ในการออกแบบส่วนการผสมของดินซีเมนต์และน้ำให้ถือค่า Unconfined Compressive Strength ของแท่งตัวอย่างต้องได้รับการตรวจสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตราฐาน” ผลการทดลองบดอัดดินซีเมนต์ให้มีกำลังอัดไม่น้อยกว่าที่กำหนด [4],[5]

มาตรฐานดินซีเมนต์ทางกรมทางหลวง	ค่ากำลังรับแรงอัด (Kpa)
ทล.-ม. 206/2532	689
ทล.-ม. 204/2556	1724

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.ดินตะกอน: ดินที่ได้จากการขุดลอกกว๊านพะเยาซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาใช้ในการทดสอบ

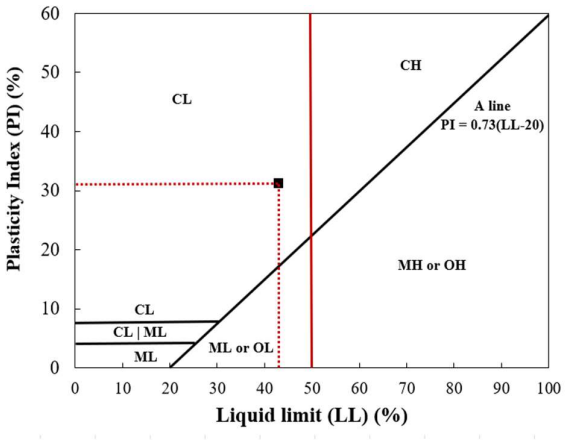
2.เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash): วัสดุเหลือใช้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดสุราษฎร์ธานี

3.สารละลายอัลคาไลน์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

4. นำไปผสมกับวัสดุต่างๆเพื่อสร้างสารละลายปรับปรุงคุณภาพดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน

การทดสอบ	ผลการทดสอบ
การทดสอบหาขีดพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก	LL = 41.70 %
	PL = 23.40 %
	SL = 20.44 %
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	2.72
การทดสอบหาขนาดคละ	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 99.94 %
	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 92.00 %
การจำแนกตามเกณฑ์ของ AASHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ของ USCS	CL
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	17.03 kN/m^3
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม	12.00 %



รูปที่ 7 เกณฑ์การจำแนกดินตะกอนผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน USCS

3.2 การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบดั้งเดิม มักใช้ตัวอย่างดินขนาดใหญ่เทียบเท่ากับโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งต้องการปริมาณตัวอย่างที่มาก เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดปริมาณตัวอย่างที่ต้องใช้ จึงมีการประดิษฐ์โมลทดสอบใหม่โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว กำหนดความสูงเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ต่อ 2 ซึ่งเป็นการอ้างอิงจากงานวิจัยของ ธัชชัย และคณะ (2560) ดังแสดงในรูปที่ 8(a)



รูปที่8(a) โมล PVC



รูปที่8(b) ค้อนบดอัด

การทดสอบบดอัดที่สูงกว่ามาตราฐานต้องควบคุมหน่วยน้ำหนักของดินเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง โดยใช้วิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัดตามสมการที่ 1

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \qquad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยก)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ค้อนในการบดอัดโมลจำนวนทั้งหมดที่ 23 ครั้ง ซึ่งในการทดสอบ 1 โมล จะมีทั้งหมด 3 ชั้น

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ส่วนผสม	S : FA	L/FA	Na_2SiO_3 : NaOH
S90FA10L0.4	90 : 10	0.4	- 1.5
S80FA20L0.4	80 : 20		
S70FA30L0.4	70 : 30		
S90FA10L0.5	90 : 10	0.5	
S80FA20L0.5	80 : 20		
S70FA30L0.5	70 : 30		
S90FA10L0.6	90 : 10	0.6	
S80FA20L0.6	80 : 20		
S70FA30L0.6	70 : 30		

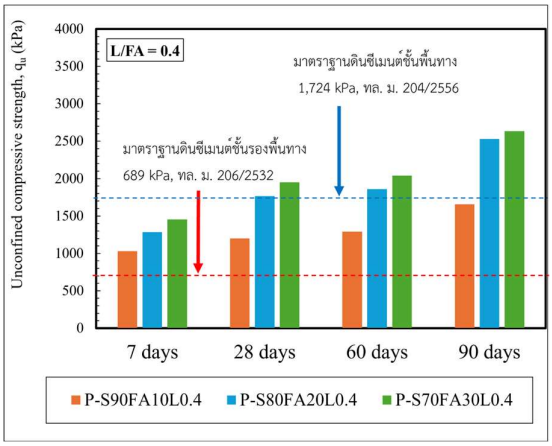
**หมายเหตุ S คือ ดินตะกอนกว๊านพะเยา
FA คือ เถ้าปาล์ม
L คือ สารละลายอัลคาไลน์

4.ผลการทดสอบ

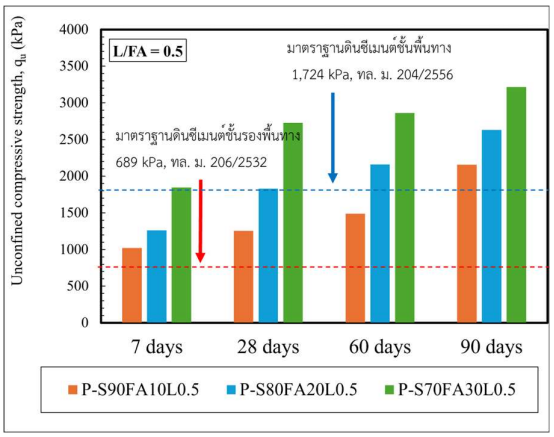
4.1 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดโดยไม่มีแรงดันด้านข้างโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2166

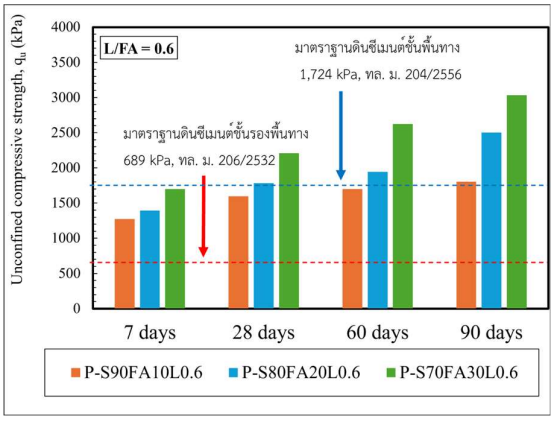
รูปที่9(a).ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว๊านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มงานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว๊านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าปาล์ม (P/FA) ที่ 90:10, 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (L/FA) เท่ากับ 0.4 ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้นและเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นโดยเฉพาะตัวอย่างที่มีสัดส่วนเถ้าปาล์ม 30% (P-S70FA30L0.4) [6] พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดดังนี้ 1,455.79 1,951.90 2,038.35 และ 2632.90 kPa ตามลำดับ



(a.)



(b.)



(c.)

รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแกนเดียว (qu) กับอายุการบ่มตัวของดินตะกอนกว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม (Plam oil fuel ash, P) ใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน Na_2SiO_3 :

NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าเท่ากับ (a) L/FA = 0.4, (b) L/FA = 0.5, (c) L/FA = 0.6

การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการควบแน่นและปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ โดยสารละลาย Na_2SiO_3 ทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด

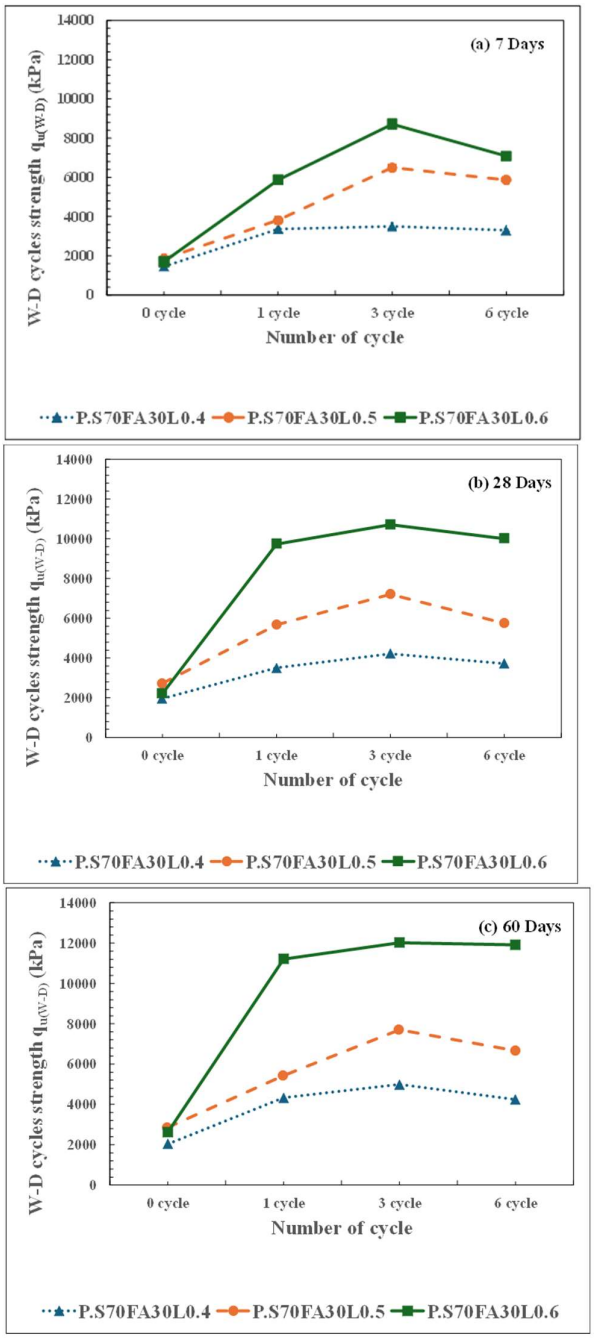
รูปที่9(b).ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าปาล์ม (P/FA) ที่ 90:10, 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (L/FA) เท่ากับ 0.5 ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้นและเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีสัดส่วนเถ้าปาล์ม 30% (P-S70FA30L0.5) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการควบแน่นและ 90 วัน มีค่ากำลังอัดดังนี้ 1,847.00 2728.59 2862.64 และ 3216.22 ตามลำดับ ปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ โดยสารละลาย Na_2SiO_3 ทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด ทั้งนี้พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสม L/FA เท่ากับ 0.5 สูงกว่าอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.4 เนื่องจากอัตราส่วนที่มีสารอัลคาไลน์มากขึ้นสามารถชะล้างซิลิกาและอะลูมินาได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ที่สมบูรณ์ขึ้นและทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น

รูปที่9(c).ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าปาล์ม (P/FA) ที่ 90:10, 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (L/FA) เท่ากับ 0.6 ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มเพิ่มขึ้นและเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีสัดส่วนเถ้าปาล์ม 30% (P-S70FA30L0.6) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดดังนี้ 1,700.00 2,209.10 2,622.32 และ 3,031.72 kPa ตามลำดับ จากการศึกษา พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของอัตราส่วนส่วนผสม L/FA เท่ากับ 0.6 มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.5 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่มากเกินไปทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของดินลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดลดลง [7]

4.2 ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet-dry Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาความคงทนของตัวอย่างด้วยวิธีเปียกสลับแห้งตามมาตรฐาน ASTM D559

รูปที่10(a).ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ได้รับการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้เถ้าปาล์มเป็นวัสดุหลักและกำหนดอัตราส่วนของของแข็งต่อสารละลายอัลคาไลน์ (S/FA) ที่ 90:10 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 ทั้งนี้ ตัวอย่างถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน

ผลการทดสอบที่ของตัวอย่างที่มีระยะเวลาบ่ม 7 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามจำนวนcycleที่มากขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (L/FA) เท่ากับ 0.6 (P-S70FA30L0.6) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 0, 1, 3 และ 6 รอบ เท่ากับ 1,700 5,872.19 8,708.96 และ 7,082.86 kPa ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าในช่วงcycleที่ 1-3 รอบ ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์[8]ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนcycleเพิ่มขึ้นเป็น 4-6 รอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากจำนวนcycleที่มากเกินไป ทำให้เกิดการแตกร้าวทั้งบริเวณผิวและภายในโครงสร้างของตัวอย่าง เป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

รูปที่10(b).ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ได้รับการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้เถ้าปาล์มเป็นวัสดุหลักและกำหนดอัตราส่วนในดินตะกอนในเถ้าปาล์ม (S:FA) ที่ 90:10 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 1.5 ทั้งนี้ ตัวอย่างถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7 28 และ 60 วัน

ผลการทดสอบที่ของตัวอย่างที่มีระยะเวลาบ่ม 28 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามจำนวนcycleที่มากขึ้นโดยเฉพาะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (L:FA) เท่ากับ 0.6 (P-S70FA30L0.6) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 0, 1, 3 และ 6 รอบ เท่ากับ 2,209.098 9,735.47 10,715.58 และ 10,000.87 kPa ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าในช่วงcycleที่ 0-1 รอบ ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ในรอบนี้ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ที่cycle 1-3 รอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดยังคงเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงอัดช้ากว่าcycleที่ 0-1 รอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนcycleเพิ่มขึ้นเป็น 4-6 รอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการcycleที่มากเกินไปทำให้เกิดการแตกร้าวทั้งบริเวณผิวและภายในโครงสร้างของตัวอย่าง เป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

รูปที่10(c).ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะเปียกสลับแห้ง(cycle)กับค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนกว้านที่ได้รับการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์ม โดยใช้เถ้าปาล์มเป็นวัสดุหลักและกำหนดอัตราส่วนในดินตะกอนในเถ้าปาล์ม (S:FA) ที่ 90:10 80:20 และ 70:30 รวมถึงใช้อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 1.5 ทั้งนี้ ตัวอย่างถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน

ผลการทดสอบที่ของตัวอย่างที่มีระยะเวลาบ่ม 60 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามจำนวนcycleที่มากขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่าง

ที่มีอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์ม (S:FA) เท่ากับ 0.6 (P-S70FA30L0.6) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 0, 1, 3 และ 6 รอบ เท่ากับ 2622.323 11209.60 12014.86 11917.52 kPa ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าในช่วงcycle 0-1 รอบ ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงเนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของวัสดุอย่างต่อเนื่องcycleที่ 2-3 รอบ มีค่ากำลังอัดไม่ต่างกันมาก และ cycle ที่ 4-6 รอบ มีค่ากำลังอัดที่ลดลงต่างจาก cycleที่ 2-3 รอบ เพียงเล็กน้อย เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่ 60 วันอยู่ในช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงและรับกำลังอัดได้มากกว่าตัวอย่างใช้เวลาการบ่ม 28 วัน ทำให้ผิวและโครงสร้างของตัวอย่างเกิดรอยแตกเพียงเล็กน้อย

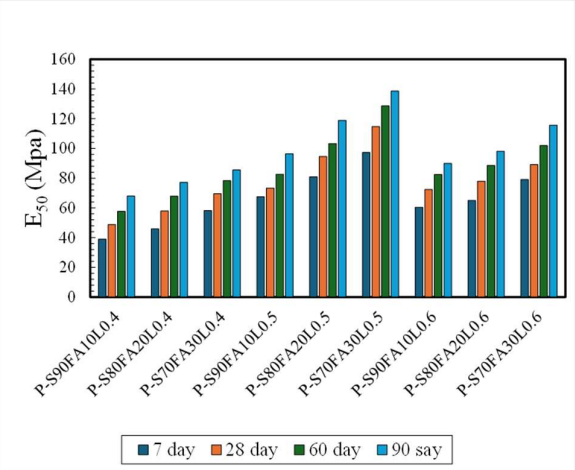
4.3 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นของกำลังรับแรงอัดสูงสุด

ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็นของค่ากำลังอัดรับแรงแกนเดียว (secant Young's modulus at 50% of strength, E_{50}) ที่ได้จากการทดสอบการกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงที่สุดของดินตะกอนกว้านที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มซึ่งใช้อัตราส่วนผสม L/FA เท่ากับ 90:10 80:20 และ 70:30 โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน $Na_2Si_{O_3}$: NaOH เท่ากับ 1.5 มาวิเคราะห์

รูปที่ 11 ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0.4 จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า E_{50} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตรา

ส่วนเถ้าปาล์มที่มากขึ้นต่อระยะเวลาในการบ่ม ค่า E_{50} มากที่สุด คือตัวอย่างP-S70FA30L0.4 ตามระยะเวลาการบ่มที่ 7 28 60 และ 90วัน มีค่า E_{50} เท่ากับ 58.14 69.56 78.35 และ 85.53 MPa

ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0.5 จากผลวิเคราะห์พบว่าค่า E_{50} มีแน้มโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าปาล์มที่เพิ่มขึ้นต่อระยะเวลาในการบ่ม ค่า E_{50} มากที่สุด
คือตัวอย่าง P-S70FA30L0.5 ตามระยะเวลาการบ่มที่ 7, 28, 60 และ 90 วัน E_{50} เท่ากับ 97.26 114.67 128.67 และ 138.57 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 11 ค่าซีแค้นยังโมดูลัส 50 เปอร์เซ็น ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว สำหรับส่วนผสมมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3 : NaOH) เท่ากับ 1.5

ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนผสมอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มเท่ากับ 0.6 จากผลวิเคราะห์พบว่าค่า E_{50} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าปาล์มที่เพิ่มขึ้นต่อระยะเวลาในการบ่ม ค่า E_{50} มากที่สุด คือตัวอย่าง P-S70FA30L0.6 ตามระยะเวลาการบ่มที่ 7, 28, 60 และ 90 วัน E_{50} เท่ากับ 79.13 89.14 101.87 และ 115.64 MPa ตามลำดับ รูปที่11 สรุปได้ว่า แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของค่า E_{50} สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

5.สรุปผล

การปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนกว้านพะเยาด้วยจีโอพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของดินรวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติด้านกำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้จีโอพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งผลลัพธ์จากการศึกษานี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองในการประยุกต์ใช้ดินตะกอนกว้านพะเยาในงานวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ยังมีการอ้างอิงจากแหล่งข้อมูลวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินตะกอนกว้านพะเยา เพื่อเสริมความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ส่งเสริมการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมอย่างมีประสิทธิภาพช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการทรัพยากรจากกรมชลประทานจังหวัดพะเยาซึ่งจะช่วยให้การใช้ดินตะกอนกว้านพะเยาเป็นไปอย่างยั่งยืนและเหมาะสมกับบริบทในท้องถิ่น โดยผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

1. อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมเท่ากับ 70 : 30 กับสารละลายอัลคาไลน์อัตราส่วน(Na_2Sio_3:NaOH) เท่ากับ1.5 (P-S70FA30L0.5) มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุดเท่ากับ 3216.22 KPa ที่ 90 วัน
2. สารละลายอัลคาไลน์ทำให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่หากเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปจะทำให้ดินเกิดสภาวะการอิ่มตัวที่มากเกินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง
3. ผลการทดสอบความคงทนของตัวอย่างจะเห็นได้ว่าจำนวนรอบการบ่มและการอบมีผลต่อความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวอย่างมีนัยสำคัญหากจำนวนรอบการบ่มและการอบมากเกินจะส่งผลให้ผิวและโครงสร้างของตัวอย่างเกิดรอยร้าวทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง
4. ค่าซีแค้นยังโมดูลัส (E_{50}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันต่อระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างซึ่งสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว
5. เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับมาตรฐานดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม.206/2532 และดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม.204/2556 ที่ 7 วันต้องมีกำลังรับแรงอัด 689 และ 1,724 KPa ซึ่งทุกตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน สามารถผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม.206/2532 และตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางที่อายุการบ่ม 7 วัน ทล.-ม.204/2556 มีเพียงตัวอย่างเดียว สามารถผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม.204/2556 คือ P-S70FA30L0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว เท่ากับ 2,209.10 KPa

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตลอดจนให้ข้อชี้แนะและความช่วยเหลือต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของ งานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณ นายวรากร สุยะตะ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ทำให้การศึกษาครั้งนี้เป็นไปอย่างถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยสนับสนุนให้ สามารถดำเนินการศึกษาและวิจัยได้อย่างราบรื่น ขอขอบคุณเพื่อนร่วมกลุ่มทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน และเป็นกำลังใจให้กันตลอดช่วงเวลาการทำวิจัย การร่วมแรงร่วมใจและมิตรภาพ ที่ดีเป็นสิ่งที่มีค่ามากในการทำงานครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รัก ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และดูแลอย่างใกล้ชิด ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] แผนการพัฒนาการเกษตรและสหกรณ์ของจังหวัดพะเยา (พ.ศ.2566-2570).

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2565). เถ้าปาล์มน้ำมัน : วัสดุปอซโซลานในอนาคตสำหรับคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[3] Sukmak P., Horpibulsuk S., Shui-Long S., (2013) Strength development in clay–fly ash geopolymer

[4] กรมทางหลวง ทล.-ม.206(2532). มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

[5] กรมทางหลวง ทล.-ม.204(2556). มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

[6] Suksiripattanapong, C., Tuntawoot, N., Thumrongvut, J., Wonglakorn, N., Chongutsah, S., & Tabyang, W. (2019). Compressive strength of marginal lateritic soil stabilized. *International Journal of Engineering and Technology*, 11(3), 173-176.

[7] Dihajia, H., Azerkane, D., Bih, L., Essaddek, A., & Hailya, E. M. (2025). Comparative study of geopolymers synthesized with alkaline and acid reactants at various liquid-to-solid ratios using Moroccan kaolin clay. Construction and Building Materials, 140453.

[8] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites, 32*(2), 142–147.

พฤติกรรมแรงดัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด

Flexural Strength Behavior of Cement Treated Phayao Lakebed Sedimentary Soil Admixed with Corn Husk Fiber

ณัฐกรณ์ ทิพย์โพธิ์[1] นันทวัฒน์ ธิชาญ[2] เปเฟอร์ สาวิสิทธิ์[3] ธราดล ดวงแก้ว[4] และ รศ.ดร.ธนกร ชมภูรัตน์[5]

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address; 64101518@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งนำมาต่อยอดพัฒนาปรับปรุงให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมเพื่อใช้สำหรับเป็นวัสดุทางเลือกในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างรวมถึงเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์อีกทั้งยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม ดังเช่น จังหวัดพะเยาที่ในทุกๆปี จังหวัดจะทำการขุดลอกกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มปริมาณความจุกักเก็บ ทำให้มีดินตะกอนกองอยู่รอบๆ กว๊านพะเยาจำนวนมาก และยังมีข้าวโพดซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่ปลูกเป็นจำนวนมากทางภาคเหนือ ภายหลังฤดูการเก็บเกี่ยวจะมีวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก การกองเก็บและการกำจัดทิ้งมักใช้การเผาส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมในการใช้งานด้านวิศวกรรม โดยใช้การทดสอบกำลังรับแรงดัดของดินตะกอนที่ผสมกับปูนซีเมนต์ที่เสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติจากเปลือกข้าวโพด โดยจะทดสอบที่อัตราส่วนผสมปริมาณปูนซีเมนต์ 7% ปริมาณเส้นใย 0.5 1.0 และ 2.0% โดยน้ำหนักของดินตะกอนแห้ง และใช้ความยาวของเส้นใย 3 ขนาด ได้แก่ 1 2 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 และ 28 วัน ผลจากการทดสอบพบว่าการเพิ่มเส้นใยช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมเปราะของตัวดินตะกอนที่ผสมกับปูนซีเมนต์ให้เป็นพฤติกรรมเหนียวและลดการสูญเสียกำลังหลังจากกำลังรับแรงดัดสูงสุด ท้ายสุดของงานวิจัยนี้จะนำเสนออัตราส่วนและความยาวที่เหมาะสมของเส้นใยข้าวโพดสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรม

คำสำคัญ : ดินตะกอน ปูนซีเมนต์ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพด กำลังรับแรงดัด

Abstract

This research focuses on the utilization of waste materials to enhance their value and develop them into engineering materials for alternative use in the construction industry. This approach aims to reduce construction costs, add value to waste materials, and contribute to environmental sustainability. In Phayao Province, annual dredging of Kwan Phayao Lake to increase its storage capacity results in large accumulations of sediment around the lake. Additionally, corn, a major economic crop in the northern region, generates substantial post-harvest waste. The common practice of burning this waste poses significant environmental challenges. This study aims to investigate the feasibility of using these waste materials to improve their engineering properties. Specifically, the flexural strength of sediment mixed with cement and reinforced with natural fibers from corn husks is evaluated. The experiments involve testing mixtures with 7% cement content and varying fiber contents (0.5%, 1.0%, and 2.0% by dry weight of sediment). Three different fiber lengths (1, 2, and 4 centimeters) are used, and the specimens are cured for 7 and 28 days. The results demonstrate that the addition of fibers transforms the brittle behavior of the cement-sediment mixture into a ductile one, reducing strength loss after peak flexural load. Finally, this research presents the optimal ratios and lengths of corn husk fibers for engineering applications.

Keywords: Sediment, Cement, Corn Husk Fiber, Flexural Strength.

1.บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งนำมาพัฒนาปรับปรุงให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมเพื่อใช้สำหรับเป็นวัสดุทางเลือกในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและช่วยลดต้นทุนการก่อสร้าง รวมถึงเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์อีกทั้งยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม ดังเช่น ดินตะกอนกว๊านพะเยาในช่วงฤดูฝน น้ำฝนจะชะล้างหน้าดินและพัดพาดินไหลตามแม่น้ำลงสู่กว๊านพะเยาทำให้เกิดการตื้นเขินของกว๊านพะเยา ทางจังหวัดพะเยาจึงได้ทำการขุดลอกกว๊านพะเยาเพื่อเพิ่มความจุในการกักเก็บน้ำ และได้นำดินตะกอนไปทิ้งไว้บริเวณริมตลิ่ง ทำให้มีดินตะกอนกองอยู่บริเวณโดยรอบกว๊านพะเยาเป็นจำนวนมากและเพิ่มจำนวนมากขึ้นทุกๆปี ส่งผลกระทบด้านทัศนียภาพ นอกจากนี้จังหวัดพะเยายังมีปัญหาทางด้านมลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากทางภาคเหนือนิยมปลูกข้าวโพด[1] เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ หลังช่วงฤดูเก็บเกี่ยว จะเหลือซังข้าวโพดและใบที่ไม่ได้นำไปใช้ต่อกลายเป็นขยะ ขยะเหล่านี้มักจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการเผาจึงทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ดังเช่น ปริมาณฝุ่น PM 2.5 [2]ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ดินกอนกว๊านพะเยาและเปลือกข้าวโพดจึงเป็น 2 วัสดุหลักในการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในงานวิศวกรรม

ในปัจจุบันมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของดิน ลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยทั่วไปดินตะกอนนั้นมีความชื้นในมวลดินสูง มีความละเอียด และมีสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ปะปนอยู่จำนวนมากส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าต่ำ ทำให้การนำดินตะกอนมาใช้งาน

ทางด้านวิศกรรมปฐพีนั้นมีข้อจำกัดและไม่ได้รับความนิยมมากนัก ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของดินตะกอนคือการใช้สารผสมเพิ่มจำนวนปูนซีเมนต์เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพที่สูงในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของดินตะกอน ดินซีเมนต์ เป็นดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักและน้ำในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อบดอัดให้มีความหนาแน่นสูงสุดทำให้มีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องมีปริมาณมากพอที่ทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังแบกทานตามกำหนด อย่างไรก็ดีการปรับปรุงดินด้วยการใส่สารผสมเพิ่มจำพวกปูนซีเมนต์ถึงแม้จะมีส่วนช่วยในการการพัฒนากำลังของดิน แต่ดินหลังจากการปรับปรุงจะมีความเป็นวัสดุเปาะที่สูง ซึ่งวิธีการแก้ไขที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ การเพิ่มวัสดุเสริมแรงในดินซีเมนต์

ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา การพัฒนาปรับปรุงดินด้วยเส้นใยเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของดินให้ดีขึ้น โดยเส้นใยจะช่วยให้ดินมีความแข็งแรงและมีเสถียรภาพมากขึ้น ลดปัญหาการพังทลายของดินหรือการกัดเซาะของหน้าดิน เส้นใยที่นิยมใช้ในการปรับปรุงดินมีหลายประเภท รวมถึงเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยข้าวโพด และเส้นใยสังเคราะห์ เช่น โพลีโพรพีลีน โพลีเอสเตอร์ ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ทั้งนี้การปรับปรุงดินด้วยเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนมากขึ้นและยังส่งผลให้ดินมีความเป็นวัสดุเหนียว อันเนื่องมาจากดินที่เสริมด้วยเส้นใยจะมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุประกอบคล้ายการเสริมเหล็กในงานคอนกรีต

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นปัญหาตั้งต้นของงานวิจัยนี้ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ดินตะกอนกว๊านที่ได้มาจากการขุดลอกกว๊านพะยานำมาปรับปรุงคุณภาพ โดยการทดสอบแบบคานดิน เนื่องจากการทดสอบนี้ช่วยประเมินความแข็งแรงในทิศทางการดัด หรือ Bending Direction เป็นการอธิบายว่าชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คานหรือแผ่นจะเกิดการดัดหรือโค้งงอไปในทิศทางใดเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักหรือแรงต่างๆ นอกจากการประเมินความแข็งแรงแล้ว การทดสอบยังสามารถช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลอื่นๆ ของวัสดุ วิธีการทดสอบสามารถทำได้ง่ายและไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อน ทำให้สะดวกในการดำเนินการ โดยการทดสอบนี้จะดำเนินการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้เส้นใยข้าวโพดที่ได้มาจากเปลือกข้าวโพดมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง และใช้ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบด้วย วิธีการทดสอบรับแรงดัด (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM C1609 [3]

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดเพื่อใช้ในวิศวกรรม
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงดัดดินตะกอนผสมซีเมนต์
3.เพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงดัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด
4.เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรม และเสนอแนวทางการลดปริมาณการเผาเปลือกข้าวโพดที่เกิดจากการทำเกษตร

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.ดินตะกอนบริเวณกว๊านพะเยา ในอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา โดยใช้ขนาดที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4
2.เปลือกข้าวโพดที่ได้จากโรงงานผลิตอาหารสัตว์ในพื้นที่จังหวัดพะเยา
3.ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อ SCG สูตร ไฮบริด
4.ศึกษาทางด้านคุณสมบัติด้านวิศวกรรม โดยการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน โดยเครื่องทดสอบ Triaxial Load Fames TRITECH 50 kN

1.4 ประโยชน์

1.ทราบถึงประสิทธิภาพของเส้นใยข้าวโพดที่นำมาใช้ด้านวิศวกรรม
2.ทราบถึงพฤติกรรมแรงดัดดินตะกอนผสมซีเมนต์
3.ทราบถึงพฤติกรรมแรงดัดดินตะกอนผสมซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยข้าวโพด
4.สามารถลดปริมาณเปลือกข้าวโพดที่เป็นขยะจากการทำเกษตรกรรม
5.สามารถลดปัญหามลภาวะทางอากาศจากการกำจัดข้าวโพดที่เกิดจากการเผาไหม้

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 ตารางปฏิบัติแผนการทำงาน

ลำดับ	ขั้นตอนปฏิบัติงาน	ระยะเวลา (เดือน)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาโครงการ และ งานวิจัย												
2	วางแผนเตรียมวัสดุ และ หาแหล่งวัตถุดิบ												
3	เตรียมดินตะกอนกว๊านที่ร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4 และเส้นใยข้าวโพด												
4	ทำการทดสอบแรงดัดคานดินตะกอนกว๊านพะเยาผสมซีเมนต์และผสมเส้นใยข้าวโพด												
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง												
6	จัดทำรูปแบบรายงาน												

2.ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินตะกอนกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดขนาดใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยาทางภาคเหนือของประเทศไทย มีเนื้อที่ประมาณ 12,831 ไร่ หรือประมาณ 20.53 ตร. กม. ปัจจุบันสามารถเก็บกักน้ำได้ 33.84 ล้านลบ.ม. ซึ่งสามารถช่วยเหลือพื้นที่ การเกษตรท้ายกว๊านพะเยาใน ฤดูฝนได้ประมาณ 300,000 ไร่ และในฤดูแล้งได้ 13,000 ไร่ ในช่วงฤดูฝนน้ำฝนได้ทำการชะล้างหน้าดิน และพัดไหลตามแม่น้ำ ทำ ให้กว๊านพะเยาตื้นเขินลงในทุกๆปี ทางจังหวัดพะเยาจึงได้ทำการขุดลอกกว๊าน พะเยา ทำให้มีดินตะกอนกองอยู่รอบๆกว๊านพะเยาจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ดินตะกอนรอบกว๊านพะเยา

2.2 ข้าวโพด

การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้รับความนิยม อย่างแพร่หลาย ในส่วนของพื้นที่บริเวณจังหวัดพะเยา อุตสาหกรรมการปลูก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีขนาดใหญ่เป็นอันดับ 2 รองจากข้าว โดยมีปริมาณพื้นที่ปลูกมากถึง 150,262.56 ไร่ หลังช่วงฤดูเก็บเกี่ยวได้มี วัสดุเหลือทิ้งทางด้านการเกษตรในปริมาณที่มาก จึงทำการเผาเปลี่ยนจำกัดทิ้งเพื่อ รอในการเพาะปลูกในครั้งหน้า ซึ่งการเผาคือสาเหตุหนึ่งของการเกิดมลภาวะทางอากาศ


(ก)


(ข)

รูปที่ 2 เปลือกข้าวโพด (ก) และกองเปลือกข้าวโพดหลังเก็บเกี่ยว (ข)

2.3 การปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนซีเมนต์

การปรับปรุงดินมีหลายวิธี ในดินชนิดเดียวกันอาจมีการปรับปรุงที่เหมือนกันหรือต่างกันก็ได้ทั้งนี้ในการสร้างถนนโดยทั่วไป ดินที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่ำจะเป็นปัญหาต่อการก่อสร้าง ซึ่งเกิดจากธรรมชาติของดินแต่ละที่อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เกิดได้ทั้งจากตามธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ทำให้คุณภาพของดินลดลง การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ หรือที่เรียกว่าดินซีเมนต์นั้นส่วนใหญ่มักนำมาเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับงานฐานรองท่อ พื้นที่ลาดชัน และการสร้างถนนโดยปกติดินซีเมนต์จะมีกำลังแรงอัดแรงเฉือนดี แต่จะมีความเปราะ และต้านแรงดึงต่ำ จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยร้าวได้ง่าย ส่วนผสมของดินซีเมนต์จะมีความแตกต่างจากคอนกรีตซีเมนต์ปอตแลนด์ในเรื่องปริมาณซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตซีเมนต์จะเคลือบอนุภาคมวลรวมทั้งหมดและยึดเกาะเข้าด้วยกันแต่ในดินซีเมนต์จะมีปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่า ทำให้มีช่องว่างเหลืออยู่จึงทำให้เนื้อประสานซีเมนต์ยังคงเป็นก้อนและไม่ประสานกัน

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 สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก 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 การปรับปรุงดินโดยใช้วัสดุเสริมแรงจำพวกเส้นใย

กระบวนการปรับปรุงดินมีด้วยกันหลากหลายวิธีดังที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้า การปรับปรุงดินโดยการใช้วัสดุเสริมแรงจำพวกเส้นใย ก็เป็นหนึ่งวิธีที่ได้ความนิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเนื่องจากมีต้นทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการปรับปรุงดิน โดยลักษณะทั่วไปของการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดิน สามารถจำแนกตามรูปแบบการใช้งานออกเป็น2กลุ่มหลักๆดังนี้ 1.การใช้ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ และ 2.จากการทดสอบเส้นใยทำให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของตัวอย่างจากวัสดุเปราะเป็นวัสดุเหนียว

งานวิจัยหนึ่งทำการทดสอบโดยการนำเส้นใยธรรมชาติมาปรับปรุงความเปราะของดินซีเมนต์ด้วยการเสริมเส้นใยสังเคราะห์ในดินซีเมนต์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย โดยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 และ7% ปริมาณเส้นใย 0.5, 1.0 และ 2.0%ความยาวเส้นใย 1.0, 2.0และ 4.0 เซนติเมตร พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากนั้นกำลังอัดจะลดลง โดยปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมอยู่ที่ 1.0% [4]

3.วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.ดินตะกอนกว๊านพะเยา
2.เปลือกข้าวโพด
3.โซดาไฟ หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

อัตราสวนผสมที่ใช้ในวิจัยนี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ ธัชชัย (2560) เนื่องจากดินตะกอนกว๊านพะเยาจากแหล่งเดียวกัน จึงใช้ปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์ 7% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในงานวิจัย เนื่องเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินตะกอน อัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3 และคุณสมบัติดินตะกอนดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 รายละเอียดอัตราส่วนผสม

สัญลักษณ์	อัตราส่วนปูนซีเมนต์ (%)	อัตราส่วนเส้นใย (%)	ความยาวเส้นใย (cm)
C7CF0	7	0	0
C7CF0.5L1		0.5	1
C7CF0.5L2			2
C7CF0.5L4			4
C7CF1L1		1	1
C7CF1L2			2
C7CF1L4			4
C7CF2L1		2	1
C7CF2L2			2
C7CF2L4			4

หมายเหตุ : 1. C คือ ปริมาณปูนซีเมนต
2. CF คือ ปริมาณเส้นใย
3. L คือ ความยาวเส้นใย (cm)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

เนื่องจากต้องใช้ดินตะกอนกว้านในการทดสอบ จำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดินและส่วนผสมต่างๆของดินรวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยข้าวโพดด้วย ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5

ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน และส่วนผสมดินตะกอน-ซีเมนต์

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ,SG	2.71	-
ขีดจำกัดเหลว,LL	42.6	%
ขีดจำกัดพลาสติก,PL	23.5	%
ขีดจำกัดการหดตัว,SL	19.5	%
ค่าดัชนีพลาสติก,PI	19.1	%
ปริมาณดินเม็ดละเอียด,%f	91.8	%
การจำแนกดิน(USCS)	CL	-
หน่วยน้ำหนักแห้งดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ที่ 7%	16.2	KN/m^3
ความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ที่ 7%	23.4	%

ตารางที่ 5 คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยข้าวโพด

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	0.3	มิลลิเมตร
กำลังรับแรงดึง	25	เมกะปาสคาล
โมดูลัสยืดหยุ่น	50	จิกะปาสคาล

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบโมลเหล็กขนาด 10 x 40 x 10 cm (ข)
2. ค้อนขนาด 10 ปอนด์ (Modified Compaction Hammer) (ก)
3. เครื่องกด Triaxial Load Frames 50 kN



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ค้อนขนาด 10 ปอนด์ (Modified Compaction Hammer) (ก) และ แบบโมลเหล็กขนาด 10 x 40 x 10 cm (ข)

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การออกแบบพลังงานการบดอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานดิน ซึ่งโดยเฉพาะการทดสอบดังกล่าวขนาดของตัวอย่างที่ใช้มีขนาดที่แตกต่างกับตัวอย่างจากทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เหตุผลนี้เองทำให้ต้องมี การควบคุมหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีหน่วยน้ำหนักที่ เท่ากันกับดินที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งวิธีการควบคุมหน่วยน้ำหนักจะทำได้โดยวิธีการ เทียบพลังงานในการบดอัด โดยมีวิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัดจากสมการ 3.1 ดังนี้

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \qquad (3.1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

B คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น

L คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด

W คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)

H คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด

V คือ ปริมาตรของโมล

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาพลังงานบดอัดจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 15.2 cm ขนาดความสูงของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 17.7 cm จะได้ปริมาตรของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 3211.814 cm^3 น้ำหนักของค้อนเท่ากับ 4.39 kg ระยะยกของค้อนบดอัดเท่ากับ 43 cm จำนวนชั้นบดอัด 5 ชั้น จำนวนครั้งในการบดอัดแต่ละชั้น 56 ครั้ง

จากสมการ $E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$

จะได้ $E = \frac{56 \times 5 \times 4.39 \times 43}{3211.8147} = 16.4566$ cm-kg/cm^3

ขั้นตอนที่ 2 ย้ายสมการเพื่อคำนวณหาจำนวนครั้งในการบดอัดโมลเหล็ก ขนาดความกว้างของโมล เท่ากับ 10 cm ขนาดความยาวของโมล เท่ากับ 40 cm ขนาดความสูงของโมล เท่ากับ 10 cm จะได้ปริมาตรของโมลบดอัด เท่ากับ 4000 cm^3 น้ำหนักของค้อนบดอัดแบบใหม่เท่ากับ 4.24 kg ระยะยกของค้อนแบบใหม่เท่ากับ 30 cm จำนวนชั้นบดอัด 3 ชั้น พลังงานจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 16.4566 cm-kg/cm^3

จากสมการ $E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$

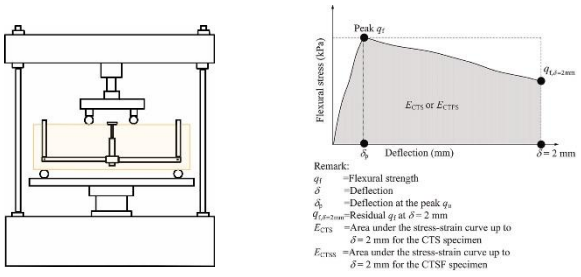
จะได้ $16.4566 = \frac{B \times 3 \times 4.24 \times 30}{4000}$

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ $B = \frac{16.4566 \times 4000}{3 \times 4.24 \times 30} = 172.50 \approx 173$ ครั้ง

3.3.2 แนวทางการอภิปายผลการทดลอง

หลังจากการบ่ม 7วัน และ 28 วันการทดสอบก็จะดำเนินการทันที สำหรับการทดสอบทั้งหมดที่ดำเนินการนั้นการศึกษานี้ ค่าเฉลี่ยของการทดสอบมีการรายงานผลลัพธ์จากตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดเป็นไปตามขึ้นรูปโดยใช้เครื่องโหลดอัตโนมัติความจุ 50 kN มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีความเร็ววงปิดการควบคุมถูกใช้เพื่อควบคุมอัตราการ

เสียรูประหว่างการทดสอบแต่ละครั้งและให้ความเร็วในการทดสอบแต่ละครั้งและให้ความเร็วในการทดสอบตัวแปรเต็มที่ 0.2 ถึง 51 mm/min



(ก) (ข)

รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างกับเครื่อง (ก) และกราฟ Flexural stress (ข) [5]

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอน

นำดินตะกอนเข้าเตาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินตะกอนที่อบเสร็จแล้วมาทุบด้วยค้อนให้ละเอียด แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรง เบอร์4



(ก) (ข)

รูปที่ 5 ดินตะกอนกว๊านพะเยา (ก) และดินตะกอนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ข)

3.3.4 การเตรียมเส้นใยข้าวโพด

จากวิธีเชิงประสบการณ์พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแยกเส้นใยข้าวโพดจากเปลือกที่เหมาะสมคือการใช้สารละลาย NaOH 1.4 g/L ในอัตราส่วนเส้นใยต่อน้ำ 1:20 MLR ที่ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้

ต้มน้ำปริมาณ 20 ลิตรที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผสมกับโซดาไฟ 1.40 กิโลกรัม แล้วนำเปลือกข้าวโพด ปริมาณ 1 กิโลกรัมผสมลงในถัง คนเปลือกข้าวโพดย่อยตัว พัก 30 นาที แล้วน้ำที่ต้มเสร็จมาล้างน้ำผ่านกระชอนกรองสะอาด นำเส้นใยเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น



(ก) (ข)

รูปที่ 6 เปลือกข้าวโพดหลังจากตัด (ก) และเส้นใยเปลือกข้าวโพด (ข)

3.3.5 การผสมตัวอย่าง

นำดินตะกอนที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาร่อนผ่านตะแกรง เบอร์4 และทำการเตรียมส่วนผสมโดยการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 7% เส้นใยที่มีความ ยาว 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร ดังตารางที่3 ดำเนินการผสมโดยทำการผสมดินและปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน

เติมน้ำและ ผสมดิน-ซีเมนต์-น้ำ ให้เข้ากัน จากนั้นจึงผสมเส้นใยข้าวโพดที่เตรียมไว้โดยกระจายเส้นใยข้าวโพดให้ทั่วถึงไม่จับกลุ่มเป็นก้อน



รูปที่ 7 ส่วนผสมดินซีเมนต์และเส้นใยเปลือกข้าวโพด

นำส่วนผสมไปบดอัดในโมล ขนาด 10 เซนติเมตร x 40 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร แบ่งเป็น 3 ชั้นบดอัดครั้งละ 173 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 8

ทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมงและนำตัวอย่างออกจากโมลทำการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อบ่มตัวอย่างไม่ให้สูญเสียความชื้น เป็นเวลา 7 วัน และ 28วัน



รูปที่ 8 การบดอัดตัวอย่างในโมลเหล็ก

3.4 ทำการทดสอบ

3.4.1. การทดสอบกำลังรับแรงดัด Flexural Test [ASTM D790]

หลังจากอายุบ่มครบแล้วทำการแกะแรปที่พันรอบตัวอย่างและทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความลึก วัดบริเวณ หัว กลาง ท้าย นำค่ามาเฉลี่ย เพื่อใช้ในการคำนวณและนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ

จากนั้นทำการจัดเตรียมเครื่องทดสอบ Triaxial Load Fames TRITECH 50 kN และติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่ตัวเครื่องทดสอบ จึงทำการติดอุปกรณ์เสริมกับตัวอย่างที่เตรียมไว้โดยใช้วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ขนาด 5 kN และติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวในแนวดิ่ง(Dail Gauge) ให้ตรงเลขศูนย์ก่อนเริ่มการทดสอบ

ทำการทดสอบโดยอาศัยการควบคุมการทรุดตัว (Strain Control)และวัดผลของแรงที่เกิดขึ้นของ Proving Ring กำหนดความเร็วอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที จะทดสอบจนกว่าตัวอย่างจะวิบัติ

หลังจากการวิบัตินำตัวอย่างที่วิบัติแล้วมาทำการทุบ และเตรียมกระป๋อง 3 กระป๋อง ชั่งน้ำหนักกระป๋องเปล่า นำตัวอย่างที่ทุบได้มาใส่กระป๋องชั่ง และนำตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างเข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาหา water content (W%) ในตัวอย่าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 การติดตั้งตัวอย่างกับเครื่อง (ก) และการติดตั้งอุปกรณ์กับตัวอย่าง (ข)



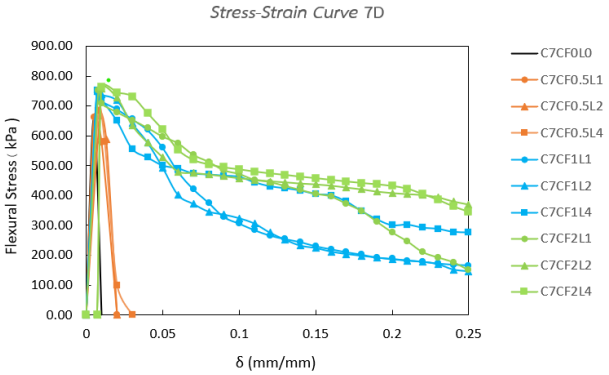
รูปที่ 10 ตัวอย่างการทดลองที่เกิดการวิบัติ

4. ผลการทดสอบและอภิปลายผลการทดลอง

4.1 การทดสอบ

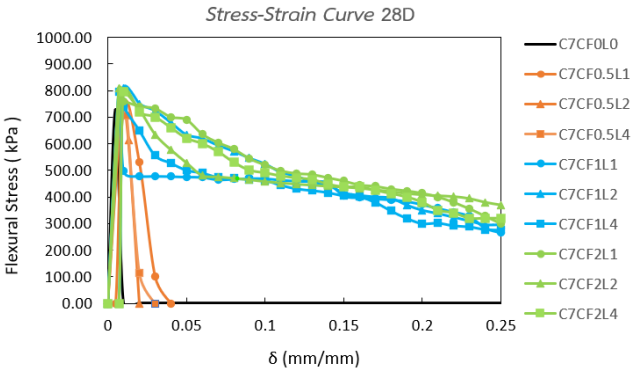
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด (Stress-Strain Curve)

การทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน จากรูปที่11 เส้นใยเปลือกข้าวโพดขนาดความยาว 1 2 และ 4 เซนติเมตร โดยมีอัตราปริมาณเส้นใย เปลือกข้าวโพด 0.5 1.0 และ 2.0% ตามลำดับ พบว่าลักษณะกราฟตัวอย่างปริมาณเส้นใยข้าวโพด 0.5% มีการพัฒนาแรงดัดและความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ปริมาณเส้นใย 1% ความยาว 1 2 เซนติเมตร มีการพัฒนาความเหนียวเพิ่มขึ้น และ ตัวอย่างที่ 1% ความยาว 4 เซนติเมตร และ 2% มีการพัฒนาความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ความเครียดและกำลังรับแรงดัด 7วัน

การทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ระยะการบ่ม 28 วัน รูปที่ 12 พบว่าลักษณะกราฟตัวอย่างปริมาณเส้นใยข้าวโพด 0.5% มีการพัฒนาแรงดัดและความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ปริมาณเส้นใย 1% และ 2% มีการพัฒนาความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

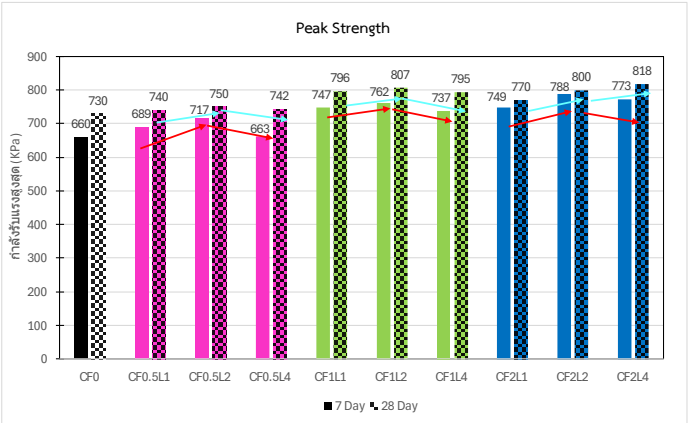


รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ความเครียดและกำลังรับแรงดัด 28 วัน

4.1.2 กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Peak Strength)

รูปที่ 13 คือการทดสอบกำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ระยะการบ่ม 7 วัน ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 0.5% 1.0% และ2.0% กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสม่ำเสมอ พบว่าตัวอย่างที่รับแรงดัดสูงที่สุดคือ เส้นใยเปลือกข้าวโพดขนาดความยาว 2 เซนติเมตร ในตัวอย่าง C7CF2L2 มีกำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 788 kPa เมื่อเพิ่มอัตราปริมาณเส้นใยจาก 1.0% เป็น 2.0% พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น

การทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ระยะการบ่ม 28 วัน ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 0.5% และ1.0% กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างสม่ำเสมอ พบว่าปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 2.0% กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตัวอย่างที่รับแรงดัดสูงที่สุดคือ เส้นใยเปลือกข้าวโพดขนาดความยาว 4 เซนติเมตร ในตัวอย่าง C7CF2L4 มีกำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 818 kPa เมื่อเพิ่มอัตราปริมาณเส้นใยที่ 2% พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดกับเกณฑ์การออกแบบดิน ซีเมนต์ของกรมทางหลวงดังตารางที่ 2 พบว่าตัวอย่างที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 วัน ในทุกตัวอย่างผ่านเกณฑ์ชั้นรองพื้นทางของดินซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2564 ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) ทั้งหมด ดังตารางที่ 2



รูปที่ 13 กราฟกำลังรับแรงดัดสูงสุด

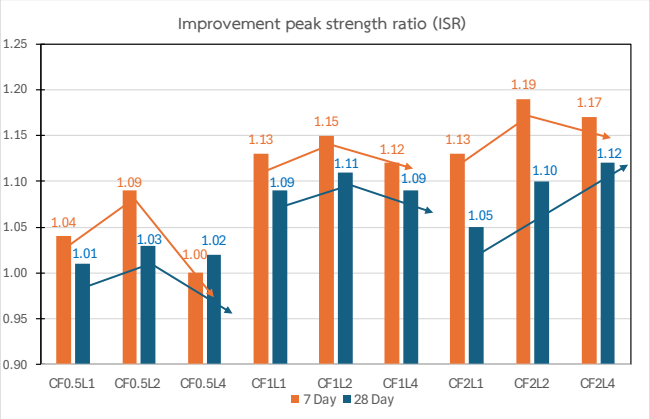
4.1.3 การพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด (Improvement Peak Strength Ratio , ISR)

การพัฒนากำลังรับแรงดัดสูงสุด (ISR) หาได้จากการนำค่า Peak Strength ของอัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5 1.0 และ 2.0% หารด้วย ค่า Peak Strength ของตัวอย่างดินตะกอนที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเปลือกข้าวโพด ถ้า ผลลัพธ์ที่ได้มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่กำลังรับแรงดัดจะพัฒนาเพิ่มขึ้น แต่ถ้าผลลัพธ์มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ากำลังรับแรงดัดลดลงน้อยกว่าตัวอย่างดินตะกอนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยเปลือกข้าวโพด

รูปที่ 14 คือการทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 7 วัน ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 2.0% มีกำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 1.13-1.19 รองลงมาคือปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 1.0% มีกำลังรับแรงดัดสูงที่สุดอยู่ที่ 1.12-1.15 และต่ำที่สุดคือปริมาณเส้นใยที่ 0.5% มีกำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ 1.0-1.09 โดยทั้ง 3 ปริมาณมีแนวโน้มพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างไม่แน่นอน

การทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 28 วัน ปริมาณเส้นใย เปลือกข้าวโพดที่ 2% กำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดอยู่ที่ 1.05-1.12 รองลงมาคือปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 1% มีกำลังรับแรงดัดสูงสุดอยู่ที่ 1.09-1.11 และปริมาณเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดัดที่ต่ำที่สุดคือ 0.5% มีกำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ 1.01-1.03

จากการวิเคราะห์ช่วงค่ากำลังรับแรงดัด พบว่าช่วงระยะการบ่ม 7 วัน และ28 วัน ยิ่งมี ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น

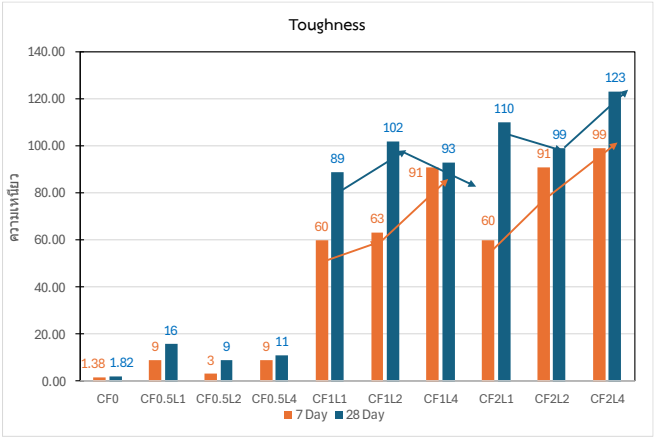


รูปที่ 14 การพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด

4.1.4 ความเหนียว (Toughness)

ในรูปที่ 15 คือการทดสอบที่ระยะการบ่ม 7 วัน ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 60-99 รองลงมาคืออัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% อยู่ในช่วง 60-91และอัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีค่าความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ ในช่วง 3-9 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด สังเกตได้ว่าการผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพดลงไปในตัวอย่างการทดสอบจะมีค่า ความเหนียวเกิดขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงดัดจะไม่ได้สูงขึ้นเมื่อมีค่าความเหนียวที่ เพิ่มขึ้นเท่ากับตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (C7CF0) โดย ตัวอย่างดินตะกอนผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพดมีค่าความเหนียวมากที่สุดคือ ตัวอย่าง C7CF2L4

การทดสอบที่ระยะการบ่ม 28 วัน อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 99-123รองลงมาคือ อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% อยู่ในช่วง 89-102 และปริมาณเส้นใย 0.5% มีค่าความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 9-16 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด ทำให้ตัวอย่างมีค่าความเหนียวมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีเส้นใย (C7CF0) ซึ่งตัวอย่างผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่มีค่าความเหนียวมากที่สุดคือ ตัวอย่าง C7CF2L4

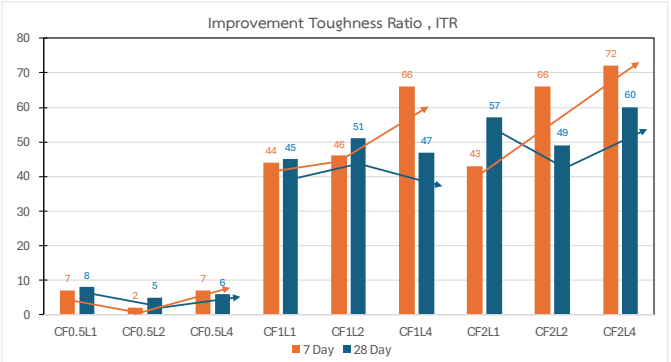


รูปที่ 15 กราฟความเหนียว

4.1.5 การพัฒนาความเหนียว (Improvement Toughness Ratio , ITR)

รูปที่ 16 คือการทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีช่วงการพัฒนาความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 43 -72 รองลงมาคืออัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1% อยู่ในช่วง 44 - 66 และปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีช่วงการพัฒนาความเหนียวที่ต่ำ ที่สุดอยู่ในช่วง 2-7 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หลังจากเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 28 วัน ปริมาณเส้นใย เปลือกข้าวโพด 2.0% มีช่วงการพัฒนาความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 49-60 รองลงมาคืออัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% อยู่ในช่วง 45-51 และ อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีช่วงการพัฒนาความเหนียวที่ต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 5-8 เห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มไม่แน่นอนด้านการพัฒนาความเหนียวสูงสุด



รูปที่ 16 กราฟการพัฒนาความเหนียว

จากการวิเคราะห์พบว่า กราฟการพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด (ISR) กราฟความเหนียว (TI) และกราฟการพัฒนาความเหนียว (ITR) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ในช่วงระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ในทุกๆค่าจะมีค่าแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด ส่วนในระยะการบ่มของ 28 วัน มีแนวโน้ม ที่ไม่แน่นอน ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากเส้นใยกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่าง และการกระจุกตัวของเส้นใยเปลือกข้าวโพด จากการพิจารณาการวิบัติของตัวอย่างที่รับกำลังแรงดัดมีลักษณะการเฉือนที่ 45 องศา และมีการวิบัติในแนวเส้นตรง พบว่าเกิดความไม่แน่นอน ในการวิบัติในด้านกำลังรับแรงดัด โดยเส้นใยบางตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เส้นใยตรงกลางเส้น และมีบางตัวอย่างเกิดการวิบัติที่เส้นใยปลายเส้น การพิจารณาการวิบัติของตัวอย่างที่รับกำลังแรงดึง พบว่ามีการกระจายตัว ของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอและมีการวิบัติแบบสุ่ม เนื่องจากความยาว ของเส้นใยเปลือกข้าวโพดต่างกัน และลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยไม่เป็น เส้นตรงตามแนวการวิบัติ ทำให้เกิดช่องว่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสาเหตุ ดังกล่าวมักเกิดขึ้นในกรณีที่การผสมเส้นใยในวัสดุประกอบซึ่งจะเกิดการกระจาย ตัวแบบสุ่ม (Random Distribution)

4.1.6 ดัชนีความเหนียว (Toughness Index ,TI)

$$TI_{FT} = \frac{E_{CTSF(FT)}}{2q_{f(CTSF)}}$$

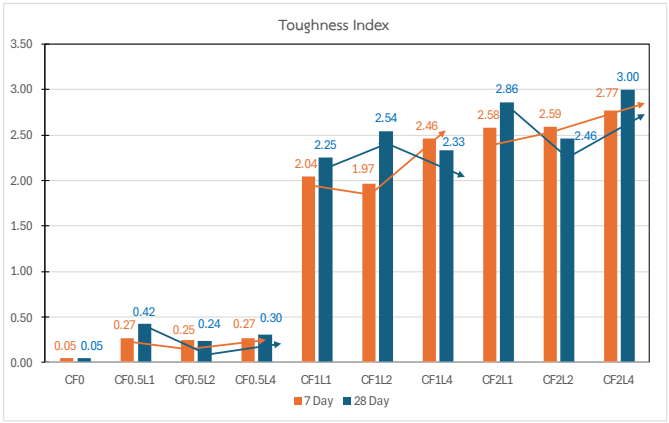
เมื่อ TI_{FT} คือ ดัชนีความเหนียว (Toughness Index)

$E_{CTSF(FT)}$ คือ คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด

qf(CTSF) คือ ค่ากำลังรับแรงสูงสุดในแต่ละการทดลอง

รูปที่ 17 คือการทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าดัชนีความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 2.58-2.77 ซึ่งมีค่าดัชนีความเหนียวสูงสุดรองลงมาคืออัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% ที่มีช่วงระหว่าง 1.97-2.46 และอัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีค่าดัชนีความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.25-0.27 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเปลือกข้าวโพด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 28 วัน อัตราปริมาณ เส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าดัชนีความเหนียวที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 2.46-3.00 รองลงมาคือ อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด1.0% อยู่ในช่วง 2.25-2.54 และ อัตราปริมาณเส้นใย 0.5% มีค่าดัชนีความเหนียวที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.24-0.42 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของกราฟคล้ายระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 17 กราฟดัชนีความเหนียว

4.1.7 ค่าความเปราะ (Brittleness Index ,BI)

$$BI_{FS} = 1 - \frac{q_{f,\delta=2mm}}{q_f}$$

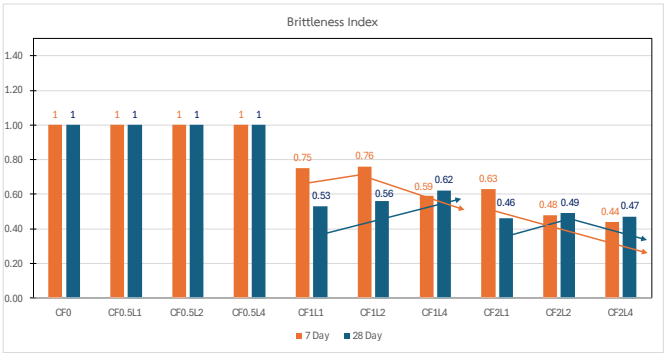
เมื่อ BI_{FS} คือ ดัชนีความเปราะของวัสดุ (Brittleness In-

q_f คือ กำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุที่วัดได้จากการทดสอบ (Peak Strength)

$q_{f,\delta=2mm}$ คือ กำลังรับแรงของวัสดุเมื่อมีการเสียรูป (deformation) เท่ากับ 2 มม.

รูปที่ 18 คือการทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 7 วัน อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีค่าความเปราะที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 1 รองลงมาคือปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% ในช่วง 0.59-0.76 กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและอัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าความเปราะที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.48-0.63 กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลง

การทดสอบกำลังรับแรงดัดระยะการบ่ม 28 วัน อัตราปริมาณ เส้นใยเปลือกข้าวโพด 0.5% มีค่าความเปราะที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 1 รองลงมาคือ อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 1.0% ในช่วง 0.53-0.62 และ ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2.0% มีค่าความเปราะที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.46- 0.49 กราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด



รูปที่ 18 กราฟค่าความเปราะ

4.2.2 เกณฑ์การให้คะแนนจากการประเมินผลตัวแปรด้านกำลัง

จากการทดสอบทั้งหมด พบว่าวัสดุมีความสัมพันธ์ด้านกำลัง ทั้งกำลังรับ แรงอัด ความเหนียวและความเปราะที่ไม่แน่นอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้การ ประเมินผลตัวแปรด้านกำลังเพื่อใช้ในการคัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมในนำมาใช้ในวัสดุพื้นทาง

ตารางที่ 6 สรุปคะแนนประสิทธิภาพโดยรวมของวัสดุ [5]

คะแนนเฉลี่ยจากคะแนนทั้งหมด	คะแนนประสิทธิภาพโดยรวม
90 – 100	ยอดเยี่ยม
80 – 89	ดีมาก
70 – 79	ดี
60 – 69	ค่อนข้างดี
50 – 59	พอใจ
40 – 49	แย่
น้อยกว่า 39	แย่มาก

ตารางที่ 7 สรุปคะแนนประสิทธิภาพรองสำหรับแต่ละส่วนผสม ระยะการบ่ม 7 วัน

Mix	ISR	BI	ITR	TI	Score
C7CF0.5L1	96.62	47.83	9.09	11	38.9
C7CF0.5L2	96.27	47.83	3.26	10.24	36.59
C7CF0.5L4	100	47.83	9.14	9.03	39.39
C7CF1L1	94.87	62.22	60.75	71.16	75.59
C7CF1L2	93.88	62.21	63.87	68.25	75.33
C7CF1L4	90.43	78.04	91.89	88.49	90.72
C7CF2L1	94.23	63.79	60.31	100	84.85
C7CF2L2	91.95	99.16	91.98	92.29	92.07
C7CF2L4	96.62	100	100	95.06	97.23

ตารางที่ 8 สรุปคะแนนประสิทธิภาพรองสำหรับแต่ละส่วนผสม ระยะการบ่ม 28 วัน

Mix	ISR	BI	ITR	TI	Score
C7CF0.5L1	91.3	45.9	14.1	14.8	40.1
C7CF0.5L2	92.6	45.9	8.1	8.4	36.3
C7CF0.5L4	91.7	45.9	10	10.4	37.4
C7CF1L1	98.3	86.1	81.3	79.3	86.3
C7CF1L2	99.6	81	96.4	96.2	97.4
C7CF1L4	98.1	73.7	84.3	82.3	88.3
C7CF2L1	94.4	100	100	100	98.1
C7CF2L2	100	92.4	90.6	86.9	92.5
C7CF2L4	98.1	87.9	95.1	92.9	95.4

หมายเหตุ : 1. ISR คือ กราฟการพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด
2. BI คือ ค่าความเปราะ
3. ITR คือ การพัฒนาความเหนียว
4. TI คือ ค่าดัชนีความเหนียว

จากกราฟทั้งหมดที่ได้ นำค่าในแต่ละกราฟมาหาค่าเฉลี่ย 100% ยกตัวอย่าง การคำนวณค่า ISR ของ C7CF2L2 7 Days มีค่ามากที่สุด คือ 1.19 เป็นตัวหารกับค่า ISR ของตัวอย่างอื่นๆ ก่อนจะคูณ 100 จะได้ค่าเต็ม 100% ใช้เป็นการคำนวณในทุกๆ ค่า ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นคะแนนเพื่อประเมินผล โดยนำมารวมกันแล้วหา ค่าเฉลี่ยรวม จากการประเมินผลดังกล่าว พบว่าทุกตัวอย่างดังตารางที่ 9 จัดอยู่ใน เกณฑ์แย่มากถึงยอดเยี่ยม จากเกณฑ์การประเมินผลในตารางที่ 6 ในระยะการบ่มใน 7 วัน มีค่ามากที่สุดคือค่าของ C7CF2L4 ดังตารางที่ 7 และระยะการบ่ม 28 วันที่มากที่สุดคือ C7CF2L1 ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 9 สรุปคะแนนประสิทธิภาพรองสำหรับแต่ละส่วนผสม

Mix	7 Days	28 Days	Score
C7CF0.5L1	38.9	40.1	39.5
C7CF0.5L2	36.59	36.3	36.4
C7CF0.5L4	39.39	37.4	38.4
C7CF1L1	75.59	86.3	80.9
C7CF1L2	75.33	97.4	86.5
C7CF1L4	90.72	88.3	89.5
C7CF2L1	84.85	98.1	91.5
C7CF2L2	92.07	92.5	92.3
C7CF2L4	97.23	95.4	96.3

จากนั้นนำผลทั้ง 7 และ 28 วัน มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อหาตัวอย่างที่เหมาะสมนำมาใช้งานพื้นทางมากที่สุด พบว่าตัวอย่าง ดินตะกอนผสมซีเมนต์และผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งานคือ C7CF2L4

5. บทสรุป

การทดสอบแรงดัด (Flexural test) ค่ากำลังรับแรงดัดในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีค่าที่สูงที่สุดคือตัวอย่างขนาดความยาวเส้นใย 4 เซนติเมตร ที่อัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2% แต่เมื่อเพิ่มอัตราปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยขนาดความยาวของเส้นใยเปลือกข้าวโพดส่งผลต่อค่าการพัฒนากำลังรับแรงดัดเช่นเดียวกันกับค่าความเหนียวในระยะการบ่ม 28 วัน มีค่าความเหนียวที่ดีที่สุดคือขนาดความยาวเส้นใย 4 เซนติเมตร และปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 2% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดมากขึ้นจะส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดความยาวของเส้นใยเปลือกข้าวโพดส่งผลต่อการพัฒนาความเหนียว

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจากประเมินผลตัวแปรด้านกำลัง คือตัวอย่างที่ผสมซีเมนต์ 7% ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด 2% และมีขนาดความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด 4 เซนติเมตร (C7CF2L4) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอดเยี่ยมสำหรับใช้ในงานปรับปรุงดินตะกอนกว๊านพะเยาโดยวิธีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด

กิตติประกาศ

ผู้เขียนกราบขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษานาย พิสิษฐ์ ผลาสิงห์ ที่คอยช่วยเหลือชี้แนะให้คำแนะนำตลอดจนถึงการแก้ไขข้อบกพร่องในการศึกษา การดำเนินงานการปฏิบัติการทดสอบ รวมทั้งการให้คำที่ปรึกษาในการจัดการทำการศึกษา ด้วยความเอาใจใส่ และสนับสนุนทุกๆด้านอย่างเสมอตั้งแต่เริ่มต้น จนจบการปฏิบัติการทดสอบและการเขียนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์สำเร็จได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ในการสนับสนุนทุนทรัพย์การศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์และให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบ สถานที่ และวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาทดสอบ ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ของทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอมอบคุณค่าและคุณประโยชน์จากการศึกษาฉบับนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกๆท่าน ถ้าหากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือบกพร่องประการใดผู้เขียนขอน้อมรับไว้ และหวังอย่างยิ่งว่าการศึกษางานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมส่งเสริมการเกษตร. (2564). ผลผลิตสินค้าเกษตรเศรษฐกิจ 5 อันดับแรก ปี 2564. กรมส่งเสริมการเกษตร. **https://misapp.oae.go.th/area/ภูมิภาคทางการเกษตร/ภาพเหนือ**

[2] พันธวัฒน์ เศรษฐ์วิไล. (2021). ไขปริศนาฝุ่นควัน-ไฟป่าภาคเหนือมาจากไหน ทำไมค่าฝุ่น PM2.5 ถึงติดอันดับโลกมานานหลายปี https://thestandard.co/northern-bush-fire-mystery/

[3] การทดสอบมาตรฐาน ASTM C1609 สำหรับสมรรถนะการดัดงอของคอนกรีตเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ https://www.laboratuar.com/th/testler/astm-testleri/

[4] จักราวุธ ตันสกุล (2561) การปรับปรุงพฤติกรรมหลังการวิบัติของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

[5] Prinya Chindaprasirt. Pitthaya Jamsawang. Piti Sukontasukkul. Pornkasem Jongpradist. Suched Likitlersuang. (2021). Comparative mechanical performances of cement-treated sand reinforced with fiber for road and pavement applications. Transportation Geotechnics, 30, 100626.

[6] ภัทรานันท์ แวงวรรณ. วัลภา แต้มทอง. สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ. (2021). แผ่นเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55.

[7] ธัชชัย ใหม่ขันท์. (2560). การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอน กว๊านพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย

[8] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.(nd.) เรื่อง ข้าวโพด.กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กันยายน 2561

[9] กรมทางหลวง. (2564). มาตรฐานชั้นทางดินซีเมนต์ 204/2564. กรมทางหลวง.

1

2

3

4

5

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน

A study on compressive strength of recycled aggregate concrete mixed with Para wood ash and graphene

นายชยพัทธ์ วงศ์แก้ว[1] นายชลสิทธิ์ พูลสมบัติ[2] นายณัฐธัญ มะลิกร[3] นายคมสันต์ ทัดแก้ว[4] และ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง[5]

[1,2,3,4] นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[5]อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
Corresponding author; E-mail address: 64101462@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้ายางหนักเป็นวัสดุทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์และการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์กำลังอัดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนักถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 10% โดยปริมาตรในขณะที่ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลถูกใช้ทดแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติในอัตราส่วน 0%, 50% และ 100% โดยปริมาตรตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีการเติมกราฟีนในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0% ถึง 0.06% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อประเมินอิทธิพลของกราฟีนต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จากผลการทดสอบพบว่า การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนักส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณที่ใช้ ในขณะที่กราฟีนมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในด้านการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้าง ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นตามสัดส่วนของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น

Abstract

This research aims to study the impact of using waste tire ash as a partial replacement for cement and recycled concrete aggregate (RCA) as a substitute for natural coarse aggregate in concrete mixtures. The focus is on analyzing the compressive strength of concrete incorporating RCA and waste tire ash. Waste tire ash was used to replace Portland cement at a proportion of 10% by volume, while RCA was used to replace natural coarse aggregate at proportions of 0%, 50%, and 100% by volume, respectively. Additionally, graphene was added in varying amounts ranging from 0% to 0.06% by the weight of cement to evaluate its influence on the compressive strength of concrete containing RCA. The test results revealed that the use of RCA and waste tire ash caused a reduction in the compressive strength of concrete, depending on the proportions used. In contrast, graphene played a significant role in enhancing the compressive strength of concrete, particularly by promoting the hydration reaction and increasing the density of the structure. As a result, the concrete exhibited higher strength with increasing proportions of graphene.

คำนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

การก่อสร้างในประเทศไทยกำลังขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากมีความทนทานและรองรับน้ำหนักได้ดี แต่การใช้หินธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น การขุดเจาะหินในพื้นที่ป่าไม้ ซึ่งส่งผลต่อภาวะเรือนกระจกและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งหิน [1]

การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากวัสดุก่อสร้างเก่า เช่น เศษคอนกรีตที่ทุบจากอาคารเก่า จึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการลดการใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลช่วยประหยัดต้นทุนและลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ การศึกษาแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลอาจมีกำลังอัดลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงมีความทนทานหากบ่มในระยะเวลานานขึ้น [2]

การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจำเป็นต้องตรวจสอบทั้งด้านกลศาสตร์และเคมี เช่น กำลังอัดและความทนทานต่อการซึมน้ำ เพื่อให้มั่นใจว่าเหมาะสมกับการใช้งานในงานก่อสร้างต่าง ๆ นอกจากนี้ การพัฒนากระบวนการแปรสภาพมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจะช่วยให้สามารถนำไปใช้งานได้ยั่งยืน [1] จึงเป็นที่มาของการศึกษาในโครงการวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น อุณหภูมิสูงหรือความชื้นสูง จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาและปรับปรุงการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลให้เหมาะสมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

1.2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกราฟีนที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อกำลังอัดคอนกรีต

1.3. ขอบเขตการศึกษา

1. อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนัก คือ ร้อยละ 0 และ 10 โดยปริมาตรตามลำดับ
2. อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล คือ ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยปริมาตรตามลำดับ

3. อัตราส่วนการใช้กราฟีน คือ ร้อยละ 0, 0.015, 0.03, 0.045 และ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ
4. ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ คือ เบอร์ 3/4 นิ้ว
5. ตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ขนาด15x15x15 cm^3 ทำการทดสอบที่ 7 และ 28 วัน
6. เถ้ายางหนักได้จากโรงงานไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล
7. การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ตาม มาตรฐาน ASTM C188-17 [3], ASTM C127-15 [4], ASTM C128-22 [5] และ ASTM C136-06 [6]
8. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน BS 1881 [7]

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลต่อกำลังอัดคอนกรีต
2. ทราบถึงอิทธิพลการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักต่อกำลังอัดคอนกรีต
3. ทราบถึงอิทธิพลอัตราส่วนการใช้กราฟีนต่อกำลังอัดของคอนกรีต
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการนำไปใช้งานในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เป็นการรณรงค์ให้เกิดการนำวัสดุรีไซเคิลกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ส่งผลให้เกิดการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในอนาคต

1.5. แผนการดำเนินการ

แผนการดำเนินการสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน							
	6	7	8	9	10	11	12	1
1.ศึกษาค้นคว้า และออกแบบส่วนผสม	■							
2.เตรียมวัสดุต่างๆเพื่อในการทดสอบ	■	■						
3.ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน		■	■	■				
4.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง				■				
5.จัดทำรูปเล่ม และนำเสนอรายงานผล					■	■	■	■

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีกำลังอัดเป็นแนวคิดที่อธิบายถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงอัด โดยในกรณีของคอนกรีต กำลังอัดทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้ความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งวัดจากความสามารถของคอนกรีตในการทนต่อแรงที่กระทำในแนวดิ่งจนกระทั่งเกิดการแตกหักหรือเสียรูป ความแข็งแรงในการรับแรงอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น องค์ประกอบของส่วนผสม ปริมาณปูนซีเมนต์ มวลรวม น้ำ สารเติมแต่ง และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกระบวนการก่อตัวของกำลังอัดของวัสดุ [8]

การบ่มคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น การควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ จะช่วยให้คอนกรีตพัฒนากำลังอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ อายุของคอนกรีตก็มีผลต่อกำลังอัด โดยเฉพาะในช่วง 28 วันแรก ซึ่งคอนกรีตจะเพิ่มความแข็งแรงอย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา[8]

ชนิดของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต นอกจากองค์ประกอบและสภาวะการบ่มแล้ว มวลรวมธรรมชาติและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะในการรับแรงอัดของคอนกรีต การทดสอบกำลังอัดสามารถทำได้โดยการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงก้อนลูกบาศก์หรือทรงกระบอก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ทั้งในงานวิจัยและการก่อสร้าง เพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการต้านทานแรงอัดของคอนกรีต [1]

3. ระเบียบวิจัย

3.1. วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement) *หินแกรนิต #3/4 (Stone)*

ทราย #4 (Sand) *เถ้ายางหนัก #200*

มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) *กราฟีน (Graphene)*



น้ำยาซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

จากการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยสามารถสรุปได้ดังตารางที่2 โดยอายศัยมาตรฐาน 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	PWA
ความถ่วงจำเพาะ (SG)	3.15	2.59	2.69	2.46	2.82
การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.72	0.88	6.51	-
ความหนาแน่นรวม (kg/m^3)	1,400	2,579	2,688	2,453	2,821
ดัชนีความละเอียด (FM)	-	2.80	-	-	-

สัญลักษณ์ในตารางที่ 2 และ 3 ได้แก่ C คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์; W คือ น้ำ; S คือ ทราย; NCA คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ; RCA คือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; PWA คือ เถ้ายางหนัก; SZ คือน้ำยาซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์; และ GO คือ กราฟีน

3.2. วิธีการวิจัย

3.2.1. ขั้นตอนการเตรียมกราฟีน ดังตารางในรูปที่ 2

1. เตรียมกราฟีนตามอัตราส่วน
2. ผสมสารโดยใช้แม่เหล็ก 24 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องกวนสารละลาย
3. ทำให้กราฟีนแตกตัวโดยคลื่นอัลตราโซนิก 1 ชั่วโมงก่อนนำไปผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ





รูปที่ 2 การเตรียมกราฟีน

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีต

ลำดับ	ส่วนผสม	C	W	S	NCA	RCA	PWA	SZ	GO
		(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
1	C100P0N100R0G0	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0
2	C100P0N100R0G1	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.05
3	C100P0N100R0G2	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.10
4	C100P0N100R0G3	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.15
5	C100P0N100R0G4	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.20
6	C90P10N100R0G0	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0
7	C90P10N100R0G1	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.05
8	C90P10N100R0G2	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.10
9	C90P10N100R0G3	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.15
10	C90P10N100R0G4	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.20
11	C90P10N50R50G0	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0
12	C90P10N50R50G1	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.05
13	C90P10N50R50G2	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.10
14	C90P10N50R50G3	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.15
15	C90P10N50R50G4	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.20
16	C90P10N0R100G0	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0
17	C90P10N0R100G1	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.05
18	C90P103N0R100G2	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.10
19	C90P10N0R100G3	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.15
20	C90P10N0R100G4	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.20

3.2.2. การทดสอบกำลังอัด

1. ผสมคอนกรีตโดยอาศัยส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นใส่ส่วนผสมในเครื่องโม่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การผสมโดยเครื่องโม่

2. ทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143-78 [9] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต

3. ควรนำคอนกรีตเข้าแบบ (ขนาด 15X15X15 cm^3) โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยแท่งเหล็ก 25 ครั้ง และทิ้งตัวอย่างไว้ในแบบ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5



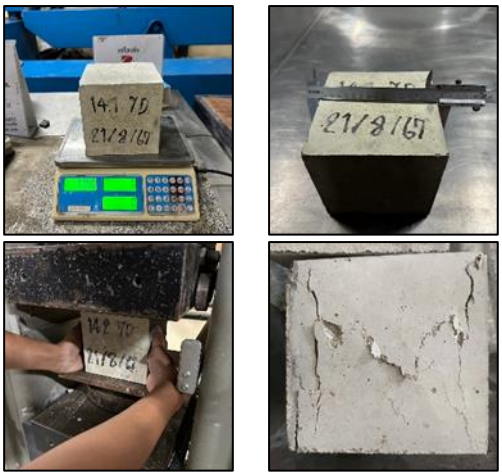
รูปที่ 5 การนำคอนกรีตที่ผสมเข้าแบบ

4. บ่มคอนกรีตในน้ำสะอาดเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต

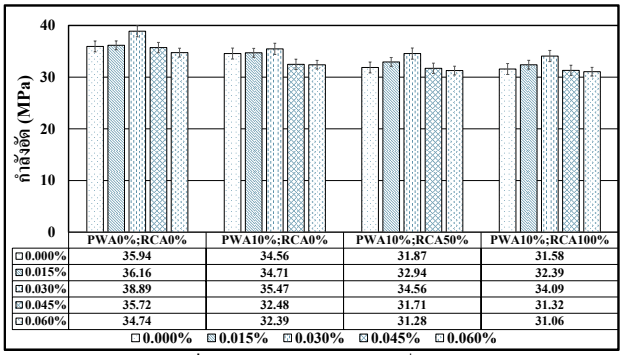
5. ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตอายุ 7 วัน และ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน BS 1881 [5] ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังอัด

4. ผลการทดสอบ

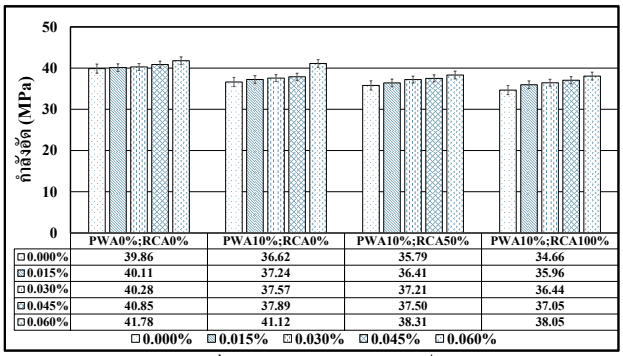
ในการทดสอบสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 4 และ รูปที่ 8 และ 9



	PWA0%;RCA0%	PWA10%;RCA0%	PWA10%;RCA50%	PWA10%;RCA100%
0.000%	35.94	34.56	31.87	31.58
0.015%	36.16	34.71	32.94	32.39
0.030%	38.89	35.47	34.56	34.09
0.045%	35.72	32.48	31.71	31.32
0.060%	34.74	32.39	31.28	31.06

0.000% 0.015% 0.030% 0.045% 0.060%

รูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 7 วัน



	PWA0%;RCA0%	PWA10%;RCA0%	PWA10%;RCA50%	PWA10%;RCA100%
0.000%	39.86	36.62	35.79	34.66
0.015%	40.11	37.24	36.41	35.96
0.030%	40.28	37.57	37.21	36.44
0.045%	40.85	37.89	37.50	37.05
0.060%	41.78	41.12	38.31	38.05

0.000% 0.015% 0.030% 0.045% 0.060%

รูปที่ 9 ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 28 วัน

ตารางที่ 4 สรุปค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด 7 และ 28 วัน

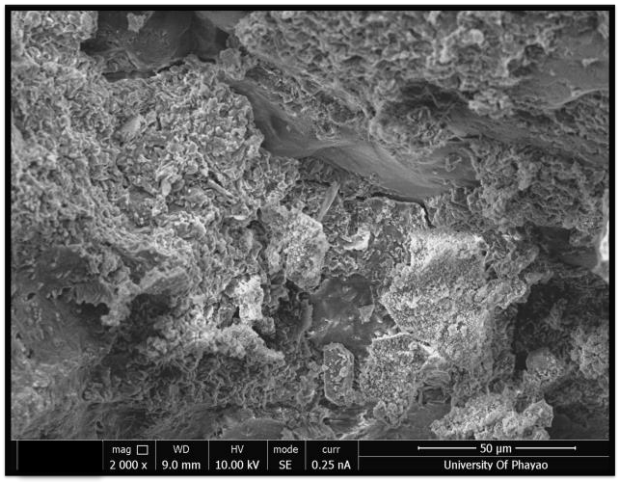
ส่วนผสม	กำลังเฉลี่ย (MPa)	
	7 วัน	28 วัน
C100P0N100R0G0	35.94	39.86
C100P0N100R0G1	36.16	40.11
C100P0N100R0G2	38.89	40.28
C100P0N100R0G3	35.72	40.85
C100P0N100R0G4	34.74	41.78
C90P10N100R0G0	34.56	36.62
C90P10N100R0G1	34..71	37.24
C100P0N100R0G2	35.47	37.57
C90P10N100R0G3	32.48	37.89
C90P10N100R0G4	32.39	41.12
C90P10N50R50G0	31.87	35.79
C90P10N50R50G1	32.94	36.41
C90P10N50R50G2	34.56	37.21
C90P10N50R50G3	31.71	37.50
C90P10N50R50G4	31.28	38.31
C90P10N0R100G0	31.58	34.66
C90P10N0R100G1	32.39	35.96
C90P10N0R100G2	34.09	36.44
C90P10N0R100G3	31.32	37.05
C90P10N0R100G4	31.06	38.05

การศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมกับเถ้ายางหนักแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติในคอนกรีต และการผสมกราฟีนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่ากราฟีนมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตตามระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน ในการบ่มคอนกรีต 7 วัน การใช้กราฟีนในสัดส่วน 0.03% สามารถส่งเสริมการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ อย่างชัดเจน เมื่อการบ่มขยายไปถึง 28 วัน การใช้กราฟีนในสัดส่วนที่สูงขึ้นที่ 0.06% ส่งผลให้กำลังอัดสูงสุด เนื่องจากกราฟีนไม่เพียงแต่ช่วยเร่งการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแค่ในช่วง 7 วันแรก แต่ยังช่วยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วง 28 วัน โดยปริมาณกราฟีนที่ 0.06% ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นและให้กำลังอัดที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10

อย่างไรก็ตาม การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมกับเถ้ายางหนักแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น แม้ว่ากราฟีนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้แต่การแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยวัสดุรีไซเคิลทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากวัสดุรีไซเคิลอาจไม่สามารถให้ความแข็งแรงเทียบเท่ากับมวลรวมหยาบธรรมชาติ

โดยรวมแล้ว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากราฟีนมีศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะในด้านกำลังอัดเมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องพิจารณาผลกระทบจากการใช้วัสดุรีไซเคิลที่อาจลดความแข็งแรงของคอนกรีตในระดับหนึ่ง

จากรูปที่ 10 ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่ากราฟีนมีส่วนสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยการกระตุ้นและเร่งกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หลักการดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากบทบาทของกราฟีนในการเสริมสร้างการเชื่อมต่อของโครงสร้างในระดับนาโน ส่งผลต่อความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุในระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน ทั้งในช่วง 7 วันแรกและในระยะยาว 28 วัน



รูปที่ 10 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

บทสรุป

การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น ในช่วง 7 วันแรก การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่สัดส่วน 50% และ 100% ให้กำลังอัดใกล้เคียงกัน แต่กำลังอัดยังคงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 0% อย่างชัดเจน เมื่อคอนกรีตบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยกำลังอัดลดลงอย่างคงที่เป็นขั้นบันได แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ส่งผลลดทอนความแข็งแรงของคอนกรีตในระยะยาว

ในส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนัก พบว่าการใช้เถ้ายางหนักในสัดส่วน 0% และ 10% ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกันอย่างมาก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้ายางหนักมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้ายางหนักอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้เถ้ายางหนักอาจลดทอนคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไป

กราฟีนที่สัดส่วน 0.03% มีผลดีต่อกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น โดยช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าวและเพิ่มกำลังอัดในช่วงแรกอย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ช่วง 28 วัน การใช้กราฟีนที่สัดส่วน 0.06% กลับให้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น เนื่องจากกราฟีนช่วยเร่งและเสริมปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแน่นหนามากขึ้นและกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย บทบาทสำคัญของกราฟีนนี้ช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

สรุปได้ว่า การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนักส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณที่ใช้ ในขณะที่กราฟีนมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในด้านการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้าง ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นตามสัดส่วนของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น

อ้างอิง

[1] T. Xie, G. Yang, X. Zhao, J. Xu, C. Fang, A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials, J. Clean. Prod., 251 (2020), Article 119752.

[2] N. Damrongwiriyanupap, T. Srikhamma, C. Plongkrathok, T. Phoo-ngernkham, W. Sae-Long, S. Hanjitsuwan, P. Sukontasukkul, L.-Y. Li, P. Chindaprasirt, Assessment of equivalent substrate stiffness and mechanical properties of sustainable alkali-activated concrete containing recycled concrete aggregate, Case Stud. Constr. Mater., 16 (2022), Article e00982.

[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 Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, USA, 2023.

[6] ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, USA, 2015.

[7] BS 1881, Testing Concrete, Part 131: Methods for Testing Cement in A Reference Concrete, British Standards Institution Publication, England, 1983.

[8] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete Constr. Build. Mater., 27 (2012), 439-449.

[9] ASTM C143-78, Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1978.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการทดลองของตัวอย่าง 7 วัน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ 7 วัน

ลำดับ	สัญญาลักษณ์	Slump	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	แรงกด	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)			(cm^2)	(m^3)	(kg/m^3)	(ton)	(MPa)	(MPa)
NO.1	C100P0N100R0G0	19.3	7.99	14.80	15.00	15.10	223.48	0.0335	238.35	79.30	34.81	35.94
			8.22	15.10	15.00	15.10	226.50	0.0342	240.34	87.52	37.91	
			8.06	15.10	15.00	15.00	225.00	0.0340	237.23	80.53	35.11	
NO.2	C100P0N100R0G1	18.5	7.94	15.00	14.90	15.10	226.50	0.0337	235.27	83.82	36.30	36.16
			8.02	15.20	15.00	15.10	229.52	0.0344	232.95	83.67	35.76	
			8.16	15.10	15.10	15.00	226.50	0.0342	238.59	84.10	36.42	
NO.3	C100P0N100R0G2	19.1	8.11	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	238.70	88.06	38.14	38.89
			8.09	15.00	15.10	15.00	225.00	0.0340	238.12	90.76	39.57	
			7.92	14.90	14.90	14.90	222.01	0.0331	239.42	88.14	38.95	
NO.4	C100P0N100R0G3	20.25	7.91	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	232.82	81.98	35.51	35.72
			8.13	14.90	15.10	15.00	223.50	0.0337	240.90	82.55	36.23	
			8.15	15.10	15.20	15.00	226.50	0.0344	236.73	81.78	35.42	
NO.5	C100P0N100R0G4	21.6	8.14	15.00	15.10	14.90	223.50	0.0337	241.20	78.49	34.45	34.74
			8.01	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	238.93	81.55	35.79	
			8.09	15.00	15.10	14.90	223.50	0.0337	239.71	77.43	33.99	
NO.6	C90P10N100R0G0	20	7.85	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	231.05	79.88	34.60	34.56
			7.39	15.10	15.00	15.20	229.52	0.0344	214.65	80.17	34.27	
			7.75	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	229.64	79.85	34.82	
NO.7	C90P10N100R0G1	18.2	7.91	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	235.94	79.95	34.86	34.71
			8.00	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	233.91	80.46	34.62	
			7.91	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	232.82	80.00	34.65	
NO.8	C90P10N100R0G2	18.6	7.87	14.90	15.00	15.00	223.50	0.0335	234.75	82.85	36.37	35.47
			7.88	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	235.05	77.78	34.14	
			7.95	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	235.57	82.33	35.90	
NO.9	C90P10N100R0G3	18.25	7.90	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	230.98	74.54	32.29	32.48
			7.84	14.90	15.00	14.90	222.01	0.0333	235.42	78.68	34.77	
			7.88	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	230.40	70.17	30.39	
NO.10	C90P10N100R0G4	21.8	7.81	15.10	15.10	15.20	229.52	0.0347	225.35	75.31	32.19	32.39
			7.92	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	236.24	80.37	35.04	
			8.01	15.10	15.10	15.00	226.50	0.0342	234.20	69.16	29.95	

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ 7 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญญาลักษณ์	Slump	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	แรงกด	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)			(cm^2)	(m^3)	(kg/m^3)	(ton)	(MPa)	(MPa)
NO.11	C90P10N50R50G0	16.5	7.62	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	224.28	78.58	34.03	31.87
			7.61	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	223.99	73.77	31.95	
			7.67	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	224.26	68.38	29.62	
NO.12	C90P10N50R50G1	19.4	7.74	14.90	15.10	15.10	224.99	0.0340	227.82	76.47	33.34	32.94
			7.79	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	229.29	74.45	32.25	
			7.65	15.00	15.10	15.00	225.00	0.0340	225.17	76.22	33.23	
NO.13	C90P10N50R50G2	18.5	7.70	14.90	15.00	15.00	223.50	0.0335	229.68	78.02	34.25	34.56
			7.83	15.10	14.90	14.90	224.99	0.0335	233.57	78.78	34.35	
			7.76	14.90	14.90	15.00	223.50	0.0333	233.02	79.93	35.08	
NO.14	C90P10N50R50G3	19.8	7.79	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	229.14	75.96	32.90	31.71
			7.92	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	233.11	67.18	29.10	
			7.68	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	229.20	75.52	33.15	
NO.15	C90P10N50R50G4	17.2	7.90	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	234.08	68.16	29.72	31.28
			7.97	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	232.88	75.30	32.40	
			7.90	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	235.65	72.76	31.72	
NO.16	C90P10N0R100G0	8.9	7.59	15.00	15.10	14.90	223.50	0.0337	224.75	70.99	31.16	31.58
			7.57	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	225.80	72.86	31.98	
			7.63	15.00	14.90	14.90	223.50	0.0333	228.97	72.00	31.60	
NO.17	C90P10N0R100G1	7.9	7.69	15.10	14.90	15.00	226.50	0.0337	227.86	75.17	32.56	32.39
			7.71	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	228.37	73.78	32.17	
			7.77	15.00	15.10	15.00	225.00	0.0340	228.64	74.45	32.46	
NO.18	C90P10N0R100G2	7.3	7.67	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	224.26	77.53	33.36	34.09
			7.58	15.10	15.00	14.90	224.99	0.0337	224.45	78.99	34.44	
			7.60	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	223.69	79.56	34.46	
NO.19	C90P10N0R100G3	4.8	7.76	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	226.89	77.04	33.37	31.32
			7.77	15.10	14.90	15.00	226.50	0.0337	230.23	71.59	31.01	
			7.80	15.00	15.00	15.20	228.00	0.0342	228.07	68.73	29.57	
NO.20	C90P10N0R100G4	3.8	7.76	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	226.89	74.65	32.12	31.06
			7.82	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	230.05	67.72	29.33	
			7.75	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	228.23	73.24	31.72	

ผลการทดสอบการทดลองของตัวอย่าง 28 วัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ 28 วัน

ลำดับ	สัญญาลักษณ์	Slump	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	แรงกด	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)			(cm^2)	(m^3)	(kg/m^3)	(ton)	(MPa)	(MPa)
NO.1	C100P0N100R0G0	19.3	7.92	14.90	15.10	14.80	220.52	0.0333	237.85	83.01	36.93	39.86
			7.98	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	238.03	94.84	41.63	
			8.17	15.00	15.10	15.00	225.00	0.0340	240.47	94.13	41.04	
NO.2	C100P0N100R0G1	18.5	8.07	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	235.95	89.15	38.61	40.11
			7.96	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	237.43	93.74	40.87	
			8.01	15.10	15.00	14.90	224.99	0.0337	237.34	93.69	40.85	
NO.3	C100P0N100R0G2	19.1	8.13	14.80	15.10	14.90	220.52	0.0333	244.15	90.01	40.04	40.28
			8.04	15.10	15.00	14.90	224.99	0.0337	238.23	90.56	39.49	
			8.10	15.00	15.10	15.00	225.00	0.0340	238.41	94.73	41.30	
NO.4	C100P0N100R0G3	20.25	8.08	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	236.25	98.08	42.48	40.85
			8.21	15.00	14.90	15.10	226.50	0.0337	243.27	86.58	37.50	
			7.96	15.10	15.00	14.90	224.99	0.0337	235.86	97.64	42.57	
NO.5	C100P0N100R0G4	21.6	8.00	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	237.05	97.06	42.32	41.78
			8.09	14.90	14.90	15.10	224.99	0.0335	241.32	96.08	41.89	
			8.06	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	237.23	94.94	41.12	
NO.6	C90P10N100R0G0	20	7.83	14.90	15.10	15.00	223.50	0.0337	232.01	86.18	37.83	36.62
			7.83	14.90	15.00	14.90	222.01	0.0333	235.12	80.42	35.54	
			7.93	15.10	14.90	15.00	226.50	0.0337	234.97	84.26	36.50	
NO.7	C90P10N100R0G1	18.2	7.81	15.10	14.90	15.10	228.01	0.0340	229.89	86.81	37.35	37.24
			7.54	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	221.93	84.80	36.73	
			7.91	14.90	14.90	15.10	224.99	0.0335	235.95	86.32	37.64	
NO.8	C90P10N100R0G2	18.6	7.79	15.00	14.90	14.90	223.50	0.0333	233.77	79.43	34.86	36.01
			7.86	14.90	15.00	15.00	223.50	0.0335	234.45	80.15	35.18	
			7.84	15.00	14.90	14.90	223.50	0.0333	235.27	86.53	37.98	
NO.9	C90P10N100R0G3	18.25	7.83	15.10	15.10	15.00	226.50	0.0342	228.94	90.50	39.20	37.89
			7.97	15.10	15.10	15.10	228.01	0.0344	231.49	82.52	35.50	
			7.81	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	228.35	90.56	38.96	
NO.10	C90P10N100R0G4	21.8	8.01	14.90	15.00	15.20	226.48	0.0340	235.78	94.50	40.93	41.12
			8.00	14.90	15.00	14.90	222.01	0.0333	240.23	93.15	41.16	
			7.87	15.10	15.10	15.00	226.50	0.0342	230.11	95.31	41.28	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญญาลักษณ์	Slump	น้ำหนัก	กว้าง	ยาว	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	ความหนาแน่น	แรงกด	กำลังอัด	ค่าเฉลี่ย
		(cm)	(kg)	(cm)			(cm^2)	(m^3)	(kg/m^3)	(ton)	(MPa)	(MPa)
NO.11	C90P10N50R50G0	16.5	7.76	14.90	15.00	14.90	222.01	0.0333	233.02	84.87	37.50	35.79
			7.75	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	229.48	78.18	34.09	
			7.74	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	230.87	81.5	35.77	
NO.12	C90P10N50R50G1	19.4	7.71	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	226.78	85.45	37.01	36.41
			7.81	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	232.81	82.29	35.88	
			7.79	15.10	15.00	15.00	226.50	0.0340	229.29	83.88	36.33	
NO.13	C90P10N50R50G2	18.5	7.81	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	231.26	84.57	36.87	37.21
			7.69	15.10	14.90	14.90	224.99	0.0335	229.39	85.96	37.48	
			7.69	14.90	15.00	15.10	224.99	0.0337	227.80	85.52	37.29	
NO.14	C90P10N50R50G3	19.8	7.72	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	227.23	86.87	37.62	37.50
			7.75	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	231.17	85.82	37.42	
			7.70	15.00	15.00	14.90	223.50	0.0335	229.68	85.37	37.47	
NO.15	C90P10N50R50G4	17.2	7.60	15.00	15.00	15.20	228.00	0.0342	222.22	86.45	37.20	38.31
			7.93	14.90	15.10	15.10	224.99	0.0340	233.42	87.56	38.18	
			7.81	14.90	15.10	15.10	224.99	0.0340	229.89	90.70	39.55	
NO.16	C90P10N0R100G0	8.9	7.67	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	227.26	73.43	32.02	34.66
			7.63	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	226.07	86.44	37.69	
			7.81	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	229.87	79.17	34.29	
NO.17	C90P10N0R100G1	7.9	7.82	15.00	14.90	15.00	225.00	0.0335	233.26	79.57	34.69	37.30
			7.70	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	228.15	92.06	40.14	
			7.85	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	229.52	85.57	37.06	
NO.18	C90P10N0R100G2	7.3	7.59	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	224.89	80.89	35.27	36.44
			7.68	15.00	15.00	15.10	226.50	0.0340	226.05	86.30	37.38	
			7.70	15.00	15.10	15.10	226.50	0.0342	225.14	84.68	36.68	
NO.19	C90P10N0R100G3	4.8	7.70	15.10	15.00	15.10	228.01	0.0342	225.14	111.61	48.02	40.89
			7.73	15.20	15.20	15.20	231.04	0.0351	220.20	86.66	36.80	
			7.75	15.10	15.10	15.10	228.01	0.0344	224.98	87.96	37.84	
NO.20	C90P10N0R100G4	3.8	7.77	15.10	15.10	15.00	226.50	0.0342	227.18	88.26	38.23	38.05
			7.81	15.00	15.00	15.00	225.00	0.0338	231.41	86.89	37.88	
			7.77	15.10	15.00	14.90	224.99	0.0337	230.23	87.25	38.04	

การศึกษากำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน

A study on tensile strength of recycled aggregrate concrete mixed with para-wood ash and graphene

ชนัญญู นันตา[1] ณัฐนนท์ นาปรัง[2] สุกฤษฎิ์ กรีอินทอง[3] อัญชิสา ก้อนนาค[4] และ รศ.ดร. วรเทพ แซ่ล่อง[5]

[1,2,3,4]นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[5]อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ายางหนัก และศึกษาอิทธิพลของกราฟีนในอัตราส่วนต่างๆต่อกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต การทดสอบกำลังดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C469 โดยใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ อัตราส่วนร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยปริมาตรตามลำดับ ใช้เถ้ายางหนักที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 โดยปริมาตรตามลำดับ ในขณะที่การศึกษาอิทธิพลของ กราฟีนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 0.015, 0.030, 0.045 และ 0.060 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนักในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าลดลงและการใส่กราฟีนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Abstract

The purpose of this study was to study the effects of natural coarse aggregate substitution, with aggregates of recycled concrete replacing Portland cement with heavy rubber ash, and study the influence of graphene in different ratios. The tensile test is in accordance with ASTM C469, which uses recycled concrete aggregates instead of natural coarse aggregates with ratios of 0, 50, and 100 percent by volume, respectively. Heavy rubber ash is used to replace Portland cement at a ratio of 0 and 10 percent by perimeter, respectively. Meanwhile, the influence of graphene at the ratio of 0, 0.015, 0.030, 0.045, and 0.060 by the weight of cement respectively was studied. According to the test results, when the coarse aggregate is replaced with recycled concrete aggregate and heavy rubber ash in an increased amount, the tensile strength of concrete will be reduced, and the increase in the amount of graphene will result in an increase in the tensile strength of concrete.

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมก่อสร้างมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการใช้วัสดุก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามวัสดุก่อสร้างที่เป็นมวลรวมธรรมชาติ เช่น หิน ทราย กำลังลดลงเรื่อยๆ อันเป็นผลจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักของปัญหาโลกร้อน เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลซึ่งเป็นของเหลือจากการก่อสร้างและการรื้อถอนมาใช้ใหม่เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ นอกจากนี้ การใช้เถ้ายางหนักซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตยาง และกราฟีนซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการเสริมแรงคอนกรีต อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผลิตขึ้นได้

ดังนั้น การศึกษานี้มุ่งเน้นการตรวจสอบกำลังดึงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน เพื่อประเมินความสามารถในการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการใช้งาน ทั้งนี้

เพื่อส่งเสริมการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและตอบสนองความต้องการในการพัฒนาที่ยั่งยืน [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.เพื่อศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

2.เพื่อศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักในอัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

3.เพื่อศึกษาอิทธิพลของกราฟีนที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักคือ ร้อยละ 0 และ 10 โดยปริมาตร ตามลำดับ

2.อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล คือ ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยปริมาตร ตามลำดับ

3.อัตราส่วนการใช้กราฟีน คือ ร้อยละ 0, 0.015, 0.030, 0.045 และ 0.060 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

4.ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ คือ เบอร์ 3/4 นิ้ว

5.ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และ สูง 30 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่ 7 วัน และ 28 วัน

6.เถ้ายางหนักได้จากโรงงานไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล

7.การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ตามมาตรฐาน ASTM C188-17 [2], ASTM C127-15 [3], ASTM C128-22 [4] และ ASTM C136-06 [5]

8.การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C496-96 [6]

9.การทดสอบแบบไม่ทำลายที่อายุตัวอย่าง 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.การใช้ประโยชน์จากเศษเถ้ายางที่เหลือใช้ และเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม

2.ได้ลดปริมาณขยะที่ใช้ในงานก่อสร้าง

3.เพื่อเป็นการลดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากกระบวนการผลิตวัสดุผสมซีเมนต์

1.5 แผนการทำงาน

แผนการดำเนินงานสามารถแสดงได้ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน							
	6	7	8	9	10	11	12	1
1.ศึกษาค้นคว้าและออกแบบส่วนผสม	■							
2.เตรียมวัสดุต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	■	■	■	■	■	■		
3.ทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน	■	■	■	■	■	■		
4.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ							■	
5.จัดทำรูปเล่มและนำเสนอรายงานการทดสอบ								■

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบกำลังดึง (Tensile test) เป็นวิธีการทดสอบหาค่ากำลังดึงของคอนกรีตเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเหล็กเสริมถึงแม้คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงแต่การทราบค่ากำลังดึงจะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิและการหดตัว วิธีการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางนอนเพื่อรับแรงกดตามแนวแกนที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. กว้าง 25 มม. ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่านศูนย์กลางจึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานกำลังดึงบนระนาบแนวแตกร้าวได้ การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีผ่าซีกค่าที่ได้จะสูงกว่าแรงดึงจริงของคอนกรีตประมาณ ร้อยละ 15 สมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

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

3. วิธีการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลักของโครงงานนี้ วิธีดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

วัสดุที่ใช้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1


ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement)


หินแกรนิต #3/4 (Stone)


ทราย #4 (Sand)


เถ้ายางหนัก #200


มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate)


กราฟีน (Graphene)


น้ำยาซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 วิธีการเตรียมวัสดุ (กราฟีน)

1.นำกราฟีนมาผสมกับน้ำตามอัตราส่วนลงในขวดชมพู่ แล้วนำไปวางบนเครื่องคนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำให้กราฟีนกับน้ำผสมเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การผสมกราฟีนกับน้ำด้วยเครื่องคนสาร

2.นำกราฟีนกับน้ำที่ผสมเข้าด้วยกันแล้ว แล้วนำไปใส่ในเครื่องอัลตร้าโซนิคคลีนเนอร์ แล้วหลังจากนั้นเซ็ตอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเซ็ตอุณหภูมิของกราฟีน

3.2.2 วิธีการทดสอบกำลังดึง

1.เตรียมตัวอย่างที่จะนำมาผสมในเครื่องโม่ตามอัตราส่วนที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงไปในเครื่องโม่ ดังแสดงในรูปที่ 4





รูปที่ 4 การผสมโดยเครื่องโม่

2.ทำการทดสอบค่ายุบตัว (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C143-78 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต

3.ตักคอนกรีตใส่แบบโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นละเท่าๆกัน โดยประมาณแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กชั้นละ 25 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การนำคอนกรีตที่ผสมใส่ลงในแบบ

4.ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำสำเร็จ ทิ้งไว้ในแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้คอนกรีตแข็งตัวก่อนนำไปบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 7



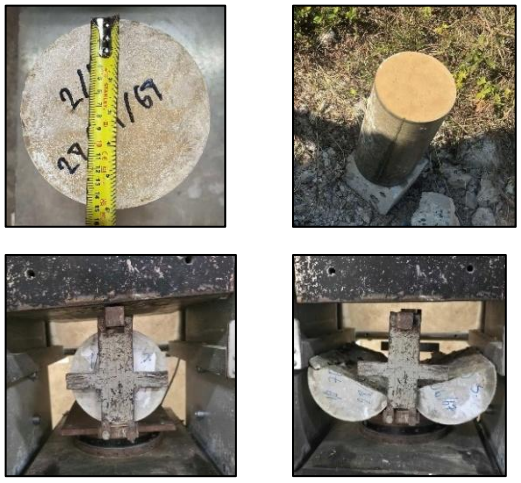
รูปที่ 7 การรอให้ตัวอย่างคอนกรีตแข็งตัว

5.นำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มโดยการแช่น้ำไว้จนถึงเวลาการทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การบ่มตัวอย่างคอนกรีต

6.เมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากบ่อบ่มแล้วนำมาตากให้แห้ง จากนั้นนำคอนกรีตที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ไปทดสอบกำลังดึง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทดสอบกำลังดึง

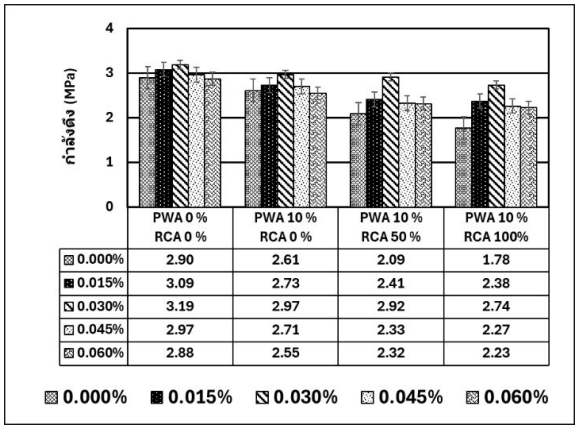
7.เมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากบ่อบ่มแล้วนำมาตากให้แห้ง จากนั้นนำคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ไปทดสอบแบบไม่ทำลาย ดังแสดงในรูปที่ 10



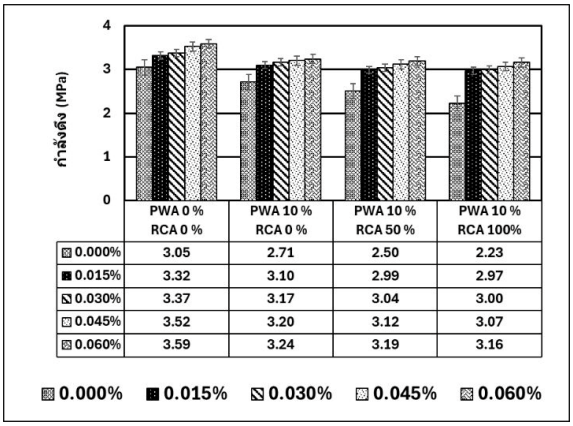
รูปที่ 10 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

4. ผลการทดสอบ

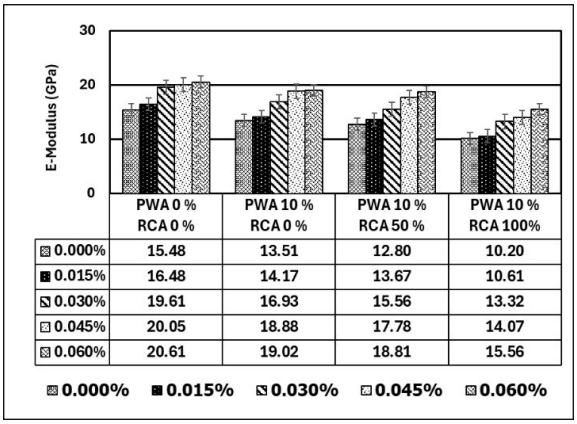
ในการทดสอบสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 3 และรูปที่ 11-13



รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังดึงที่ 7 วัน



รูปที่ 12 ผลการทดสอบกำลังดึงที่ 28 วัน

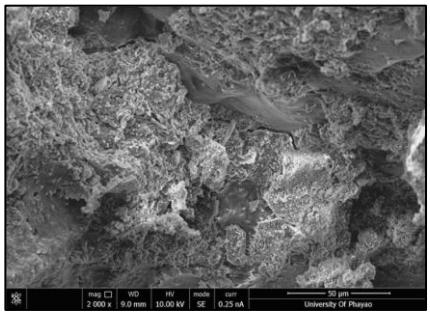


รูปที่ 13 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลาย 28 วัน

จากรูปที่ 11 พบว่าการบ่มคอนกรีตที่ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมกราฟีนโดยไม่มีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนัก 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 29.60, 31.46, 32.55, 30.30 และ 29.33 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 0% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 26.64, 27.87, 30.32, 27.61 และ 26.03 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 50% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 21.34, 24.61, 29.74, 23.81 และ 23.66 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 100% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 18.14, 24.89, 27.92, 23.12 และ 22.77 ksc จากรูปที่ 12 พบว่าการบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมกราฟีนโดยไม่มีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนัก 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 31.07, 34.84, 34.39, 35.93 และ 36.60 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 0% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 27.68, 31.60, 32.30, 32.66 และ 33.05 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 50% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 25.54, 30.53, 30.97, 31.81 และ 32.51 ksc คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 100% และ เถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 22.71, 30.30, 30.61, 31.26 และ 32.22 ksc จากรูปที่ 13 พบว่าการบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมกราฟีนโดยไม่มีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลและเถ้ายางหนักที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 15.48, 16.48, 19.61, 20.05 และ 20.61 GPa คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 0% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 13.51, 14.17, 16.93, 18.88 และ 19.02 GPa คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 50% และเถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 12.80, 13.67, 13..56, 17.78 และ 18.81 GPa คอนกรีตที่ผสมกราฟีนมีการแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล 100% และ

เถ้ายางหนัก 10% ที่ 0%, 0.015%, 0.030%, 0.045% และ 0.060% มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 10.20, 10.61, 13.32, 14.07 และ 15.56 GPa

โดยรวมแล้ว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากราฟีนมีศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะในด้านกำลังดึง เมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สังเกตได้จากรูปที่ 13 กราฟีนเข้ามามีบทบาทในการเติมเต็มช่องว่างในโพรงขนาดในระดับจุลภาค ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้นและสามารถรับกำลังแรงดึงได้เพิ่มขึ้นตามที่แสดงในผลการทดลอง ในทางกลับกันผลกระทบจากการใช้วัสดุรีไซเคิลที่อาจลดความแข็งแรงของคอนกรีตในระดับหนึ่ง



รูปที่ 13 การทดสอบโครงสร้างในระดับจุลภาค

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล ที่อายุ 7 วัน การแทนที่ 50% กำลังดึงลดลงเฉลี่ย 18% และการแทนที่ 100% กำลังดึงลดลงเฉลี่ย 36% และที่อายุ 28 วัน การแทนที่ 50% กำลังดึงลดลงเฉลี่ย 10% และการแทนที่ 100% กำลังดึงลดลงเฉลี่ย 15% และผลของการทดสอบแบบไม่ทำลาย การแทนที่ 50% โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเฉลี่ย 10% การแทนที่ 100% โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเฉลี่ย 30% ส่วนผลของเถ้ายางหนัก การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ายางหนักในสัดส่วน 10% ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตลดลงเฉลี่ย 10% ทั้ง 3 การทดสอบ การเติมกราฟีนในคอนกรีตส่งผลให้กำลังดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ที่อายุ 7 วัน กำลังดึงจะสูงสุดเมื่อเพิ่มกราฟีน 0.030% โดยกำลังดึงเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10% และที่อายุ 28 วัน กำลังดึงจะสูงสุดเมื่อเพิ่มกราฟีน 0.060% โดยกำลังดึงเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 18% และผลของการทดสอบแบบไม่ทำลาย โมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเพิ่มกราฟีน 0.060% โดยโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 25% สรุปได้ว่าการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการผสมมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เถ้ายางหนัก และกราฟีนในคอนกรีตเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถตอบสนองความต้องการด้านความแข็งแรงในงานโครงสร้างได้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตมวลรวม

ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m³)								
ตัวอย่าง	C (kg)	W (kg)	S (kg)	NCA (kg)	RCA (kg)	PWA (kg)	SZ (kg)	GO (kg)
C100P0N100R0G0	18.2	10.92	47.56	49.52	0	0	0.182	0
C100P0N100R0G1	18.2	10.92	47.56	49.52	0	0	0.182	0.00273
C100P0N100R0G2	18.2	10.92	47.56	49.52	0	0	0.182	0.00546
C100P0N100R0G3	18.2	10.92	47.56	49.52	0	0	0.182	0.00819
C100P0N100R0G4	18.2	10.92	47.56	49.52	0	0	0.182	0.01092
C90P10N100R0G0	16.38	10.92	47.56	49.52	0	1.63	0.182	0
C90P10N100R0G1	16.38	10.92	47.56	49.52	0	1.63	0.182	0.00273
C90P10N100R0G2	16.38	10.92	47.56	49.52	0	1.63	0.182	0.00546
C90P10N100R0G3	16.38	10.92	47.56	49.52	0	1.63	0.182	0.00819
C90P10N100R0G4	16.38	10.92	47.56	49.52	0	1.63	0.182	0.01092
C90P10N50R50G0	16.38	10.92	47.56	24.76	22.8	1.63	0.182	0
C90P10N50R50G1	16.38	10.92	47.56	24.76	22.8	1.63	0.182	0.00273
C90P10N50R50G2	16.38	10.92	47.56	24.76	22.8	1.63	0.182	0.00546
C90P10N50R50G3	16.38	10.92	47.56	24.76	22.8	1.63	0.182	0.00819
C90P10N50R50G4	16.38	10.92	47.56	24.76	22.8	1.63	0.182	0.01092
C90P10N0R100G0	16.38	10.92	47.56	0	45.6	1.63	0.182	0
C90P10N0R100G1	16.38	10.92	47.56	0	45.6	1.63	0.182	0.00273
C90P10N0R100G2	16.38	10.92	47.56	0	45.6	1.63	0.182	0.00546
C90P10N0R100G3	16.38	10.92	47.56	0	45.6	1.63	0.182	0.00819
C90P10N0R100G4	16.38	10.92	47.56	0	45.6	1.63	0.182	0.01092

หมายเหตุ : C คือ ปูนซีเมนต์; W คือ น้ำ; S คือ ทราย; PWA คือ เถ้ายางหนัก; NCA คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ; RCA คือ มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล; GO คือ กราฟีน; และ SZ คือ น้ำยาผสมเพิ่ม

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ณ 7 วัน และ 28 วัน และค่าเฉลี่ยโมดูลัสยืดหยุ่น ณ 28 วัน

ตัวอย่าง	กำลังเฉลี่ย (MPa)		โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)
	7 วัน	28 วัน	28 วัน
C100P0N100R0G0	2.90	3.05	15.48
C100P0N100R0G1	3.09	3.32	16.48
C100P0N100R0G2	3.19	3.37	19.61
C100P0N100R0G3	2.97	3.52	20.05
C100P0N100R0G4	2.88	3.59	20.61
C90P10N100R0G0	2.61	2.71	13.51
C90P10N100R0G1	2.73	3.10	14.17
C90P10N100R0G2	2.97	3.17	16.93
C90P10N100R0G3	2.71	3.20	18.88
C90P10N100R0G4	2.55	3.24	19.02
C90P10N50R50G0	2.09	2.50	12.80
C90P10N50R50G1	2.41	2.99	13.67
C90P10N50R50G2	2.92	3.04	15.56
C90P10N50R50G3	2.34	3.12	17.78
C90P10N50R50G4	2.32	3.19	18.81
C90P10N0R100G0	1.78	2.23	10.21
C90P10N0R100G1	2.38	2.97	10.61
C90P10N0R100G2	2.74	3.00	13.32
C90P10N0R100G3	2.27	3.07	14.07
C90P10N0R100G4	2.23	3.16	15.56

อ้างอิง

[1] T. Xie, G. Yang, X. Zhao, J. Xu, C. Fang, A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials. J. Clean. Prod., 251 (2020), Article 119752

[2] ASTM C188-17, Standard Test Method for Destiny of Hydraulic Cement, ASTM International, USA, 2023.

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

[4] ASTM C128-22, Standard Test Method for Relative Destiny (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, USA, 2023.

[5] ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, USA, 2015.

[6] ASTM C496-96, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, USA, 2017.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 7 วัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.1	C100P0N100R0G0	12.54	15	30	450.0	0.00530	2,365.40	25.13	22,797.56	32.25	29.60	2.90
		12.31	15	30	450.0	0.00530	2,322.01	23.56	21,373.28	30.24		
		12.62	15	30	450.0	0.00530	2,380.49	20.51	18,606.36	26.32		
NO.2	C100P0N100R0G1	12.44	15	30	450.0	0.00530	2,346.53	25.56	23,187.65	32.80	31.46	3.09
		12.54	15	30	450.0	0.00530	2,365.40	25.67	23,287.44	32.94		
		12.56	15	30	450.0	0.00530	2,369.17	22.31	20,239.30	28.63		
NO.3	C100P0N100R0G2	12.49	15	30	450.0	0.00530	2,355.96	25.78	23,387.23	33.09	32.55	3.19
		12.48	15	30	450.0	0.00530	2,354.08	27.22	24,693.58	34.93		
		12.49	15	30	450.0	0.00530	2,355.96	23.09	20,946.90	29.63		
NO.4	C100P0N100R0G3	12.57	15	30	450.0	0.00530	2,371.05	25.51	23,142.29	32.74	30.30	2.97
		12.52	15	30	450.0	0.00530	2,361.62	23.33	21,164.63	29.94		
		12.63	15	30	450.0	0.00530	2,382.37	21.98	19,939.93	28.21		
NO.5	C100P0N100R0G4	12.56	15	30	450.0	0.00530	2,369.17	24.55	22,271.39	31.51	29.33	2.88
		12.46	15	30	450.0	0.00530	2,350.31	26.61	24,140.19	34.15		
		12.52	15	30	450.0	0.00530	2,361.62	17.406	15,790.46	22.34		

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 7 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.6	C90P10N100R0G0	12.01	15	30	450.0	0.00530	2,265.42	19.152	17,374.41	24.58	26.64	2.61
		12.19	15	30	450.0	0.00530	2,299.38	23.106	20,961.42	29.65		
		12.26	15	30	450.0	0.00530	2,312.58	20.02	18,161.84	25.69		
NO.7	C90P10N100R0G1	12.4	15	30	450.0	0.00530	2,338.99	21.12	19,159.75	27.11	27.87	2.73
		12.57	15	30	450.0	0.00530	2,371.05	24.16	21,917.59	31.01		
		12.59	15	30	450.0	0.00530	2,374.83	19.86	18,016.69	25.49		
NO.8	C90P10N100R0G2	12.32	15	29.4	441.0	0.00520	2,371.32	21.185	19,218.71	27.74	30.32	2.97
		12.1	15	29.3	439.5	0.00518	2,336.93	25.61	23,233.01	33.65		
		11.86	15	29	435.0	0.00512	2,314.27	22.257	20,191.22	29.55		
NO.9	C90P10N100R0G3	12.29	15	29.8	447.0	0.00527	2,333.80	21.98	19,939.93	28.40	27.61	2.71
		12.41	15	29.9	448.5	0.00528	2,348.70	22.21	20,148.58	28.60		
		12.37	15	29.8	447.0	0.00527	2,348.99	19.99	18,134.63	25.83		
NO.10	C90P10N100R0G4	12.27	15	29.8	447.0	0.00527	2,330.00	19.51	17,699.18	25.21	26.03	2.55
		12.24	15	29.8	447.0	0.00527	2,324.30	19.78	17,944.12	25.56		
		12.36	15	29.9	448.5	0.00528	2,339.24	21.23	19,259.54	27.34		

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 7 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.11	C90P10N50R50G0	12.51	15	29.8	447.0	0.00527	2,375.57	18.09	16,410.98	23.37	21.34	2.09
		12.45	15	29.9	448.5	0.00528	2,356.27	15.51	14,070.44	19.97		
		12.24	15	29.9	448.5	0.00528	2,316.53	16.05	14,560.32	20.67		
NO.12	C90P10N50R50G1	12.2	15	29.8	447.0	0.00527	2,316.71	19.12	17,345.38	24.70	24.61	2.41
		12.11	15	29.8	447.0	0.00527	2,299.62	18.62	16,891.78	24.06		
		12.14	15	29.9	448.5	0.00528	2,297.60	19.46	17,653.82	25.06		
NO.13	C90P10N50R50G2	12.21	15	29.9	448.5	0.00528	2,310.85	22.56	20,466.09	29.05	29.74	2.92
		12.12	15	29.8	447.0	0.00527	2,301.52	24.9	22,588.91	32.17		
		12.12	15	29.9	448.5	0.00528	2,293.82	21.74	19,722.20	27.99		
NO.14	C90P10N50R50G3	12.25	15	29.9	448.5	0.00528	2,318.42	17.12	15,531.01	22.05	23.81	2.34
		12.17	15	30	450.0	0.00530	2,295.60	19.23	17,445.17	24.68		
		12.12	15	29.9	448.5	0.00528	2,293.82	19.19	17,408.88	24.71		
NO.15	C90P10N50R50G4	12.07	15	29.8	447.0	0.00527	2,292.02	17.85	16,193.25	23.06	23.66	2.32
		11.87	15	29.9	448.5	0.00528	2,246.50	17.71	16,066.25	22.81		
		12.15	15	29.9	448.5	0.00528	2,299.50	19.51	17,699.18	25.12		

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 7 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.16	C90P10N0R100G0	11.98	15	29.9	448.5	0.00528	2,267.32	12.23	11,094.87	15.75	18.14	1.78
		12.03	15	29.9	448.5	0.00528	2,276.79	15.61	14,161.16	20.10		
		11.98	15	29.9	448.5	0.00528	2,267.32	14.41	13,072.54	18.56		
NO.17	C90P10N0R100G1	12	15	30.1	451.5	0.00532	2,256.02	19.41	17608.46	24.83	24.25	2.38
		11.94	15	29.9	448.5	0.00528	2,259.75	19.72	17,889.69	25.39		
		11.85	15	29.9	448.5	0.00528	2,242.72	17.5	15,875.74	22.53		
NO.18	C90P10N0R100G2	12.02	15	29.9	448.5	0.00528	2,274.89	22.21	20,148.58	28.60	27.92	2.74
		11.94	15	30	450.0	0.00530	2,252.22	21.12	19,159.75	27.11		
		12.05	15	29.9	448.5	0.00528	2,280.57	21.78	19,758.49	28.05		
NO.19	C90P10N0R100G3	11.81	15	30	450.0	0.00530	2,227.70	15.41	13,979.72	19.78	23.12	2.27
		11.9	15	30	450.0	0.00530	2,244.67	19.22	17,436.10	24.67		
		11.87	15	30	450.0	0.00530	2,239.02	19.41	17,608.46	24.91		
NO.20	C90P10N0R100G4	11.82	15	30	450.0	0.00530	2,229.58	17.07	15,485.65	21.91	22.77	2.23
		12.06	15	29.9	448.5	0.00528	2,282.46	18.83	17,082.29	24.25		
		11.99	15	29.9	448.5	0.00528	2,269.21	17.21	15,612.65	22.16		

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 28 วัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.1	C100P0N100R0G0	12.74	15	30	450.0	0.00530	2,403.12	22.98	20,847.11	29.49	31.07	3.05
		12.57	15	30	450.0	0.00530	2,371.05	27.31	24,775.22	35.05		
		12.5	15	30	450.0	0.00530	2,357.85	22.34	20,266.51	28.67		
NO.2	C100P0N100R0G1	12.51	15	30	450.0	0.00530	2,359.74	26.43	23,976.90	33.92	33.84	3.32
		12.4	15	30	450.0	0.00530	2,338.99	26.56	24,094.83	34.09		
		12.41	15	30	450.0	0.00530	2,340.87	26.12	23,695.67	33.52		
NO.3	C100P0N100R0G2	12.42	15	30	450.0	0.00530	2,342.76	25.176	22,839.29	32.31	34.39	3.37
		12.46	15	30	450.0	0.00530	2,350.31	28.98	26,290.22	37.19		
		12.53	15	30	450.0	0.00530	2,363.51	26.23	23,795.46	33.66		
NO.4	C100P0N100R0G3	12.43	15	30	450.0	0.00530	2,344.65	26.415	23,963.29	33.90	35.93	3.52
		12.5	15	30	450.0	0.00530	2,357.85	28.111	25,501.88	36.08		
		12.42	15	30	450.0	0.00530	2,342.76	29.45	26,716.60	37.80		
NO.5	C100P0N100R0G4	12.72	15	30	450.0	0.00530	2,399.35	29.09	26,390.01	37.33	36.60	3.59
		12.51	15	30	450.0	0.00530	2,359.74	28.42	25,782.20	36.47		
		12.5	15	30	450.0	0.00530	2,357.85	28.04	25,437.47	35.99		

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.6	C90P10N100R0G0	12.28	15	30	450.0	0.00530	2,316.35	21.22	19,250.47	27.23	27.68	2.71
		12.18	15	30	450.0	0.00530	2,297.49	22.16	20,103.22	28.44		
		12.29	15	30	450.0	0.00530	2,318.24	21.32	19,341.18	27.36		
NO.7	C90P10N100R0G1	12.65	15	30	450.0	0.00530	2,386.15	26.43	23,976.90	33.92	31.60	3.10
		12.32	15	30	450.0	0.00530	2,323.90	24.42	22,153.46	31.34		
		12.42	15	30	450.0	0.00530	2,342.76	23.01	20,874.33	29.53		
NO.8	C90P10N100R0G2	11.83	15	29.8	447.0	0.00527	2,246.45	25.21	22,870.13	32.57	32.30	3.17
		12.12	15	29.9	448.5	0.00528	2,293.82	24.57	22,289.54	31.64		
		12.2	15	29.8	447.0	0.00527	2,316.71	25.31	22,960.85	32.70		
NO.9	C90P10N100R0G3	12.13	15	29.8	447.0	0.00527	2,303.41	28.03	25,428.40	36.22	32.66	3.20
		12.36	15	29.8	447.0	0.00527	2,347.09	25.43	23,069.71	32.86		
		12.25	15	29.9	448.5	0.00528	2,318.42	22.45	20,366.30	28.91		
NO.10	C90P10N100R0G4	11.9	15	29.9	448.5	0.00528	2,252.18	25.01	22,688.70	32.21	33.05	3.24
		12.13	15	29.8	447.0	0.00527	2,303.41	29.03	26,335.58	37.51		
		12.2	15	29.9	448.5	0.00528	2,308.96	22.86	20,738.25	29.44		

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.11	C90P10N50R50G0	12.36	15	29.8	447.0	0.00527	2,347.09	17.74	16,093.46	22.92	25.54	2.50
		12.16	15	29.9	448.5	0.00528	2,301.39	20.95	19,005.53	26.98		
		12.23	15	29.9	448.5	0.00528	2,314.64	20.75	18,824.09	26.72		
NO.12	C90P10N50R50G1	12.12	15	29.8	447.0	0.00527	2,301.52	22.83	20,711.03	29.50	30.53	2.99
		12.24	15	29.8	447.0	0.00527	2,324.30	25.32	22,969.92	32.71		
		12.21	15	29.9	448.5	0.00528	2,310.85	22.82	20701.96	29.39		
NO.13	C90P10N50R50G2	12.1	15	29.8	447.0	0.00527	2,297.72	21.01	19,059.96	27.15	30.97	3.04
		12.11	15	29.9	448.5	0.00528	2,291.93	26.62	24,149.26	34.28		
		12.22	15	29.9	448.5	0.00528	2,312.74	24.45	22,180.67	31.48		
NO.14	C90P10N50R50G3	12.14	15	29.9	448.5	0.00528	2,297.60	23.73	21,527.50	30.56	31.81	3.12
		12.33	15	29.8	447.0	0.00527	2,341.39	28.96	26,272.08	37.42		
		12.18	15	29.9	448.5	0.00528	2,305.17	21.32	19,341.18	27.45		
NO.15	C90P10N50R50G4	12.27	15	29.9	448.5	0.00528	2,322.21	26.78	24,294.41	34.48	32.51	3.19
		12.35	15	29.8	447.0	0.00527	2,345.19	24.56	22,280.46	31.73		
		12.21	15	29.9	448.5	0.00528	2,310.85	24.31	22,053.67	31.30		

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังดึงตอนกรีตที่ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	น้ำหนัก (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	D x H (cm^2)	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังผ่าซีก (ton)	กำลังผ่าซีก (kg)	กำลังดึงผ่าซีก (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
NO.16	C90P10N0R100G0	12.06	15	29.9	448.5	0.00528	2,282.46	20.03	18,170.92	25.79	22.71	2.23
		12.15	15	29.9	448.5	0.00528	2,299.50	18.72	16,982.50	24.11		
		12.15	15	30	450.0	0.00530	2,291.83	14.21	12,891.10	18.24		
NO.17	C90P10N0R100G1	12.03	15	29.8	447.0	0.00527	2,284.43	24.31	22,053.67	31.41	30.30	2.97
		12.18	15	29.9	448.5	0.00528	2,305.17	22.31	20,239.30	28.73		
		12.17	15	29.9	448.5	0.00528	2,303.28	23.89	21672.65	30.76		
NO.18	C90P10N0R100G2	12.16	15	29.9	448.5	0.00528	2,301.39	29.32	26,598.66	37.76	30.61	3.00
		12.12	15	29.9	448.5	0.00528	2,293.82	23.87	21,654.51	30.74		
		12.08	15	29.9	448.5	0.00528	2,286.25	18.12	16,438.19	23.33		
NO.19	C90P10N0R100G3	12.05	15	29.9	448.5	0.00528	2,280.57	25.32	22,969.92	32.60	31.26	3.07
		12.02	15	29.9	448.5	0.00528	2,274.89	25.15	22,815.70	32.39		
		11.92	15	29.9	448.5	0.00528	2,255.97	22.36	20,284.66	28.79		
NO.20	C90P10N0R100G4	11.65	15	30	450.0	0.00530	2,197.52	25.52	23,151.36	32.75	32.22	3.16
		11.73	15	29.9	448.5	0.00528	2,220.01	23.29	21,128.34	29.99		
		11.75	15	30	450.0	0.00530	2,216.38	26.43	23,976.90	33.92		

การศึกษากำลังดัดของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน

A study on flexural strength of recycled aggregate concrete mixed with para-wood ash and Graphene

นายพงศกร คุณโน[1] นายโอชิษฐ์ ยาวิไชย[2] นายชานนท์ ซื่อใส[3] นางสาวสรัญญา นิลมณี[4] และ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง[5]

[1,2,3,4] นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

[5] อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเถ้ายางหนักที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และการใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทดแทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรงดัดโดยที่ทดแทนมวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลในอัตราส่วน 0%, 50% และ 100% โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังมีการใส่กราฟีนในอัตราส่วน 0.015%, 0.03%, 0.045% และ 0.06% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาอิทธิของกราฟีนต่อกำลังดัดในคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้ายางหนักและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลทำให้กำลังดัดของคอนกรีตลดลงเมื่อแทนที่ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กราฟีนมีส่วนช่วยในการเพิ่มความหนาแน่นและลดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้การรับกำลังดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราฟีนที่ใช้

Abstract

This research aims to study the performance of heavy ash as a cement replacement at a ratio of 10% by weight of cement and the use of recycled concrete aggregates (RCA) as a substitute for coarse aggregates in concrete mixtures to evaluate their flexural strength. The coarse aggregates were replaced with RCA at proportions of 0%, 50%, and 100% by volume. Additionally, graphene was incorporated at ratios of 0.015%, 0.03%, 0.045%, and 0.06% by the weight of cement to investigate its effects on the flexural strength of concrete. The results indicate that replacing cement with heavy ash and coarse aggregates with RCA leads to a reduction in the flexural strength of concrete as the replacement ratio increases. However, graphene contributes to increasing the density and reducing voids within the concrete matrix, thereby enhancing the flexural strength of concrete as the amount of graphene increases.

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีแนวโน้มขยายตัวและเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในงานก่อสร้างทุกรูปแบบไม่สามารถปฏิเสธการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติได้ เช่น หินปูน ทราย และมวลรวมหยาบซึ่งทรัพยากรณ์ธรรมชาติเหล่านี้เป็นของที่ใช้แล้วหมดไปหรือมีอย่างจำกัด ผู้จัดทำโครงงานจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดปัญหาการรุกล้ำป่าไม้และที่อยู่สัตว์ป่า อีกทั้งยังลดมลพิษทางอากาศจากกระบวนการแปรรูปหรือการขนส่งทุกช่องทางจึงนำมาสู่การมองหาแนวทางนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษคอนกรีตที่ถูกใช้งานแล้ว [1]

การนำคอนกรีตที่ถูกใช้งานแล้วมาใช้ใหม่แทนมวลรวมหยาบไม่เพียงมีผลดีต่อมลภาวะทางอากาศ แต่ยังช่วยลดต้นทุนในธุรกิจก่อสร้างจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในงานวิศวกรรมในอนาคตที่องค์กรส่วนใหญ่เริ่มหันมาสนใจนวัตกรรมหรือแนวคิดที่ช่วยลดภาวะโลกร้อน จากผลการทดสอบพบว่าการรับกำลังของคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณวัสดุแทนที่ใช้ [2]

ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการแทนที่มวลรวมคอนกรีตด้วยวัสดุที่ไม่มีมูลค่าให้สามารถกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวัสดุที่มีใช้อย่างแพร่หลายและราคาสูง โดยการหาอัตราส่วนผสมทดแทนที่เหมาะสมของทั้งคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่ผสมเถ้ายางหนักและกราฟีนเพื่อความยั่งยืนด้านทรัพยากรและประโยชน์สูงสุดต่องานด้านวิศวกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังดัดของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักในอัตราส่วนต่างๆ ต่อค่ากำลังดัดของคอนกรีต
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกราฟีนที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อกำลังดัดของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนัก คือ ร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตามลำดับ
2. อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล คือ ร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยปริมาตร ตามลำดับ
3. อัตราส่วนการใช้กราฟีน คือ ร้อยละ 0, 0.015, 0.03, 0.045 และ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตามลำดับ
4. ขนาดมวลรวมหยาบและมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ คือ เบอร์ 3/4 นิ้ว
5. ตัวอย่างการทดสอบกำลังดัดเป็นคาน 15×15×50 cm^3 ทำการทดสอบที่ 28 วัน
6. เถ้ายางหนักได้จากโรงงานไฟฟ้ากลุ่มธุรกิจพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล
7. การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยตามมาตรฐาน ASTM C118-17 [3], ASTM C127-15 [4], ASTM C128-22 [5] และ ASTM C136-06 [6]
8. การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C78 [7]

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการพัฒนากำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบ
2. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากรายงานนี้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. เป็นการรณรงค์ให้เกิดการนำวัสดุรีไซเคิลกลับมาใช้งานได้อีกครั้งส่งผลให้เกิดการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้นในอนาคต

1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินการ แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

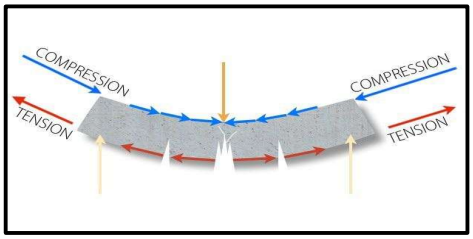
ขั้นตอน	เดือน							
	6	7	8	9	10	11	12	1
1.ศึกษาค้นคว้าและออกแบบส่วนผสม								
2.เตรียมวัสดุต่างๆเพื่อในการทดสอบ								
3.ทดสอบกำลังดัดขคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลผสมเถ้ายางหนักและกราฟีน								
4.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอบ								
5.จัดทำรูปเล่มและนำเสนอรายงานผล								

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของส่วนผสมคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักหรืออาจสำคัญที่สุดที่กำหนดคุณภาพและคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อรูพรุนของคอนกรีตและคอนกรีตที่ดีควรเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นและแน่นหนาที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้น จะต้องเตรียมโดยใช้น้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แต่ต้องมีน้ำเพียงพอเพื่อให้แร่ธาตุซีเมนต์มีความชื้นและจัดการได้อย่างเหมาะสม อัตราส่วนที่ต่ำกว่าทำให้มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้นแต่ส่วนผสมอาจทำงานและขึ้นรูปได้ยากขึ้นการทำงานสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารพลาสติกไซเซอร์หรือสารซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์อัตราส่วนที่สูงขึ้นทำให้ส่วนผสมคอนกรีตไหลลื่นเกินไปส่งผลให้คอนกรีตแข็งตัวมีรูพรุนและมีคุณภาพต่ำ

พฤติกรรมของคานต่อปริมาณเหล็กเสริมเมื่อพิจารณา Moment-curvature relationship ของหน้าตัดคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่แตกต่างหากปริมาณเหล็กเสริมมากคานจะรับโมเมนต์ได้มากแต่มีค่าการแอ่นตัวต่ำซึ่งหมายความว่าคานวิบัติในขณะที่แอ่นตัวน้อย เมื่อคานแอ่นตัวน้อยก็จะไม่แสดงรอยร้าวให้เห็นก่อนวิบัติซึ่งจะเป็นการวิบัติอย่างฉับพลันไม่มีรอยร้าวเตือนล่วงหน้าพฤติกรรมแบบนี้เรียกว่าคานวิบัติแบบเปราะหรือภาษาที่วิศวกรโยธาใช้คือการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure) หากคานมีเหล็กเสริมน้อยจะเห็นว่าคานสามารถต้านทานโมเมนต์ได้น้อยแต่มีค่าการแอ่นตัวสูงซึ่งหมายความว่าคานแอ่นตัวมากก่อนจะวิบัติ ในกรณีนี้คานจะแอ่นและเกิดรอยร้าวเตือนให้ผู้อาศัยอพยพหนีได้ก่อน วิศวกรโยธาเรียกการวิบัติแบบนี้ว่าการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (Tension failure) แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาในอดีตพบว่าการทดสอบประสิทธิภาพในการรับแรงดัด โดยมีการใส่กราฟีนลงไปในคอนกรีตในอัตราส่วน 0%, 0.03%, 0.05% และ 0.1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งได้ผลการทดลองว่าตัวอย่างที่มีการใส่กราฟีนเป็นส่วนผสมมีความสามารถในการรับแรงดัดได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ใส่โดยที่อัตราส่วน 0.03% จะสามารถรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้น 29.8%, 0.05% สามารถรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้น 44.7% และ 0.1% สามารถรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้น 44% ซึ่งจากการทดสอบนี้พบว่าการใส่กราฟีนในส่วนผสมที่อัตราส่วน 0.05% มีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดได้มากที่สุด [8]

3. ระเบียบวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย


หินแกรนิต #3/4”


ทราย #4


ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์


กราฟีน


เถ้ายางหนัก


คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล#3/4”


น้ำ


ซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์

รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ส่วนผสมคอนกรีต แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

4.1 ขั้นตอนการเตรียมสารกราฟีน

1. นำกราฟีนมาผสมกับน้ำตามอัตราส่วนลงในขวดรูปชมพู่แล้วนำไปวางบนเครื่องคนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิกอุณหภูมิไว้ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

1. นำแบบที่ทำความสะอาดแล้วทาน้ำมันบริเวณผิวสัมผัสคอนกรีตให้ทั่วเพื่อป้องกันคอนกรีตติดแบบ
2. นำเครื่องมือทดสอบการยุบตัว เครื่องโม่ปูน และช้อนตักฉีดพรมน้ำให้มีความชื้นที่ผิววัสดุ
3. เปิดเครื่องโม่ปูน แล้วเริ่มเทส่วนผสม ทราย, ปูน, หิน, RCA และน้ำลงในโม่ตามลำดับโดยส่วนผสมเป็นไปตามตารางที่ 2 (กรณีที่มีน้ำยาผสมเพิ่มควรผสมให้เข้ากับน้ำก่อนเริ่มขั้นตอน)
4. เมื่อโม่ปูนผสมจนคอนกรีตเริ่มเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงเริ่มขั้นตอนต่อไป แสดงได้ดังรูปที่ 3





รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

no	Mix symbol	C	W	S	NCA	RCA	PWA	SZ	GO
		(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
1	C100P0N100R0G0	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0
2	C100P0N100R0G1	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.05
3	C100P0N100R0G2	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.1
4	C100P0N100R0G3	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.15
5	C100P0N100R0G4	333.33	200	870.93	906.91	0	0	3.33	0.2
6	C90P10N100R0G0	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0
7	C90P10N100R0G1	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.05
8	C90P10N100R0G2	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.1
9	C90P10N100R0G3	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.15
10	C90P10N100R0G4	300	200	870.93	906.91	0	29.84	3.33	0.2
11	C90P10N50R50G0	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0
12	C90P10N50R50G1	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.05
13	C90P10N50R50G2	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.1
14	C90P10N50R50G3	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.15
15	C90P10N50R50G4	300	200	870.93	453.46	417.52	29.84	3.33	0.2
16	C90P10N0R100G0	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0
17	C90P10N0R100G1	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.05
18	C90P10N0R100G2	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.1
19	C90P10N0R100G3	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.15
20	C90P10N0R100G4	300	200	870.93	0	835.05	29.84	3.33	0.2

หมายเหตุ : C = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, W = น้ำ, S = มวลรวมละเอียด, NCA =คอนกรีตมวลรวมหยาบ, RCA = คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล, PWA = เถ้ายางหนัก, SZ = ซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์, GO = กราฟีน

4.3 การเทคอนกรีตใส่แบบหล่อรูปคาน

1. ทาน้ำมันเครื่องที่ผิวด้านในแบบหล่อบางๆ
2. เทคอนกรีตเข้าแบบตัวอย่างคานรูปทรงขนาด 15x15x50 cm^3 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 นาทีเพื่อปาดผิวหน้าให้เรียบและเขียนสัญลักษณ์บนตัวอย่างคอนกรีต แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนเทคอนกรีตใส่แบบหล่อรูปคาน

1. หลังจากหล่อคอนกรีตลงสู่แบบและตกแต่งผิวหน้าเรียบร้อยแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในบ่อที่มีน้ำสะอาดจนครบ 28 วัน
2. เมื่อครบ 28 วันนำตัวอย่างคานคอนกรีตขึ้นจากน้ำแล้วตากให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างคานที่แห้งแล้วมาวัดขนาดและแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันโดยเว้นระยะขอบไม่ต่ำกว่า 1 นิ้ว
3. ชั่งน้ำหนักและนำไปทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78
4. นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการรับแรงดัดของมวลรวมรีไซเคิลและเถ้ายางหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การบ่มคอนกรีต

4.5 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตรูปคาน

4.5.1 เครื่องมือและวิธีการทดสอบกำลังดัด

1. เครื่องทดสอบสามารถใช้แรงดึงเหล็กเส้นคอนกรีตอัดแรงจะใช้เป็นแบบที่อ่านเป็นตัวเลขจากจอแสดงผล
2. นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตมาวัดระยะทำเครื่องหมายที่จุดกึ่งกลางของคานหรือจุดที่จะให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนจุดกึ่งกลางคาน โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 45 cm. ทำเครื่องหมายไว้เป็นจุดสำหรับวางบนฐานที่รองรับ
3. วางคอนกรีตลงบนฐานรองรับบนเครื่องกด (Testing machine) จากนั้นเลื่อนหัวกดและฐานรองรับให้ตรงกับจุดที่ได้ทำเครื่องหมายไว้
4. เดินเครื่องเพิ่มแรงกดช้าๆอย่างต่อเนื่องในอัตรา 0.01 mm/s จนกระทั่งคานเกิดการแตกร้าว
5. หลังจากคอนกรีตแตกทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอยแตกร้าวและบันทึกค่ากำลังดัดประลัยที่คอนกรีตได้รับ แสดงได้ดังรูปที่ 6
6. วิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดได้ ดังสมการที่ 1

$$\sigma = MC/I \qquad (1)$$

เมื่อ σ = กำลังรับแรงดัด

M = โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้น (ksc) $= \frac{Pl}{4}$

C = ระยะห่างจากแกนสะเทินถึงผิวบนสุดของคานคอนกรีตหรือมีค่าครึ่งหนึ่งของความลึก (d/2)

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

b = ความกว้างของคอนกรีต (cm)

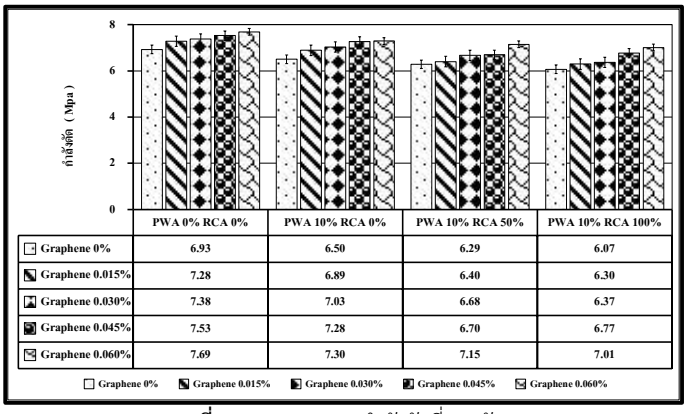
d = ความหนาของคอนกรีต (cm)



รูปที่ 6 วิธีการทดสอบกำลังดัด

5. ผลการศึกษา

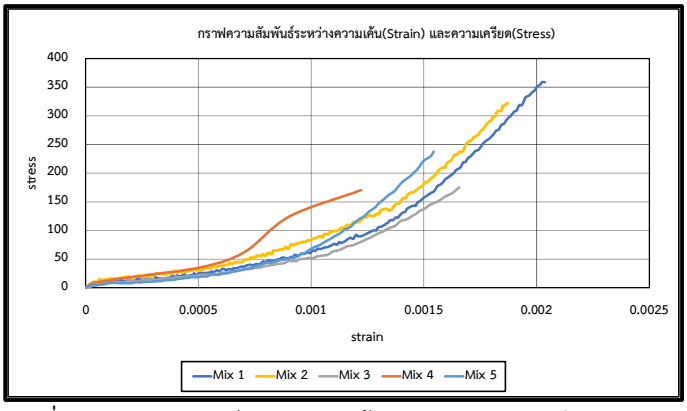
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด ณ 28 วัน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Strain) และความเครียด (Stress)



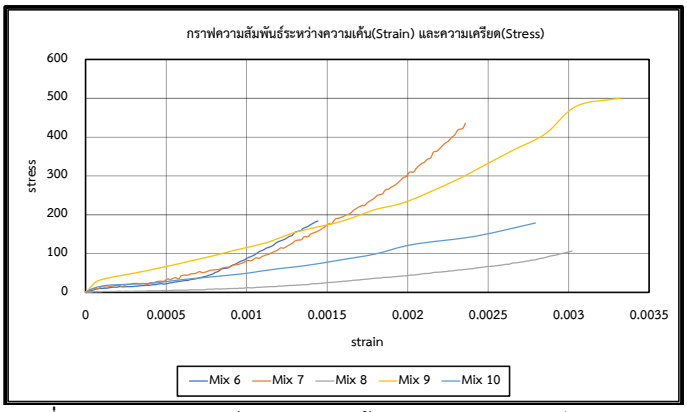
	PWA 0% RCA 0%	PWA 10% RCA 0%	PWA 10% RCA 50%	PWA 10% RCA 100%
Graphene 0%	6.93	6.50	6.29	6.07
Graphene 0.015%	7.28	6.89	6.40	6.30
Graphene 0.030%	7.38	7.03	6.68	6.37
Graphene 0.045%	7.53	7.28	6.70	6.77
Graphene 0.060%	7.69	7.30	7.15	7.01

Graphene 0% Graphene 0.015% Graphene 0.030% Graphene 0.045% Graphene 0.060%

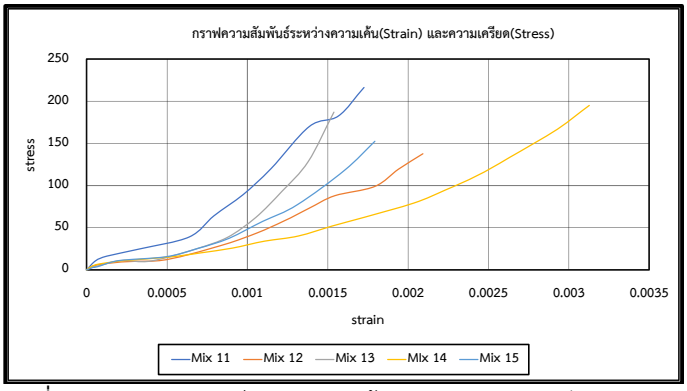
รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังดัดที่ 28 วัน



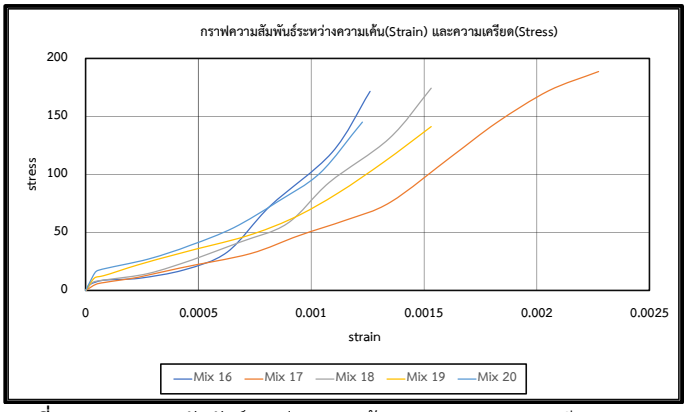
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น(Strain) และความเครียด(Stress) การทดสอบที่ 1 – 5



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น(Strain) และความเครียด(Stress) การทดสอบที่ 6 - 10



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น(Strain) และความเครียด(Stress) การทดสอบที่ 11 - 15

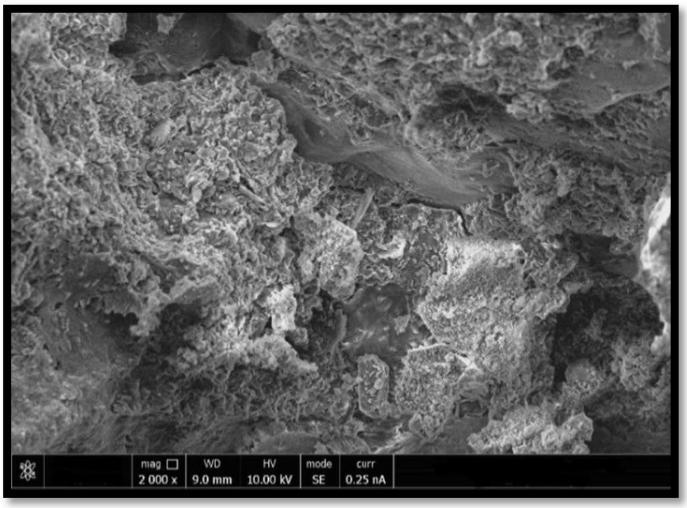


รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น(Strain) และความเครียด(Stress) การทดสอบที่ 16 - 20

วิจารย์ผลการศึกษา

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อแทนที่มวลรวมคอนกรีตด้วยคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลในอัตรา 0%, 50% และ 100% โดยปริมาตร ได้กำลังดัดประลัยเท่ากับ 328.78 , 293.69 และ 281.81 ksc ตามลำดับ หรือการรับกำลังดัดคอนกรีตลดลง คิดเป็น 6% และ 9% ในอัตราส่วนแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล 50% และ 100% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากำลังดัดลดลงตามการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นแต่ยังเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากการออกแบบคอนกรีตที่นิยมในโครงสร้างบ้านหรืออาคารเล็กทั่วไปเท่ากับ 240 - 280 ksc ในส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ายางหนักในอัตราส่วน 0% และ 10% ส่งผลให้กำลังดัดได้ 313.30 และ 307.81 ksc ตามลำดับ หรือลดลงคิดเป็น 1.7% เมื่อแทนที่ด้วยเถ้ายางหนักในอัตราส่วน 10% ซึ่งความแข็งแรงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อมีการเติมสารกราฟีนอัตราส่วน 0%, 0.015%, 0.03%, 0.045% และ 0.06% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนตามลำดับ ได้กำลังดัดคอนกรีตเฉลี่ย 283.15, 288.09, 291.77, 301.25 และ 318.70 ksc ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสมกราฟีนเพิ่มกำลังดัดคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตาม ดังแสดงในรูปที่ 7

ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค กราฟีนมีอิทธิพลต่อการรับกำลังดัดโดยช่วยให้คอนกรีตเรียงตัวหนาแน่นดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12 และลดช่องว่างภายในคอนกรีตความแข็งแรงจึงเพิ่มสูงขึ้นแต่ต้องพิจารณาควบคู่กับการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลเนื่องจากเป็นตัวแปรที่ทำให้กำลังดัดคอนกรีตลดลงและควรศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 12 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง (Scanning electron microscope: SEM)

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลแทนที่คอนกรีตมวลรวมหยาบในอัตราส่วน 0%, 50% และ 100% ให้กำลังดัดลดลงเล็กน้อยตามลำดับ บ่งชี้ว่าเมื่อมีการใช้คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลมากขึ้นความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง ส่วนของการใช้เถ้ายางหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0% และ 10% ให้ค่ากำลังดัดลดลงเล็กน้อยหรือคิดเป็น 1.7% เมื่อใช้เถ้ายางหนักแทนปูนซีเมนต์ และการเติมกราฟีนในอัตราส่วน 0% - 0.06% ได้ผลสรุปว่ากำลังดัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกราฟีนที่มากขึ้น เนื่องจากกราฟีนมีคุณสมบัติช่วยเติมเต็มช่องว่างและเพิ่มความหนาแน่นภายในเนื้อคอนกรีตในระดับจุลภาค

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Xie, G. Yang, X. Zhao, J. Xu, C. Fang, A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials, J. Clean. Prod. 251 (2020) 119752.

[2] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete, Constr. Build. Mater. 27 (1) (2012) 439-449.

[3] ASTM C78-09, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-point Loading), ASTM International, USA, 2010.

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

[5] ASTM C188-17, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, USA, 2023.

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

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

[8] P. Maruping, flexural behavior of graphene–reinforced concrete beam, J. Stru. Eng. 5 (2023) 123-134.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดัดที่ 28 วัน

Mix Number	Mix Symbol	No	อายุ	slump	ยาว	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	น้ำหนัก	แรงกด	กำลังดัด (σ)	ค่าเฉลี่ย
			(day)	(cm)	(cm)			(cm^2)	(cm^3)	(kg)	kN	Mpa	Mpa
1	C100P0N100R0G0	1	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.64	28.20	6.26	6.29
		2	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.42	25.30	5.62	
		3	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.88	33.50	7.44	
		4	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.48	26.60	5.91	
		5	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.83	24.60	5.46	
		6	28	19.2	50	15	15	225	11250	27.31	31.80	7.06	
2	C100P0N100R0G1	1	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.05	29.40	6.53	6.40
		2	28	19.5	50	15	15	225	11250	26.90	29.60	6.57	
		3	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.44	29.10	6.46	
		4	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.16	28.20	6.26	
		5	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.39	27.50	6.11	
		6	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.13	29.10	6.46	
3	C100P0N100R0G2	1	28	22.8	50	15	15	225	11250	26.64	33.30	7.39	7.03
		2	28	22.8	50	15	15	225	11250	26.75	33.10	7.35	
		3	28	22.8	50	15	15	225	11250	27.21	30.90	6.86	
		4	28	22.8	50	15	15	225	11250	26.73	29.60	6.57	
		5	28	22.8	50	15	15	225	11250	26.90	33.30	7.39	
		6	28	22.8	50	15	15	225	11250	27.25	29.80	6.62	
4	C100P0N100R0G3	1	28	17	50	15	15	225	11250	27.72	29.10	6.46	6.70
		2	28	17	50	15	15	225	11250	27.11	31.90	7.08	
		3	28	17	50	15	15	225	11250	27.21	30.10	6.68	
		4	28	17	50	15	15	225	11250	27.48	28.60	6.35	
		5	28	17	50	15	15	225	11250	27.23	26.80	5.95	
		6	28	17	50	15	15	225	11250	27.73	34.50	7.66	
5	C100P0N100R0G4	1	28	21.9	50	15	15	225	11250	27.31	31.30	6.95	7.69
		2	28	21.9	50	15	15	225	11250	27.36	33.30	7.39	
		3	28	21.9	50	15	15	225	11250	27.38	41.90	9.30	
		4	28	21.9	50	15	15	225	11250	27.44	28.00	6.22	
		5	28	21.9	50	15	15	225	11250	27.31	36.00	7.99	
		6	28	21.9	50	15	15	225	11250	26.70	37.20	8.26	
6	C90P10N100R0G0	1	28	20.7	50	15	15	225	11250	26.66	28.70	6.37	6.50
		2	28	20.7	50	15	15	225	11250	27.78	32.60	7.24	
		3	28	20.7	50	15	15	225	11250	27.22	29.70	6.60	
		4	28	20.7	50	15	15	225	11250	27.64	30.90	6.86	
		5	28	20.7	50	15	15	225	11250	26.66	26.60	5.91	
		6	28	20.7	50	15	15	225	11250	27.32	27.20	6.04	
7	C90P10N100R0G1	1	28	18	50	15	15	225	11250	27.11	29.60	6.57	6.89
		2	28	18	50	15	15	225	11250	26.54	30.20	6.71	
		3	28	18	50	15	15	225	11250	27.23	33.30	7.39	

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 28 วัน (ต่อ)

Mix Number	Mix Symbol	No	อายุ	slump	ยาว	กว้าง	สูง	พื้นที่หน้าตัด	ปริมาตร	น้ำหนัก	แรงกด	กำลังอัด (σ)	ค่าเฉลี่ย
			(day)	(cm)	(cm)			(cm^2)	(cm^3)	(kg)	kN	Mpa	Mpa
8	C90P10N100R0G2	1	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.65	33.10	7.35	7.38
		2	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.71	33.30	7.39	
		3	28	19.5	50	15	15	225	11250	27.941	33.30	7.39	
9	C90P10N100R0G3	1	28	20.2	50	15	15	225	11250	26.83	31.90	7.08	7.53
		2	28	20.2	50	15	15	225	11250	27.03	26.80	5.95	
		3	28	20.2	50	15	15	225	11250	27.22	43.00	9.55	
10	C90P10N100R0G4	1	28	12.8	50	15	15	225	11250	27.50	37.20	8.26	7.15
		2	28	12.8	50	15	15	225	11250	27.43	31.30	6.95	
		3	28	12.8	50	15	15	225	11250	27.76	28.10	6.24	
11	C90P10N50R50G0	1	28	19	50	15	15	225	11250	27.04	31.60	7.02	6.93
		2	28	19	50	15	15	225	11250	27.22	30.30	6.73	
		3	28	19	50	15	15	225	11250	26.45	31.70	7.04	
12	C90P10N50R50G1	1	28	20.5	50	15	15	225	11250	26.81	27.50	6.11	6.30
		2	28	20.5	50	15	15	225	11250	27.15	24.30	5.40	
		3	28	20.5	50	15	15	225	11250	27.22	33.30	7.39	
13	C90P10N50R50G2	1	28	19.5	50	15	15	225	11250	26.60	33.10	7.35	6.68
		2	28	19.5	50	15	15	225	11250	26.52	30.80	6.84	
		3	28	19.5	50	15	15	225	11250	26.77	26.30	5.84	
14	C90P10N50R50G3	1	28	20.2	50	15	15	225	11250	27.12	31.90	7.08	7.28
		2	28	20.2	50	15	15	225	11250	27.05	34.50	7.66	
		3	28	20.2	50	15	15	225	11250	27.13	31.90	7.08	
15	C90P10N50R50G4	1	28	19.4	50	15	15	225	11250	26.62	33.30	7.39	7.30
		2	28	19.4	50	15	15	225	11250	26.47	28.10	6.24	
		3	28	19.4	50	15	15	225	11250	26.73	37.20	8.26	
16	C90P10N0R100G0	1	28	18.1	50	15	15	225	11250	26.58	28.70	6.37	6.07
		2	28	18.1	50	15	15	225	11250	26.11	23.00	5.11	
		3	28	18.1	50	15	15	225	11250	27.13	30.30	6.73	
17	C90P10N0R100G1	1	28	18.7	50	15	15	225	11250	27.25	33.30	7.39	7.28
		2	28	18.7	50	15	15	225	11250	26.12	33.30	7.39	
		3	28	18.7	50	15	15	225	11250	26.54	31.80	7.06	
18	C90P10N0R100G2	1	28	18.5	50	15	15	225	11250	26.45	27.00	6.00	6.37
		2	28	18.5	50	15	15	225	11250	26.2	30.80	6.84	
		3	28	18.5	50	15	15	225	11250	26.68	28.20	6.26	
19	C90P10N0R100G3	1	28	21.5	50	15	15	225	11250	25.93	31.90	7.08	6.77
		2	28	21.5	50	15	15	225	11250	26.23	25.00	5.55	
		3	28	21.5	50	15	15	225	11250	25.72	34.50	7.66	
20	C90P10N0R100G4	1	28	17.3	50	15	15	225	11250	25.84	28.10	6.24	7.01
		2	28	17.3	50	15	15	225	11250	26.23	33.30	7.39	
		3	28	17.3	50	15	15	225	11250	25.98	33.30	7.39	

การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในสภาวะอายุเริ่มต้น

Development of Microstructure and Mechanical Properties of Mixture between Calcium Carbide Residue and Fly ash in Early-age State.

นัทนากร เมืองวงค์[1,*] ปฏิวัติ พินิจ[2] วันวิสา จันโสดา[3] และ ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ[4]

[1,2,3] นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: 64101798@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของกากแคลเซียมผสมกับเถ้าถ่านหินในสภาวะเริ่มต้นที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน โดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดจนมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผสมกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการบดแต่ผ่านมาตรฐานวัสดุปอซโซลาน ผสมในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.35 และ 0.40 ทั้งนี้มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) = 0.70 ในการศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทำการทดสอบโดยอาศัยเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนและไอน้ำ เพื่อวิเคราะพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) และพื้นที่การกระจายของโพรงในวัสดุ การศึกษาสมบัติเชิงกลทดสอบโดยอาศัยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน ที่สามารถวิเคราะโมดูลัสยืดหยุน ความแข็ง และการคืบจากผลการทดสอบพบว่า วัสดุประสานที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคที่ต่ำกว่าวัสดุควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ (CP) ในสภาะเริ่มต้น อย่างไรก็ตามที่อายุ 28 วัน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน มีการพัฒนาของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับวัสดุประสานควบคุม (CP) ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาโครงสร้างของ CSH เมื่อผ่านระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น การทดสอบไมโครอินเดนเทชันพบว่า วัสดุประสาน (CP) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแรง และการคืบที่สูงกว่าวัสดุอื่นในสภาวะเริ่มต้น แต่ที่อายุ 28 วัน วัสดุประสาน (CFM) มีผลการทดสอบไมโครอินเดนเทชันที่สูงกว่า แสดงให้เห็นว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำ

คำสำคัญ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าถ่านหิน, พื้นที่ผิวจำเพาะ, โมดูลัสยืดหยุน, ค่าความแข็ง

Abstract

This research studies the development of the microstructure and mechanical properties of calcium carbide residue mixed with fly ash at early ages of 7, 14, and 28 days. The calcium carbide residue was ground until less than 10% by weight remained on a No. 325 standard sieve. It was then mixed with non-ground fly ash that met pozzolanic material standards at a ratio of 30:70 by weight. The water-to-binder ratio (w/b) was set at 0.35 and 0.40. Portland cement Type I was used as a control material for comparison, with a water-to-cement ratio (w/c) of 0.70. The microstructural development of the materials was analyzed using nitrogen and water vapor adsorption techniques to evaluate the specific surface area (BET) and pore distribution. The mechanical properties were assessed using micro-indentation techniques to analyze the elastic modulus, hardness, and creep behavior. The results showed that, at early ages, the binder made from calcium carbide residue mixed with fly ash had lower microstructural development than the control cement-based material (CP). However, by 28 days, the microstructural development of the calcium carbide residue-fly ash binder improved and became comparable to the control material, indicating the formation of calcium silicate hydrate (CSH) over time. Micro-indentation testing revealed that, at early ages, the control cement-based material (CP) exhibited higher elastic modulus, hardness, and creep resistance than the other binders. However, by 28 days, the calcium carbide residue-fly ash binder with high calcium content demonstrated superior mechanical properties compared to the low-calcium fly ash mixture.

Keywords: Calcium carbide residue, fly ash, specific surface area, modulus of elasticity, hardness value

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากปัจจุบันผู้คนรวมถึงองค์กรหรือหน่วยงานต่างๆทั่วโลกให้ความสำคัญกับปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยถือว่าเป็นส่วนหนึ่งในการก่อปัญหานี้ เนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีกระบวนการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์มาจากการเผาหินปูนที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400-1,600 องศาเซลเซียส ในการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นเหตุที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก และสิ่งสำคัญที่มากไปกว่านั้นคือ ทางกระทรวงมหาดไทยและหน่วยงานในสังกัด ได้ขับเคลื่อนนโยบายลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย เพื่อบรรลุเป้าหมายการปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) ภายในปี พ.ศ.2608 ตามที่นายกรัฐมนนตรี พลเอก ประยุทธ์ จันทร์โอชา ได้ประกาศเจตนารมณ์ไว้ในที่ประชุมผู้นำระดับโลก COP 26 ปัจจุบันทางอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีการใช้ปูนลดโลกร้อน (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก) ที่มีการใส่วัสดุทดแทนร้อยละ10 (พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 1ตัน สามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ ประมาณ 40 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) และได้มีนโยบายการลดก๊าซเรือนกระจกด้วยการปลูกไม้พื้นเมืองเพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100,000 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่ากับการปลูกต้นมากถึง 10 ล้านต้น)

เถ้าถ่านหิน เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานประเภทสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ที่ประกอบไปด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกับปูนซีเมนต์ ปัจจุบันได้มีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามยังมีเถ้าถ่านหินอีกจำนวนมาก ที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ ทำให้เกิดปัญหาทางทางสิ่งแวดล้อมต่อพื้นที่ใกล้เคียง

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ในภาคอุตสาหกรรมตัดเชื่อมโลหะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ต้องกำจัดโดยวิธีการนำมาฝังกลบในหลุมหรือนำมากองทิ้งไว้นั้นมีปริมาณมากถึง 12,000 ตัน/ปี ซึ่งกากแคลเซียมคาร์ไบด์นั้นมีส่วนประกอบหลักอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และมีคุณสมบัติเป็นด่างสูง ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพและสภาพแวดล้อมใกล้เคียงไม่สามารถทำการเกษตรได้ ปัจจุบันมีผู้วิจัยได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับดินเพื่อปรับสภาพดินและนิยมนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ในการบ่มผลไม้ให้สุกเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังมีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย

จากปัญหาดังกล่าว มีผู้วิจัยได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่นเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตา เพื่อเป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่วัสดุทั้งสองชนิดจะพัฒนาเป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ได้ ช่วงต้นงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพเช่น อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหิน กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ที่สำคัญไปกว่านั้นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของกากแคลเซียมผสมเถ้าถ่านหินนั้นมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในสภาวะเริ่มต้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนและไอน้ำ

เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและต่ำในช่วงอายุเริ่มต้น

เพื่อทดสอบโมดูลัสยืดหยุน ความแข็ง และการคืบของเพสต์ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน โดยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีหลากหลายปัจจัยที่ต้องควบคุมที่อาจจะส่งผลกระทบถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ดังนั้นในงานวิจัยจึงจำกัดตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้ กำหนดให้อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินมีค่าคงที่เท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 [5] ไม่เกินร้อยละ 10 กำหนดให้วัสดุประเภทเถ้าถ่านหินต้องมีองค์ประกอบทางด้านเคมีที่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ได้ตามมาตรฐาน ASTM C618 [6]

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่น ๆ สามารถช่วยลดปริมาณของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อเป็นแนวทางในการพลักดันและสนับสนุนแนวทางที่จะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์นำไปใช้งานได้จริง

ทำให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถานหินเมื่อเทียบกับโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์ปกติ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) หรือเถ้าลอย เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิต กระแสไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีอนุภาคขนาด 1 - 150 ไมโครเมตร มีสีเทา เทาดำ หรือ สีน้ำตาล โดยเถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน โดยทำการดักจับเถ้าลอยด้วยเครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) จากนั้นรวบรวมเถ้าถ่านหินไปเก็บไว้ในไซโล องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของ

ออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อมขณะเผา หรือเปลี่ยนแปลงตามระบบการเผาของถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ทำให้เราสามมารถแบ่งประเภทของเถ้าถ่านหินได้ 2 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] คือ Class F และ Class C โรงผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงเผาแบบ Pulverized Coal เถ้าที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้นเตาอีกประมาณ ร้อยละ 20 และพบว่าเถ้าถ่านหินที่ได้เป็นทั้ง Class F และ Class C อย่างไรก็ตามเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C นั้นมีคุณสมบัติที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ ในงานคอนกรีต

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) เมื่อแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยมีสมการทางเคมีดังนี้ :

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$$

จากปฏิกิริยาข้างต้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหลืออยู่คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวหรือของแข็งเนื้อขาวขุ่น เป็นของเสียอุตสาหกรรมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นด่างและมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดี การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง สามารถใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็น สารเติมแต่งในคอนกรีต เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและลดการซึมผ่านของน้ำ ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีองค์ประกอบที่คล้ายกับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูน เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และคณะ 2539 [1] นำส่วนผสมของวัสดุประสานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 90 วัน สูงถึง 209 กม/ซม^2 และยังแนะนำว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความละเอียดของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ และการเพิ่มปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมดังกล่าว

สุทธินันท์ แอเดียวและคณะ 2554 [2] ได้ศึกษากำลังอัดและการซึมน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง พบว่าคอนกรีตดังกล่าวมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้ CR:FN มีการพัฒนากำลังคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของ CR:FN เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

อัครเดช ศรีเสน และคณะ 2557 [3] ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นบดจนมีความละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมผสมเถ้าถ่านหิน มีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และมีกำลังพัฒนาช่วงต้นช้า กว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามที่อายุ 90 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูง ถึง 359 กก/ซม^2 โดยไม่มีปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการต้านทานการแทรกซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมและค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการขัดสีพบว่าค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตคบคุมเมื่อคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน

ณัฐพงศ์ มกระธัช 2557 [4] ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการเทสูง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนร้อยละ 30:70 ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีต CR-OF, CR-FA และ CR-FA(10) มีค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน คอนกรีต CR-OF และ CR-FA ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 153 และ225 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 90 วันการใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและการใช้ ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ โดยคอนกรีต CR-FA(10) ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 210 และ 252 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 และ 90 วัน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ใช้สัญลักษณ์ (CP)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ : จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน ใช้สัญลักษณ์ (CR) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานมีความชื้นอยู่มาก จึงต้องนำไปอบให้แห้งเพื่อลดความชื้นจากนั้นบดจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์325 ไม่เกินร้อยละ 10

เถ้าถ่านหิน : จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีระบบการเผาแบบ Pulverized Coal ใช้อุณภูมิการเผาอยู่ในช่วง 1,000-1,400 องศาเซลเซียส โดยเลือกใช้เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่งผลิต ได้แก่ โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ใช้สัญลักษณ์ (FM) เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าบีแอลซีพี จ.ระยอง ใช้สัญลักษณ์ (FB) เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ โดยคุณภาพของวัสดุต้องผ่านมาตรฐาน ASTIM C 618 [6] ระบุไว้ว่าจำนวนเถ้าถ่านหินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

น้ำ DI (Deionized Water) : น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

น้ำปูนขาวอิ่มตัว : ปูนขาวที่ผ่านการแช่น้ำอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

3.2 การทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 1 การทดสอบวัสดุและวิธีการทดสอบ

การทดสอบ	วิธีการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าถ่านหิน	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [5]
การทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และ เถ้าถ่านหิน โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร (#325)	ทดสอบตามมาตฐาน ASTM C 430 [7] (สำหรับการหาความละเอียดของปูนซีเมนต์) และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] (สำหรับหาความละเอียดของวัสดุผงชนิดอื่นๆ)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	อนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type1	3.13	N/A
กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด	2.42	4
เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	2.49	30
เถ้าถ่านหินบีแอลซีพี	2.16	27

***หมายเหตุ N/A คือ Not Applicable*

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างเพสต์ในงานวิจัยนี้ ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานที่ปราศจากซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของซีเมนต์เพสต์ (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ก่อนการผสมตัวอย่างส่วนผสมทั้งหมดต้องเก็บอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20+1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เริ่มต้นจากใช้เครื่องผสมแบบใบพายกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นย้ายเพสต์สดเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิและปิดฝาภาชนะด้วยฟิล์มถนอมอาหารเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากส่วนผสม แล้วกวนเพสต์ที่ยังเหลวด้วยมือทุก 30 นาที เพื่อให้น้ำส่วนที่เยิ้มออกมาบนผิวเนื้อเพสต์ผสมกับเนื้อเพสต์ทั้งหมดและลดผลกระทบจากการเยิ้มน้ำ จนเนื้อของเพสต์มีลักษณะเป็นครีม แล้วเทส่วนผสมลงแบบหล่อตัวอย่าง โดยแบบหล่อตัวอย่างมี 2 แบบ โดยแบบที่ 1 จะเป็นแบบหล่อขนาด 3 x 13 x 300 มม. และแบบที่ 2 จะเป็นแบบหล่อในท่อ ที่ทำมาจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อประมาณ 16 มม. ความสูงเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มม. จากนั้นนำแบบหล่อทั้ง 2 แบบวางอยู่บนโต๊ะสั่น เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในเนื้อของเพสต์ จากนั้นใช้ฟิล์มถนอมอาหารพันแบบหล่อ เพื่อให้เพสต์อยู่ในสภาวะปิดผนึก ทำการถอดแบบหล่อ 7 วันหลังจากวันผสม บ่มตัวอย่างเพสต์ที่แข็งตัวแล้วในน้ำปูนขาวอิ่มตัว เพื่อรอทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน (นอกจากนั้นใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 เป็นวัสดุประสาน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) = 0.70)

การศึกษานี้ได้ออกแบบปริมาณส่วนผสมของวัสดุที่รวมกันทั้งหมดในการหล่อตัวอย่างนี้เท่ากับ 1,200 มิลลิลิตร กำหนดให้อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมกับเถ้าถ่านหินไว้ที่ (30:70) โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.70 (สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวควบคุม) แสดงดังตาราง 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสม

Mixes	ปริมาณของวัสดุ (กรัม)					w/b
	Cement	CR	MM	BLCP	Water	
CFM35	-	469	1095	-	548	0.35
CFM40	-	441	1029	-	588	0.40
CFB35	-	445	-	1037	519	0.35
CFB40	-	419	-	978	559	0.40
CP70	980	-	-	-	686	0.70

***หมายเหตุ CFM คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ ในอัตราส่วน (30:70)*
CFB คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินบีแอลซีพี ในอัตราส่วน (30:70)
CP คือ ตัวควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประสาน

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถรองรับเซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างได้ถึง 4 เซลล์ สามารถทดสอบขนาดพื้นที่ผิวได้ 2 แบบ แบบที่ 1ใช้การแทนที่พื้นที่ผิวตัวอย่างด้วยไนโตรเจน (N_2) และแบบที่ 2 ใช้การแทนพื้นที่ผิวด้วยไอน้ำ (H_2O) การทดสอบจะทดสอบตัวอย่างที่สภาวะเริ่มต้นที่ 7, 14 และ 28 วัน

การทดสอบโดยใช้ไนโตรเจน ใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (sample cell) จำนวน 4 เซลล์ ซึ่ง 3 เซลล์แรกมีไว้สำหรับบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารชนิดอื่นที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างออก ผ่านเครื่อง BELPREP-vac3 ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสามเป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น นำเซลล์ตัวอย่างทั้ง 4 เซลล์ ติดตั้งบนเครื่องทดสอบ BELSORP MAX X ดังแสดงในรูปที่ 2 ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 4 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นแก๊สไนโตรเจนจะผ่านเข้ามาในเซลล์ทั้ง 4 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุโดยเป็นการซึมแบบ Adsorption และเมื่อความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง (P/Po=1) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากนั้นเป็นขั้นตอน Desorption จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

การทดสอบโดยใช้ไอน้ำ สามารถใช้เซลล์บรรจุตัวอย่างได้ทั้ง 4 เซลล์ โดยไม่ต้องมีเซลล์อ้างอิง ขั้นตอนทุกอย่างจะเหมือนกับวิธีการทดสอบของไนโตรเจน แต่ข้อแตกต่างคือการเปลี่ยนจากใช้ไนโตรเจนเป็นไอน้ำในการทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่อง BELPREP-vac3



รูปที่ 2 เครื่อง BELSORP MAX X Feature

3.4.2 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุน ความแข็ง การคืบ

จากแบบหล่อแบบที่ 2 เมื่อวัสดุประสานแข็งตัว ทำการแกะแบบหล่อออก จะได้ตัวอย่างลักษณะแท่งทรงกระบอกขนาดเล็ก จากนั้นนำตัวอย่างมาตัดให้มีความหนาอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร โดยอาศัยเครื่องตัดของ Isomet 1000 ดังแสดงในรูปที่3 โดยหน้าตัดของตัวอย่างทั้งสองด้านต้องเรียบ ไม่ขรุขระ จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดแล้ว ไปทดสอบผ่านเครื่อง Micro-indentation ดังแสดงในรูปที่ 4 ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ในการทดสอบจะใช้หัวกดชนิด Brinell ที่เป็นเพชร ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดสอบให้มากกว่า 80% ให้แรงกดที่ผิวหน้าตัดตัวอย่างอย่างคงที่ ที่ 20 นิวตัน เป็นระยะเวลา 300 วินาที เมื่อครบเวลาแล้วหัวกดจะยกขึ้น ทำการทดสอบแบบนี้ซ้ำๆบนหน้าตัดตัวอย่าง โดยต้องเลื่อนจุดทดสอบทุกครั้งในการกดทดสอบ ระยะห่างในการเลื่อนจุดควรจะเลื่อนให้มีระยะห่างเท่ากันและไม่ทดสอบทับจุดเดิม ในหนึ่งชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 25 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตราฐานของการทดสอบแต่ละตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จากกราฟสามารถนำไปวิเคราะห์แทนค่าในสมการเพื่อหาความแข็ง โมดูลัสยืดหยุน การคืบ ของวัสดุ



รูปที่ 3 เครื่องตัด Isomet 1000



รูปที่ 4 เครื่อง AGS-Xplas

4. ผลการทดสอบ

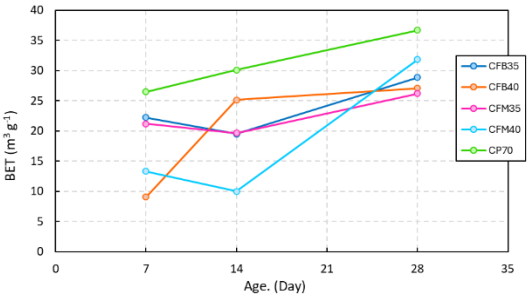
4.1 การทดสอบการดูดซับ

4.1.1 การดูดซับไนโตรเจน

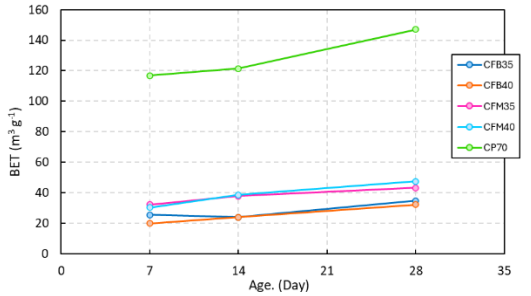
รูปที่ 5 แสดงพื้นที่ผิวของวัสดุที่ถูกดูดซับโดยไนโตรเจน ในการทดสอบโพรงที่สามารถตรวจสอบได้คือโพรงในส่วนของ CSH จากการทดสอบพบว่าการทดสอบที่ 7 วัน วัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีพื้นที่ผิวที่สูงที่สุดอยู่ที่ 59.48 (STP)g^{-1} วัสดุประสาน (CFM35), (CFM40), (CFB35) และ (CFB40) มีพื้นที่ผิวที่ต่ำลดลงมาตามลำดับ โดยวัสดุประสาน (CFB40) ที่มีพื้นที่ผิวที่ต่ำสุดมีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 40.31 (STP)g^{-1} วัสดุที่มีพื้นที่ผิวที่สูงบอกถึงการมีโพรงขนาดอนุภาคเล็กที่เป็นองค์ประกอบของ CSH เกิดขึ้นมาก ซึ่งสามารถบอกได้ว่าที่ 7 วัน วัสดุประสานที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมสูงมีการพัฒนาโครงสร้างที่ดีกว่าเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำ การทดสอบที่ 14 วัน พบว่าวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) ยังคงมีพื้นที่ผิวที่มากที่สุดและวัสดุประสานส่วนใหญ่มีแนวโน้มในการเกิด CSH ที่เพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่วัสดุประสาน (CFM40) กลับมีพื้นที่ผิวที่ลดลงจากเดิมซึ่งมีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 36.86 (STP)g^{-1} การทดสอบที่ 28 วัน พบว่าวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) ยังคงมีพื้นที่ผิวที่มากที่สุดอยู่ที่ 71.26 (STP)g^{-1} และวัสดุประสานทุกตัวมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) แสดงถึงแนวโน้มของการเกิด CSH ที่เพิ่มมากขึ้นตามอายุการทดสอบในทิศทางเดียวกัน ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (BET) ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่มีความสอดคล้องกับการผลทดสอบพื้นที่ผิวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่อายุต่างๆ โดยคิดค่า BET อยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.35 ของ P/Po ผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อายุ 14 วัน วัสดุประสานที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่าน มีการผันผวนของค่า BET ที่สูง และที่อายุ 28 วัน พบว่าค่า BET ของวัสดุประสานทั้งหมดมีค่าที่เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน โดยวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) ยังคงมีค่า BET ที่สูงที่สุดของทุกช่วงเวลาการทดสอบในสภาวะเริ่มต้น

4.1.2 การดูดซับไอน้ำ

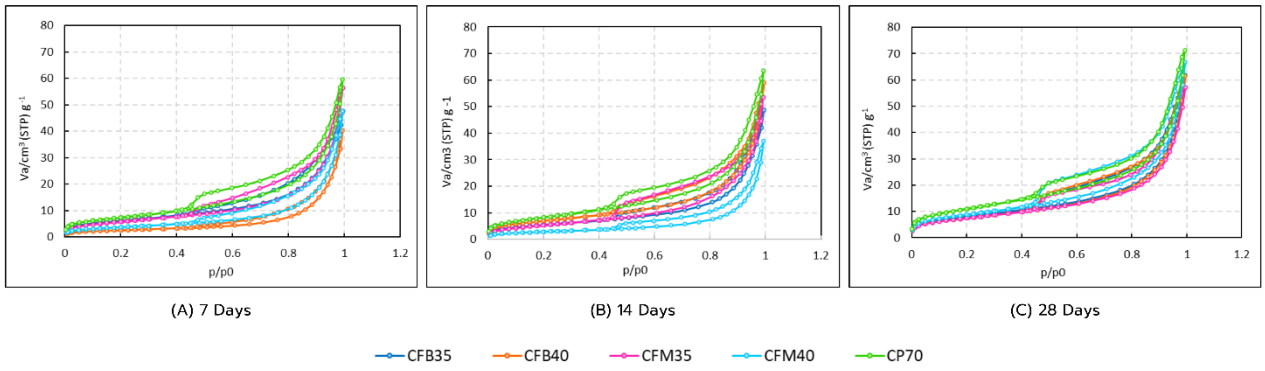
รูปที่ 6 แสดงพื้นที่ผิวของวัสดุที่ถูกดูดซับโดยไอน้ำ พบว่าในการทดสอบที่ 7, 14 และ 28 วัน มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ทั้งนี้ไอน้ำที่มีอนุภาคที่เล็กกว่าไนโตรเจน ในการทดสอบด้วยไอน้ำจึงสามารถทดสอบหาพื้นที่ผิวได้สูงกว่าไนโตรเจน การทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีพื้นที่ผิวที่สูงที่สุด อยู่ที่ 260.61 (STP)g^{-1} โดยวัสดุประสาน (CFM40), (CFM35), (CFB40) และ (CFB35) มีพื้นที่ผิวที่ต่ำลดลงมาตามลำดับ อยู่ที่ 196.19, 156.93, 149.40 และ 139.50 (STP)g^{-1} ตามลำดับ การดูดซับโดยไอน้ำจะเห็นได้ชัดว่าวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมสูงมีการเกิด CSH ที่เยอะกว่าเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำ ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (BET) ดังแสดงในรูปที่ 8 ที่มีความสอดคล้องกับการผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6 ที่อายุต่างๆ โดยคิดค่า BET อยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.35 ของ P/Po ผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน วัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ที่สูงกว่าวัสดุประสานชนิดอื่นๆอยู่มาก และวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมสูงยังคงมีค่า BET ที่สูงกว่าเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำทุกช่วงอายุการทดสอบ



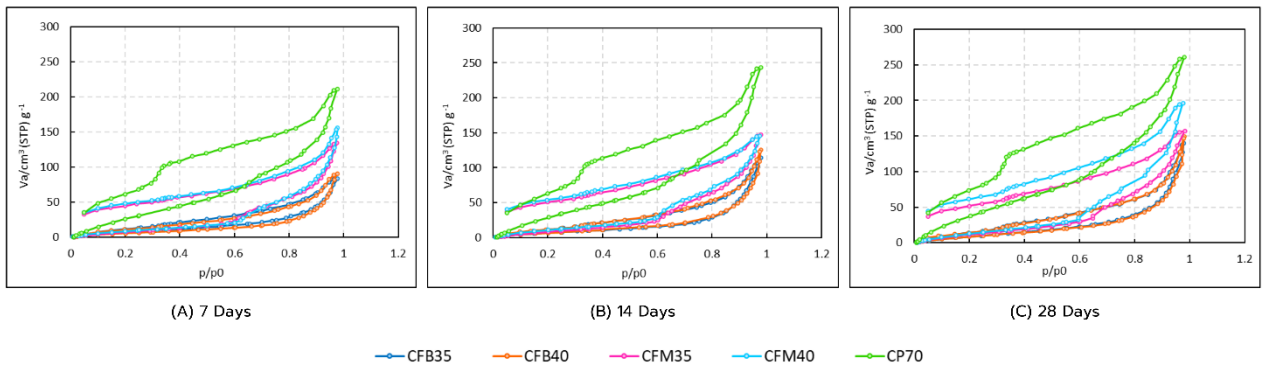
รูปที่ 7 พื้นที่ผิวจำเพาะจากการทดสอบการดูดซับไนโตรเจน



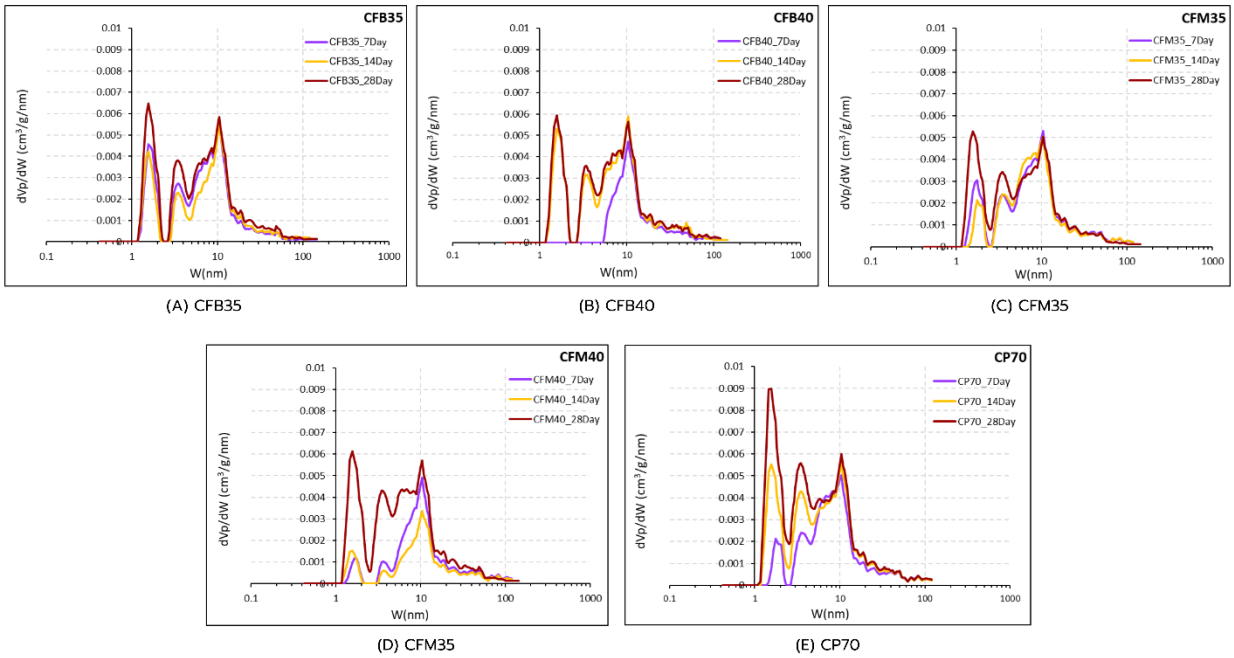
รูปที่ 8 พื้นที่ผิวจำเพาะจากการทดสอบการดูดซับไอน้ำ



รูปที่ 5 ไอโซเทอของการดูดซับไนโตรเจน



รูปที่ 6 ไอโซเทอมของการดูดซับไอน้ำ



(A) CFB35 (B) CFB40 (C) CFM35

(D) CFM35 (E) CP70

รูปที่ 9 การกระจายโพรงในตัวอย่าง

4.1.3 การพัฒนาของโครงสร้างโพรง

รูปที่ 9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การกระจายตัวของโพรงกับขนาดอนุภาคของโพรง วัสดุประสาน (CFB35) พบว่าโพรงขนาด 1.5-2 nm มีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงค่อนข้างมากอยู่ที่ 0.0065, 0.0045 และ 0.0042 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 7 และ 14 วัน ตามลับดับ แสดงว่าโพรงขนาด 1.5-2 nm มีพื้นที่การกระจายตัวเพิ่มขึ้นทุกช่วงเวลาที่ทดสอบ ที่โพรงขนาด 2-5 nm มีพื้นที่การกระจายตัวลดลงจากเดิมเป็น 0.0038, 0.0027 และ 0.0022 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 7 และ 14 วัน ตามลำดับ ที่โพรงขนาด 5-15 nm กลับพบว่ามีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงที่เพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับช่วงโพรงขนาด 1.5-2 nm โดยมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงอยู่ที่ 0.0058, 0.0056 และ 0.0054 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 7 และ 14 วัน ตามลำดับ โดยโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่ามีพื้นที่การกระจายตัวที่น้อยลง

วัสดุประสาน (CFB40) มีโพรงขนาด 1.5-2 nm มีพื้นที่การกระจายตัวที่มากพอๆกับวัสดุประสาน (CFB35) อยู่ที่ 0.0059 และ 0.0053 ที่อายุ 28 และ 14 วัน ตามลำดับ แต่ที่อายุ 7 วัน กลับพบว่ามีโพรงขนาด 1-5 nm ที่มีพื้นที่การกระจายตัวนี้น้อยมากๆ และเริ่มพบโพรงที่ขนาด 5 nm ขึ้นไป ดังนั้นโพรงขนาด 2-5 nm มีพื้นที่การกระจายตัวที่สามารถวิเคราะห์ได้ที่อายุ 14 และ 28 วัน เท่านั้นพบว่ามีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงที่ลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อพบโพรงขนาด 5-15 nm คล้ายกับรูปแบบของวัสดุประสาน (CFB35) ทั้ง 28, 14 และ 7 วัน

วัสดุประสาน (CFM35) มีโพรงขนาด 1.5-2 nm พบว่าในแต่ละช่วงอายุของการทดสอบมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงค่อนข้างต่างกัน อยู่ที่ 0.0052, 0.0030 และ 0.0021 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 7 และ 14 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวัสดุประสานที่ทำมาจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมสูงมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงขนาด 1.5-2 nm ที่อายุช่วงต้นได้น้อยแต่พื้นที่กระกระจายตัวของโพรงค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุประสานมีอายุเพิ่มขึ้น โพรงขนาด 2-5 nm มีพื้นที่การกระจายตัวลดลงทุกช่วงอายุการทดสอบและเพิ่มขึ้นที่โพรงขนาด 5-15 nm เช่นเดียววัสดุประสานอื่นๆโดยมีพื้นที่การกระจายตัวเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับโพรงขนาด 1.5-2 nm ทุกช่วงอายุการทดสอบ

วัสดุประสาน (CFM40) มีโพรงขนาด 1.5-2 nm พบว่ามีพื้นที่การกระจายตัวที่ต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัด โดยมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงสูงสุดอยู่ที่ 0.0061, 0.0015 และ 0.0011 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 14และ 7 วัน ตามลำดับ โพรงขนาด 2-5 และ 5-15 nm มีแนวโน้มคล้ายกับวัสดุประสานอื่นๆ แต่ที่เห็นได้ชัดคือความต่างของพื้นที่การกระจายอยู่ของโพรงในแต่ละช่วงอายุการทดสอบ จะเห็นได้ว่าวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมสูงยิ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุประสานชนิดเดียวกัน นั้นส่งผลถึงการพัฒนาโครงสร้างระดับจุลภาคในช่วงอายุเริ่มต้นได้

วัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีโพรงขนาด 1.5-2 nm ที่พื้นที่การกระจายตัวสูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุประสานอื่นๆที่ 28 วัน โดยมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงอยู่ที่ 0.0089, 0.0055 และ 0.0021 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 14 และ 7 วัน ตามลำดับ ที่โพรงขนาด 2-5 nm มีพื้นที่การกระจายตัวลดลงเหลือเพียง 0.0055, 0.0042 และ 0.0023 cm3/g/nm ที่อายุ 28 14 และ 7 วันตามลำดับ โพรงทั้งสองช่วงมีกระกระจายตัวเพิ่มและลดลงค่อนข้างที่จะต่างกัน แต่ในช่วงที่มีโพรงขนาด 5-15 nm นั้นทุกช่วงอายุของการทดสอบกลับมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงที่เพิ่มขึ้นจากโพรงที่มีขนาด 2-5 nm ไปในทิศทางเดียวกันและมีพื้นที่การกระจายตัวของโพรงที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.0059, 0.0056 และ 0.0050 $cm^3/g/nm$ ที่อายุ 28, 14 และ 7

วัน ตามลับดับ โพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 nm พบว่ามีพื้นที่การกระจายตัวที่ลดลงอย่างต่อเนื่องของช่วงการทดสอบในสภาวะเริ่มต้น

ในการทดสอบที่อายุ 28 วัน ของทุกวัสดุประสานมีโพรงขนาด 1.5-2 nm ในปริมาณที่มากกว่าโพรงขนาดอื่นๆ และมีแนวโน้มลดลงของปริมาณโพรงที่โพรงขนาด 2-5 nm จากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของโพรงที่มีขนาด 5-15 nm ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันมากทุกๆวัสดุประสานที่ทดสอบ และโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 nm มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจึงสามารถสรุปได้ว่าโพรงขนาดใหญ่กว่า 15 nm น้อยมากเมื่อทดสอบในสภาวะอายุเริ่มต้น

4.2 การทดสอบไมโครอินเดนเทชัน

4.2.1 โมดูลัสยืดหยุน

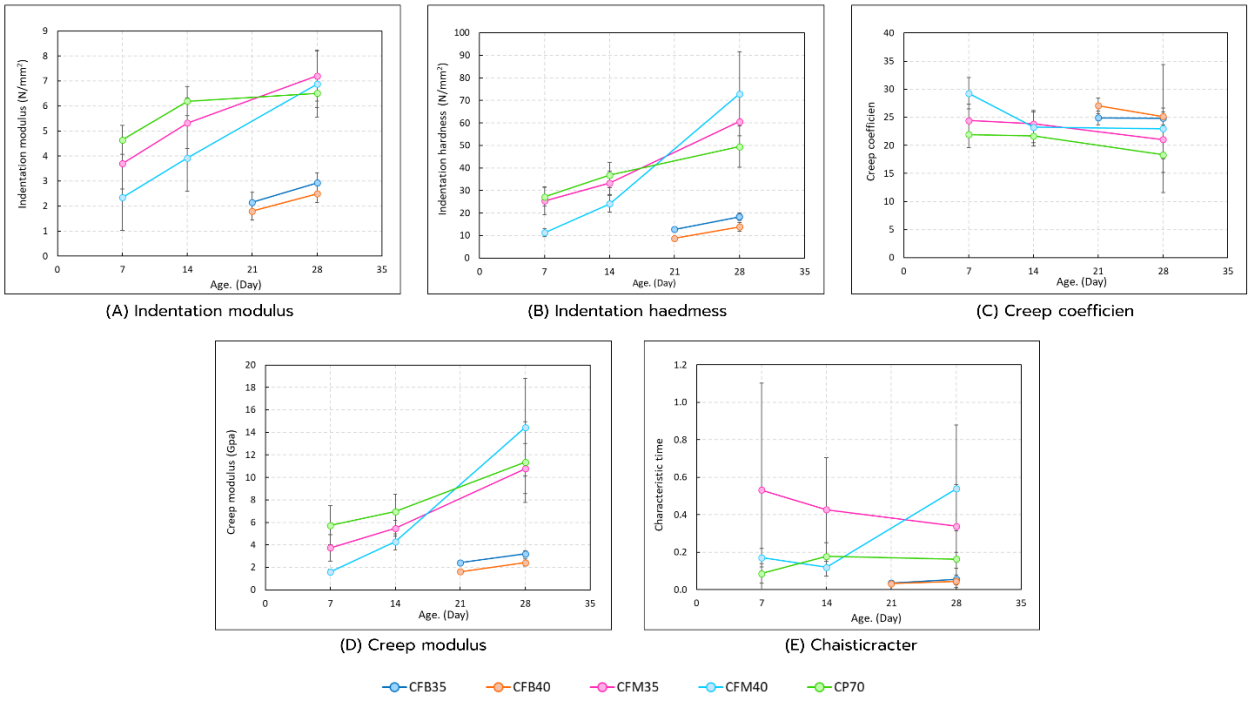
จากผลการทดสอบที่อายุ 7 วัน วัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีค่าโมดูลัสยืดหยุนที่สูงกว่าวัสดุประสาน (CFM35) และ (CFM40) โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุนอยู่ที่ 4.5, 3.7 และ 2.1 N/mm^2 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน โดยวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) ยังคงมีค่าโมดูลัสสูงที่สุด แต่ที่อายุ 28 วัน กลับพบว่าวัสดุประสาน (CFM35) มีค่าโมดูลัสยืดหยุนที่สูงที่สุดอยู่ที่ 7.2 N/mm^2 และมีวัสดุประสาน (CFM40), (CP70), (CFB35), (CFB40) ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุนลดลงมาตามลำดับ อยู่ที่ 6.8, 6.5, 2.9, 2.5 N/mm^2 ตามลำดับ

4.3 ค่าความแข็งของวัสดุ

ที่อายุการทดสอบที่ 7 วัน พบว่าวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีค่าความแข็งของวัสดุที่มากที่สุดอยู่ที่ 27 N/mm^2 โดยวัสดุประสาน (CFM35) และ (CFM40) มีค่าความแข็งต่ำลดลงมา อยู่ที่ 25 และ 11 N/mm^2 ที่อายุการทดสอบที่ 14 วัน มีทิศทางการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของวัสดุประสานในทิศทางเดียวกัน การทดสอบที่อายุ 28 วัน กลับพบว่าวัสดุประสาน (CFM40) มีค่าความแข็งที่สูงสุดอยู่ที่ 72 N/mm^2 วัสดุประสาน (CFM35), (CP70), (CFB40) และ (CFB35) ที่มีค่าความแข็งลดลงมาตามลำดับอยู่ที่ 60, 49, 19 และ 14 N/mm^2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำ (CFB) ที่ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน มีการพัฒนาของโครงสร้างที่ช้ากว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุประสานที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมสูง (CFM) ที่ที่อายุ 7 วัน

4.4 การคืบ

จากการทดสอบที่สภาวะเริ่มต้น พบว่าวัสดุประสานตัวควบคุม (CP70) มีค่าการคืบที่สูงที่สุด โดยมีวัสดุประสาน (CFM35) และ (CFM40) มีค่าการคืบที่ลดลงมา ที่อายุการทดสอบที่ 28 วัน พบว่าวัสดุประสาน (CFM40) มีค่าการคืบที่สูงที่สุดอยู่ที่ 14.45 GPa. โดยมีวัสดุประสาน (CP70), (CFM35), (CFB35) และ (CFB40) ที่ลดลงมาตามลำดับ อยู่ที่ 11.35, 10.78, 2.92 และ 2.49 GPa. ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลการทดสอบอินเดนเทชัน

5. สรุป

1. ในสภาวะเริ่มต้นวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมแคลสูง (CFM) และเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ (CFB) มีการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคขนาดเล็กที่ช้ากว่าวัสดุประสานตัวควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 แต่ที่อายุ 28 วัน วัสดุประสาน (CFM) และ (CFB) สามารถที่จะพัฒนาโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับวัสดุประสานตัวควบคุม (CP) และมีแนวโน้มที่จะมีการพัฒนาโครงสร้างอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป

2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีการก่อตัวของ CSH ที่สูงกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินประเภทแคลเซียมต่ำ

3. พื้นที่การกระจายของโพรงที่อายุ 28 วัน เมื่อเทียบกันที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.40 วัสดุประสาน (CFM) มีการก่อตัวของโพรงตั้งแต่ขนาด 2-10 nm ที่สูงกว่าวัสดุประสาน (CFB) แต่วัสดุประสานควบคุม (CP) ยังคงมีการกระจายของโพรงที่สูงกว่าว่าวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินทั้งสอง แม้ว่าวัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาไบด์จะมีการก่อตัวของ CSH ที่ต่ำกว่า แต่เมื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกล วัสดุประสานที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กลับคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

4. คุณสมบัติเชิงกลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (CFM) มีการพัฒนากำลังตามอายุที่เพิ่มมากขึ้นโดยที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าตัวควบคุม (CP)

5. ความแข็งแรงของวัสดุประสาน (CFM) มีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าวัสดุประสาน (CFB) และค่าการคืบที่มีลักษณะของผลการทดสอบที่คล้ายกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับทุนอุดหนุนโครงงานทางวิศวกรรมรวมไปถึงความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ สถานที่ และต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานเป็นอย่างยิ่ง ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดจนโครงงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ปิติศานต์ กร้ำมาตร (2539). การศึกษาส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเพื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีต. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[2] สุทธินันท์ แอเดียว วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554). กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 4, หน้า 34-42.

[3] อัครเดช ศรีเสน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2557). สมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้า 165-175.

[4] ณัฐพงศ์ มกระธัช (2557). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีตทีมีความสามารถในการเทสูง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 106-120.

[5] American Society of Testing and Materials. ASTM C 188 - 17, 2023, “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”, pp.1-2.

[6] 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.

[7] American Society of Testing and Materials. ASTM C 430 - 96, “Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve”.

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซานอ้อยบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน

Study of microstructures and mechanical proper of cement paste containing bagasse ash using adsorption and micro-indentation

ผู้แต่ง :จิณณวัตร พิษเมืองพรม[1] ธนกร อุทธโยธา[1] วรายุส ผิวขำ[1]
และปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ[2]
[1] นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
Corresponding author; E-mail address: Piyapong.su@up.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซานอ้อยบดละเอียดโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซานอ้อยบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชันโดยนำเถ้าซานอ้อยบดละเอียดที่มีอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนน้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหล่อตัวอย่าง สำหรับศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุทำการทดสอบโดยเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนและไอน้ำ และพื้นที่การกระจายโพรงในวัสดุ การศึกษาสมบัติเชิงกลทดสอบโดยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน ที่สามารถวิเคราะห์โมดูลัสยืดหยุ่น ความแข็ง และการคืบ จากผลการทดสอบพบว่า วัสดุประสานที่ใช้เถ้าซานอ้อยร้อยละ 10 ต่ำกว่าวัสดุประสานที่ใช้เถ้าซานอ้อยร้อยละ 10 และ 30 การทดสอบไมโครอินเดนเทชันพบว่า วัสดุประสานที่ใช้เถ้าซานอ้อยร้อยละ 10 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าความแข็ง และการคืบที่สูงกว่าวัสดุประมานที่ใช้เถ้าซานอ้อยร้อย 20 และ 30

คำสำคัญ : เถ้าซานอ้อย, ซีเมนต์เพสต์, โครงสร้างจุลภาค, ไมโครอินเดนเทชัน, การดูดซับ

Abstract

This research studies the microstructure and mechanical properties of cement paste mixed with finely ground bagasse ash using adsorption and micro-indentation techniques. The finely ground bagasse ash used in this study had less than 34% by weight of particles retained on a No. 325 standard sieve. It was used to partially replace cement at replacement levels of 10%, 20%, and 30% by weight of the binder to prepare samples for microstructural development analysis.The microstructure development was investigated using nitrogen and water vapor adsorption techniques to analyze pore distribution within the material. The mechanical properties were examined using the micro-indentation technique, which allows for the evaluation of elastic modulus, hardness, and creep behavior.The results showed that the binder with 10% bagasse ash replacement exhibited higher mechanical properties than those with 20% and 30% bagasse ash replacement. The micro-indentation test revealed that the elastic modulus, hardness, and creep resistance of the binder with 10% bagasse ash were superior to those of binders containing 20% and 30% bagasse ash.

Keywords: Bagasse ash, Cement paste, Microstructure, Micro-indentation, Adsorption

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยจัดเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลผลิตจากอ้อยและน้ำตาลทรายเป็นอันดับ 1 ในภูมิภาคอาเซียน ส่งผลให้มีชานอ้อย (Sugar cane waste หรือ Bagasse) จากกระบวนการผลิตน้ำตาลเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ชานอ้อยเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุ เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้า โรงงานน้ำตาล เป็นต้น ทำให้มี เถ้าชานอ้อย(Bagasse Ash)กลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นปริมาณที่มากด้วย เนื่องจากชานอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาล เพื่อลดปัญหาสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้างจากการใช้ปูนซีเมนต์จำนวนมาก ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ร่วมกับ องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ Al_2O_3 , CaO, MgO,Fe_2O_3 , K_2O,P_2O_5 และ Na_2O เป็นต้น จากองค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อย แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่นำมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ดีโดยการใช้ซีเมนต์มาผสมกับเถ้าชานอ้อยตามทฤษฎีการสร้างสารเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ระหว่างซีเมนต์กับน้ำมีผลให้เถ้าชานอ้อยเกาะกันเป็นก้อนและมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยเทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.2.3 เพื่อศึกษาการคืบ (Creep) ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ คือ เถ้าชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัดนครสวรรค์ และ ปูนซีเมนต์เพสต์ Type 1 โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยขนาด 3x13x300 มิลลิเมตร. จำนวน 10 แท่ง พอครบเวลา 3 วัน ให้ทำการแกะแบบที่หล่อทิ้งไว้ และบ่มซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยเป็นเวลา 4 เดือน ในสภาวะปิดผนึก จากนั้นเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียส พอครบกำหนดนำตัวอย่างมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน

1.4 ประโยชน์

1.4.1 ทำให้ทราบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.4.2 ทำให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.4.3 ลดปัญหาสภาวะโลกร้อน อันเนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่มาก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้บางส่วนสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และบางส่วนใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงาน และมีแนวโน้มการเพิ่มของเถ้าชานอ้อยมากขึ้นเนื่องจากการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์(Fe_2O_3)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ganesan และคณะ [1] ศึกษาผลกระทบด้านคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยได้แก่ กำลังอัด กำลังดึกแยก การดูดซึมน้ำ ซึงพบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

Chusilp และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดซึ่งประกอบด้วยกำลังอัด การซึมผ่านของน้ำและการพัฒนาความร้อน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตกำลังอัดที่ยอมรับได้

สุทธิชัย ตันเจริญ [3] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยที่เหลือจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม โดยนำเถ้าชานอ้อยที่บดละเอียดนำไปแทนปูนซีเมนต์ประเภททที่ 1 ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยอายุ 1, 3, 5, 7, 14, และ 28 วัน โดยเปรียบเทียบกำลังคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐานการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 10 เท่ากับ 215 กก/ซม2 ร้อยละ 20 เท่ากับ 238 กก/ซม2 ร้อยละ 30 เท่า 193 กก/ซม2 ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดมากกว่ามาตรฐาน และมีค่ากำลังอัดสูงสุดการทดสอบ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 OPC

3.1.2 เถ้าชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัด นครสวรรค์ ร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 50

3.1.3 น้ำ DI (Deionized Water) : น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง

3.2 การทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 1 การทดสอบวัสดุและวิธีการทดสอบ

การทดสอบ	วิธีการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188
การทดสอบความละเอียดของเถ้าชานอ้อยโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง 45 ไมโครเมตร (#325)	ทดสอบตามาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	อนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1	3.12	N/A
เถ้าชานอ้อย	2.12	28

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าชานอ้อยบดละเอียด
SiO_2	20.90	74.72
Al_2O_3	4.80	4.62
Fe2O3	3.40	2.46
CaO	65.40	4.73
MgO	1.30	1.60
Na_2O	0.30	0.00
K2O	0.40	2.06
SO_3	2.70	0.26
LOI	1.00	7.70

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

นำวัสดุ ปูนซีเมนต์ประเภทที่1 เถ้าชานอ้อย และน้ำที่ใช้ในการผสม เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องสาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนทำการผสม นำมาวัสดุมาชั่งน้ำหนักตามส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ ทำการผสมลงในหม้อผสมมอร์ต้าขนาด 5 ลิตร โดยทำการผสมช้าๆ 3 นาที และคนต่อด้วยมือ 1 นาที จากนั้นผสมด้วยอัตราที่เร็วขึ้น 3 นาที เมื่อทำการผสมเสร็จให้นำส่วนผสมเทลงหม้อสแตนเลส ทำขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นอีก 1 รอบ เป็นจำนวน 1 หม้อผสมพอทำขั้นตอนดังกล่าวครบเสร็จในทุกๆ 30 นาทีต่อจากการผสมเสร็จ ให้ทำการคนด้วยมือจน จนส่วนผสมมีลักษณะเป็นเนื้อครีม จากนั้นทำการนำส่วนผสมมาหล่อในตัวอย่างที่มีขนาด 13x30x300 มิลลิเมตร จำนวน 10 ช่อง วางบนเครื่องสั่นขนาด 50 Hz เป็นเวลา 1 นาที หลังจากหล่อเสร็จ ทำการห่อหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นชีนพลาสติกและผ้าชุบน้ำบิดหมาดแล้วห่อด้วยแผ่นชีนพลาสติกอีก 1 รอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แล้วเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องสาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นทำการแกะตัวอย่างและบ่มตัวอย่างไว้ในสภาพปิดผนึก ทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20±1 องสาเซลเซียส เป็นเวลา 4 เดือน จากนั้นนำไปทดสอบต่อ

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสม

Mixes	ปริมาณวัสดุ (กรัม)			w/b
	Cement	BA	Water	
B45A10	1145.58	127.29	572.79	0.45
B45A20	999.06	249.77	561.97	
B45A30	857.98	367.71	551.56	
B55A10	1016.22	112.91	621.03	0.55
B55A20	888.15	222.04	610.60	
B55A30	764.30	327.56	600.52	

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 วิธีการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการดูดซับ

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนโดยเครื่อง BELSORP MAX X ดังรูปที่ 1 สามารถทดสอบขนาดพื้นที่ผิวได้ 2 แบบ แบบที่ 1ใช้การแทนที่พื้นที่ผิวตัวอย่างด้วยไนโตรเจน (N2) และแบบที่ 2 ใช้การแทนพื้นที่ผิวด้วยไอน้ำ(H2O) การทดสอบจะทดสอบตัวอย่างที่ระยะเวลา 4 เดือน หรือ 120 วัน

การทดสอบโดยใช้ไนโตรเจน ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ได้ 100-110 มิลลิกรัมจากนั้นนำตัวอย่างบรรจุลงในเซลล์ ก่อนการทดสอบต้องไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารชนิดอื่นที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างออก ผ่านเครื่อง BELPREP-vac3 ดังรูปที่ 4 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง เพื่อทำให้เซลล์ ที่บรรจุวัสดุเป็นสูญญากาศและภายในเซลล์ไม่มีอากาศหรือโมเลกุลแก๊สชนิดอื่นจากนั้น ติดตั้งบนเครื่องทดสอบ BELSORP MAX X ดังรูปที่ 1และภาชนะที่บรรจุแก๊สไนโตรเจนจะยกตัวขึ้นจากนั้นแก๊สไนโตรเจนจะผ่านเข้ามาในเซลล์ โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุโดยเป็นการซับแบบ Adsorption และเมื่อความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างคงที่ (P/P0=1) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแล้วจากนั้นเป็นขั้นตอน Desorption ค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับได้ เครื่องจะทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET (Brunauer-Emmett-Tellet) แสดงผลเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

การทดสอบโดยใช้ไอน้ำ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ได้ 25-26 มิลลิกรัม จะทำการทดสอบคล้ายกับวิธีการเดียวกับการทดสอบโดยใช้ไนโตรเจน โดยเปลี่ยนจากการใช้ไนโตรเจนเป็นน้ำ



รูปที่ 1 เครื่อง BELSORP MAX X Feature



รูปที่ 2 เครื่อง Isomet 1000



รูปที่ 3 เครื่อง AGS-Xplas

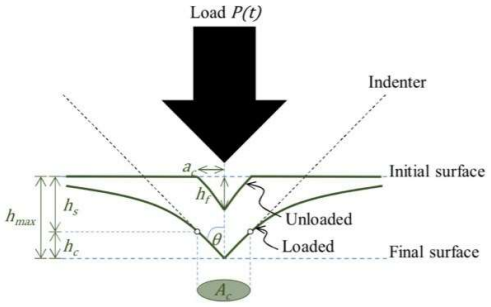


รูปที่ 4 เครื่อง BELPREP-Vac3

3.4.2 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

นำตัวอย่างที่เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิมาตัดให้มีความหนาอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร โดยเครื่องตัด Isomet 1000 ดังรูปที่ 2 โดยหน้าตัดของตัวอย่างทั้งสองต้องเรียบ จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดแล้วไปทดสอบโดยเครื่อง AGS-Xplas ดังรูปที่ 3 และในการทดสอบให้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้มากกว่า 95% โดยใช้แรงกดอยู่ที่ 20 นิวตัน แล้วปล่อยให้แรงกดกระทำต่อตัวอย่างเป็นเวลา 300 วินาที และทำการทดสอบในจุดต่อไปห่างจากจุดเดิม 0.75 มิลลิเมตร ทำการทดสอบให้ครบ 25 จุด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ



Projected Contact Area

For a conical indentation probe

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S}$$

The projected contact area

$$A_C = \sqrt{3} h_c^2 \tan^2 \theta$$

The contact radius

$$a_c = \frac{\sqrt{A_C}}{\sqrt{\pi}}$$

Physical Properties

Indentation modulus

$$M = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A_C}} = \frac{S}{2\beta a_c}$$

Identation hardnesss

$$H = \frac{P_{max}}{A_C}$$

Creep Properties

Creep coefficient

$$C = \frac{h_{max} - h_{ini}}{h_{ini}}$$

h_c คือ ความลึกที่หัวกดสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ

h_f คือ ความลึกสุดท้ายหลังจากหัวกดถูกถอน

ε คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.72

S คือ ค่าความแข็งของการสัมผัสระหว่างหัวกดกับวัสดุ

β คือ ค่าของหัวกดเท่ากับ 1.034

A_c คือ พื้นที่สัมผัสที่แท้จริงของหัวกดกับวัสดุ ซึ่งมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็ง

a_c คือค่าค่ารัศมีของบริเวณที่หัวกดสัมผัสกับวัสดุ

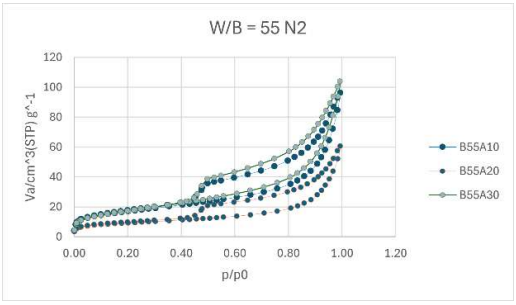
4.ผลการทดสอบ

4.1 การทดการดูดซับ

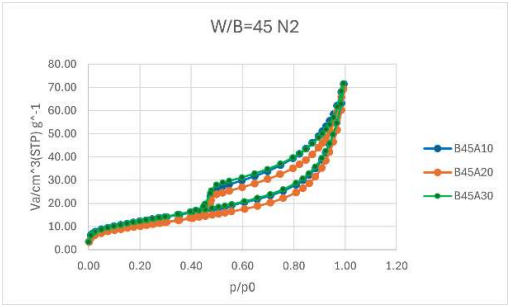
4.1.1การดูดซับไนโตรเจน

รูปที่ 5a กราฟ Adsorption Isotherm ด้วยไนโตรเจนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Pressure และปริมาตรของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ วัสดุประสาน B55A30 และ B55A10 มีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 104, 96.3 (STP)g^{-1} มากกว่าวัสดุประสาน B55A20 ที่มีค่าเท่ากับ 60.5 (STP)g^{-1} ทำให้มีพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนที่น้อยกว่าวัสดุประสาน B55A30 และ B55A10 สังเกตว่า วัสดุประสาน B55A20 มีปริมาณการดูดซับด้วยไนโตรเจนที่ต่ำกว่า B55A30 ละ B55A10

รูปที่ 5b กราฟ Adsorption Isotherm ด้วยไนโตรเจน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Pressure และปริมาตรของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ วัสดุประสาน B45A30 และ B45A10 มีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 71.7,71.5 มากกว่าวัสดุประสาน B45A20 ที่มีค่าเท่ากับ 69.4 ทำให้มีพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนที่น้อยกว่าวัสดุประสาน B45A30 และ B45A10สังเกตว่า วัสดุประสาน B45A20 มีปริมาณการดูดซับด้วยไนโตรเจนที่ต่ำกว่า B55A30 ละ B55A10



รูปที่ 5a

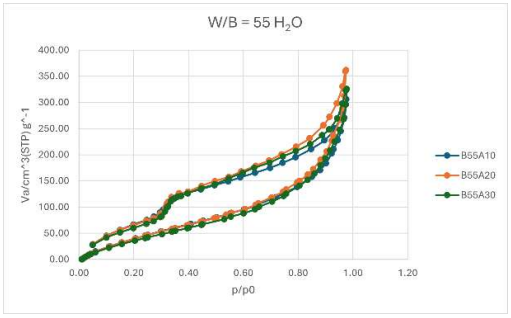


รูปที่ 5b

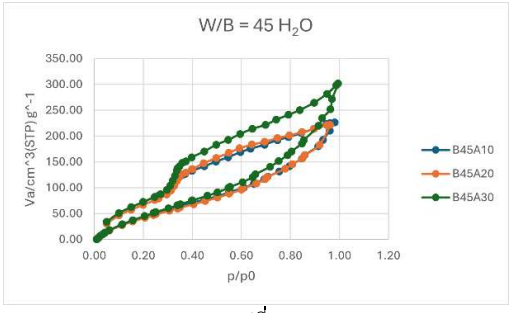
4.1.2 การดูดซับไอน้ำ

รูปที่ 6a กราฟ Adsorption Isotherm ด้วยน้ำแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Pressure และปริมาตรของน้ำที่ถูกดูดซับ วัสดุประสาน B55A20 และ B55A30 มีปริมาตรการดูดซับด้วยน้ำเท่ากับ 362, 325 (STP)g^{-1} มีค่ามากกว่าวัสดุประสาน B55A10 ที่มีค่าเท่ากับ 306.4 (STP)g^{-1}ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำที่น้อยกว่า

รูปที่ 6b กราฟ Adsorption Isotherm ด้วยน้ำ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Pressure และปริมาตรของน้ำที่ถูกดูดซับ วัสดุประสาน B45A30, B45A10 มีปริมาตรการดูดซับด้วยน้ำเท่ากับ 301.6, 226.7 (STP)g^{-1}มีค่ามากกว่าวัสดุประสาน B45A20 ที่มีปริมาณการดูดซับด้วยน้ำเท่ากับ 223.5 (STP)g^{-1} ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่า วัสดุประสาน B45A30, B45A10



รูปที่ 6a

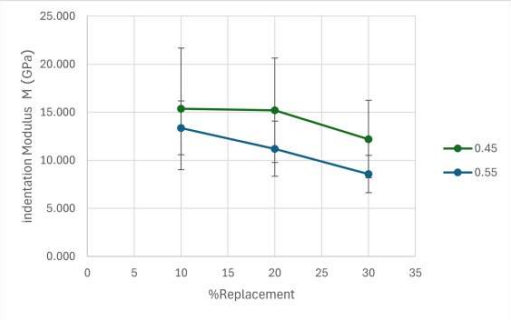


รูปที่ 6b

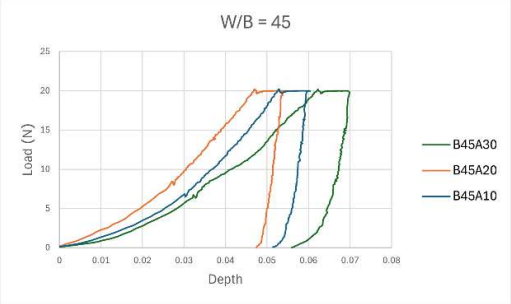
4.2 การทดสอบไมโครอินเดนเทชัน

4.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่น

รูปที่ 7 วัสดุประสาน B55A10,B55A20 และ B55A30 มีค่าต้านทานการยุบตัวเท่ากับ 15.4 , 15.2 และ 12.2 GPa ตามลำดับ มีค่าน้อยกว่าวัสดุประสาน B45A10,B45A20 และ B45A30 ที่เท่ากับ 13.4 11.2 และ 8.6 GPa ตามลำดับ และแนวโน้มของกราฟมีทิศทางเดียวกันคือลดต่ำลง เนื่องจากการใช้น้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่ต่ำ ส่งผลให้มีค่าการต้านทานการยุบตัวที่มาก



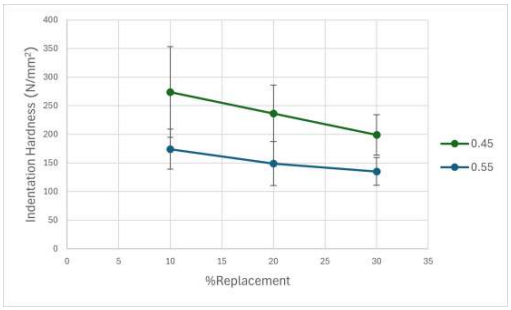
รูปที่ 7



รูปที่ 8

4.2.2 ค่าความแข็งของวัสดุ

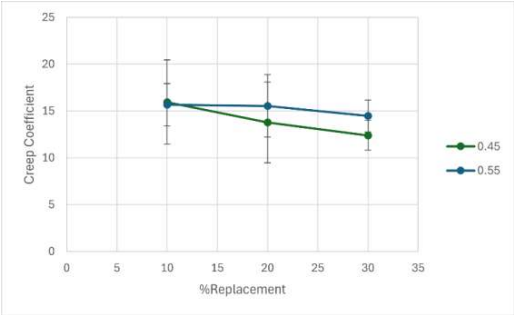
รูปที่ 9 แสดงค่า Indentation Hardness วัสดุประสาน B55A10,B55A20 และ B55A30 มีค่าความแข็งเท่ากับ 174 148 และ 135 N/mm2 มีค่าน้อยกว่าวัสดุประสาน B45A10,B45A20 และ B45A30 ที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 273 236 และ 198 N/mm2 และแนวโน้มของกราฟมีทิศทางเดียวกันคือลดต่ำลง เนื่องจากการใช้น้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่ต่ำ ส่งผลให้มีค่าความแข็งที่มาก



รูปที่ 9

4.2.3 การคืบ

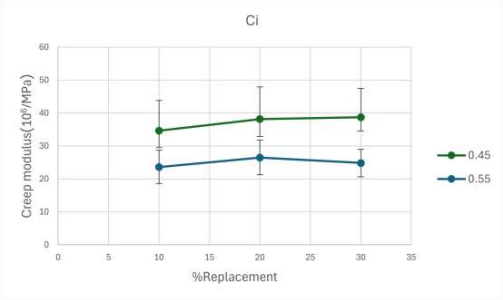
รูปที่ 10 แสดงค่าCreep Coefficient วัสดุประสาน B55A10,B55A20 และ B55A30 มีค่าการเสียรูปของวัสดุเท่ากับ 15.7,15.4 และ 14.5 ตามลำดับมีค่าการเสียรูปของวัสดุที่มากกว่าวัสดุประสาน B45A20 และ B45A30 เท่ากับ 13.8 และ 12.4 ตามลำดับ วัสดุประสาน B55A10 มีค่าการเสียรูปของวัสดุที่มากที่สุดเท่ากับ 15.9 และแนวโน้มของกราฟมีทิศทางเดียวกันคือลดต่ำลง เนื่องจากการใช้ค่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าการเสียรูปที่น้อย



รูปที่ 10

4.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ

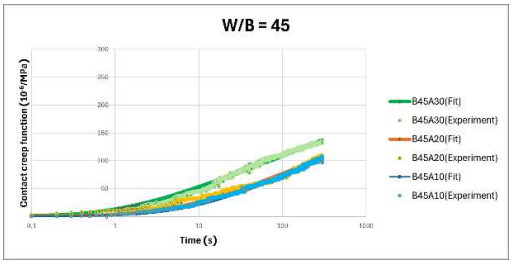
รูปที่ 11 แสดงค่า Creep modulus วัสดุประสาน B55A10,B55A20 และ B55A30 มีค่าการต้านทานการเสียรูปของวัสดุด้วยแรงกระทำคงที่ต่อเนื่องในระยะเวลานาน ที่น้อยกว่าวัสดุประสาน B45A10,B45A20 และ B45A30 ดังนั้นจึงมีค่ามากการต้านทานการเสียรูปที่น้อยกว่า วัสดุประสาน B45A10,B45A20 และ B45A30



รูปที่ 11

4.2.5 ค่าความสัมพันธ์เวลากับพฤติกรรมการคืบ

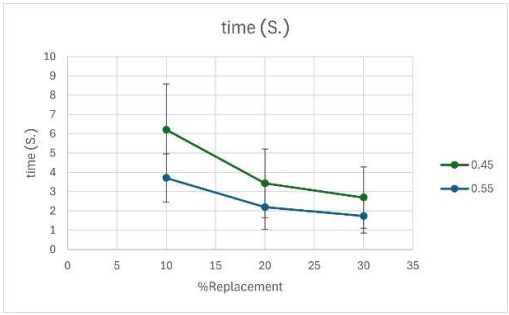
รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา และพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกระทำที่ต่อเนื่อง วัสดุประสาน B45A10 มีพฤติกรรมการต้านทานการคืบตัวที่ดีกว่าวัสดุประสาน B45A20 และ B45A30 ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าการต้านทานที่ต่ำ



รูปที่ 12

4.2.6 ค่าความสัมพันธ์เวลากับการแทนที่

รูปที่ 13 เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มากขึ้น ส่งผลให้วัสดุประสาน B55A10,B55A20 และ B55A30 มีค่าเวลาที่ลดลง เช่นเดียวกับวัสดุประสาน B45A10,B45A20 และ B45A30 การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยในช่วงร้อยละ 10-20 จะใช้เวลาที่มากกว่าช่วงร้อยละ 20-30



รูปที่ 13

5 สรุป

5.1 การทดสอบดูดซับด้วยไนโตรเจนและไอน้ำ

การดูดซับด้วยไนโตรเจนที่อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.45 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีปริมาณการดูดซับด้วยไนโตรเจนที่ต่ำกว่า B55A30 ละ B55A10 ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนที่น้อยกว่า

การดูดซับด้วยน้ำที่อัตราวัสดุประสานเท่ากับ 0.55การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 มีการดูดซับน้ำน้อยที่สุด และอัตราวัสดุประสานเท่ากับ 0.45การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีการดูดซับน้อยที่สุด

5.2 การทดสอบไมโครอินเดนเทชัน

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (M) อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่มากและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มาก มีผลต่อการต้านทานการยุบตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยและอัตราร้อยละที่มาก ทำให้วัสดุมีค่าต้านทานการยุบตัวที่ต่ำ

ค่าความแข็งค่า (H) อัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่มากและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มาก มีผลต่อค่าความแข็งของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย อัตราและร้อยละที่มาก ทำให้วัสดุมีความแข็งที่ต่ำ

การคืบ (C) อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าต้านทานการเสียรูปร่างน้อยกว่าอัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยาที่สนับสนุนการดำาเนินการวิจัยให้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ในการสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยและต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานเป็นอย่างยิ่งที่ให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนโครงงานสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] สุทธิชัย ตันเจริญ และ อภิเสฏฐ์ สุวรรณสะอาด (2565) การศึกษาสัดส่วนของเถ้าชานอ้อยที่มีผลต่อกำลังอัดในคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[2] สุริยัน พันพิพัฒน์ สิทธิศักดิ์ อันสนั่น และเรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ (2565) ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในงานคอนกรีตบดอัด วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 33 ฉบับที่

[3] Ganesan, K. et al. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and concrete composites, 2007, 29 (6), pp. 515- 524

[4] Chusilp, N. et al. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. Cement and concrete composites, 2009, 23 (11), pp. 3352- 3358

[5] American Society of Testing and Materials. ASTM C 430 - 96,“Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve

การศึกษาความแตกต่างของการหดตัวแห้งระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและสูง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

Study of difference of drying shrinkage between cement pastes containing low and high calcium fly ash under different relative humidities

นายธนกร เต็มตันนา[1] นายณัฐวีร์ คุณเมือง[2] นายฉัตรมงคล มณีวรรณ์[3*]
ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

[1,2,3] นักศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**; E-mail address:64101440@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและสูง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินในสัดส่วน 0%, 20%, 35% และ 50% พร้อมควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตัวอย่างถูกบ่มในสภาวะปิดผนึกเป็นเวลา 365 วัน ที่อุณหภูมิ 20±1℃ และทดสอบภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 11%, 23%, 40%, 55%, 79% และ 95%

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 55% การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ 11% และ 23% ซึ่งมีอัตราการสูญเสียน้ำสูงสุด นอกจากนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่เถ้าถ่านหิน 50% มีค่าการหดตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่มีอัตราการแทนที่ต่ำกว่า เนื่องจากอนุภาคของเถ้าถ่านหินช่วยเติมเต็มช่องว่าง ส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นสูงขึ้น

การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจนแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ไม่มีเถ้าถ่านหินมีค่าการดูดซับน้ำสูงกว่า ซึ่งทำให้เกิดแรงตึงผิวสูงและการหดตัวมากขึ้น ขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราการแทนที่เถ้าถ่านหินสูงมีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น ส่งผลให้การดูดซับลดลงและการหดตัวลดลงตามไปด้วย

คำสำคัญ: การหดตัวแห้ง, เถ้าถ่านหิน, ความชื้นสัมพัทธ์, ซีเมนต์เพสต์

Abstract

This study investigates the drying shrinkage of cement paste incorporating low- and high-calcium fly ash under different relative humidity conditions. Type I Portland cement was partially replaced with fly ash at 0%, 20%, 35%, and 50%, while maintaining water-to-binder ratios of 0.35 and 0.55. The samples were sealed and cured for 365 days at a temperature of 20±1°C, then tested under relative humidity levels of 11%, 23%, 40%, 55%, 79%, and 95%.

The results indicate that relative humidity below 55% significantly increases drying shrinkage, with the highest water loss rates observed at 11% and 23%. Additionally, cement paste with 50% fly ash replacement exhibited lower shrinkage compared to mixtures with lower replacement levels. This reduction is attributed to the fly ash particles filling voids, enhancing the density of the cement paste matrix.

Water vapor and nitrogen adsorption tests further revealed that materials without fly ash replacement exhibited higher water absorption, leading to increased surface tension and greater shrinkage. In contrast, cement pastes with higher fly ash replacement had denser structures, resulting in reduced absorption and lower shrinkage.

Keywords: Drying shrinkage, fly ash, relative humidity, cement paste

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในบริเวณใกล้เคียงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตได้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกินภาวะเรือนกระจก ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ส่งผลให้น้ำในโครงสร้างคอนกรีตเกิดการระเหยมากขึ้น ก่อให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต ดังนั้น จึงมีการวิจัยพัฒนาส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง กระทั่งประกาศใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตาบดละเอียด เพื่อช่วยลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงแม้ว่าจะมีการแก้ปัญหาโดยใช้วัสดุประสานทดแทนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ แต่คอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานทดแทนซีเมนต์ก็ยังต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แปรปรวนจึงก่อให้เกิดความเสียหายหรือแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตมีสาเหตุหลักของการสูญเสียน้ำของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยการหดตัวของคอนกรีตนั้นเกิดจากน้ำที่เติมเต็มอยู่ในช่องว่างโพรงคาปิลลารีของคอนกรีตเกิดการระเหยออกเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่แปรปรวนในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่องว่างโพรงอากาศในคอนกรีตทำให้คอนกรีตบริเวณผิวสัมผัสกับอากาศสูญเสียความชื้นไปจึงทำให้คอนกรีตที่อยู่โดยรอบช่องว่างคาปิลลารีอัดตัวเข้ามาเป็นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยความชื้นสัมพัทธ์จึงถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหดตัวแห้งของคอนกรีต โดยการหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ

50 เกิดจากการสูญเสียน้ำโพรงคาปิลลารีเป็นหลักโดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อน ตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดเล็กลง การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึง 50 ของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้ จะเกิดในอัตราต่ำกว่าช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่เกินร้อยละ 50 เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลลารีถูกขจัดออกไปและแรงตึงผิวจะหมดไป ซึ่งการหดตัวในช่วงต่ำกว่าร้อยละ 100 ของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราสูง และผสมวัสดุประสานทดแทนซีเมนต์ ทำให้เกิดการหดตัวแห้งของปูนซีเมนต์น้อย เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์น้อย ดังนั้นการหดตัวแห้งจึงมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างคอนกรีตมากกว่าการหดตัวชนิดอื่นวัสดุผสมจำพวกปอซโซลานที่เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสาน อาทิ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าก้นเตาบดละเอียด

ทางผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของความสามารถเพิ่มคุณสมบัติที่ดีในด้านต่างๆอาทิเช่น การใช้เถ้าถ่านหินผสมกับซีเมนต์เพสต์ การทำงานได้ของคอนกรีตสด ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การรับกำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการต้านทานซัลเฟต

เถ้าก้นเตาบดละเอียดและเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง ที่มีผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยโรงงานผลิตไฟฟ้า มีเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยปริมาณมากต่อวัน จึงเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการจัดทิ้งอีกทั้งเป็นมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม จึงได้นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเพิ่มศักยภาพในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ และเพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆให้ได้ส่วนผสมในคอนกรีตสมรรถณะสูงที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความแตกต่างของการหดตัวแห้งระหว่างซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและสูง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน
1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีผลต่อการหดตัวแห้ง
1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน
1.2.4 เพื่อศึกษาการหดตัวที่คืนกลับได้และการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้ของซีเมนต์เพสต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยกำหนดอัตราส่วนเท่ากับ 0.35 และ 0.55 เพื่อศึกษาการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มซีเมนต์เพลสต์ในสภาวะปิดผนึก ที่อุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 365 วัน และวัดการเปลี่ยนแปรงความยาวและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพลสต์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11, 23, 40, 55, 79, และ 95 ที่อายุการตากแห้ง 7, 14, 28, 56, 90, 180 และ 210 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน
1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่
1.4.3 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของเถ้าถ่านหินบดละเอียดที่มีผลต่อการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์
14.4 ทำให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน
1.4.5 ทำให้ทราบถึงการหดตัวที่คืนกลับได้และการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้ของซีเมนต์เพสต์

1.5 แผนการทำงาน

ขั้นตอน	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.การตัดตัวอย่างซีเมนต์เพสต์												
2.การวัดตัวอย่างซีเมนต์เพสต์												
3.การทดสอบการหดตัวแบบคืนกลับได้และคืนกลับไม่ได้ของซีเมนต์เพสต์												
4.การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน												
5.การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซเมนต์เพสต์												

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงภายในโครงสร้างในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ ซีเมนต์เพสต์มีลักษณะเป็นวัสดุที่มีโพรงคาปิลลารีซึ่งเต็มไปด้วยน้ำจากกระบวนการไฮเดรชันจะสร้างผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานี้ขึ้นมาคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งจะสร้างโครงสร้างรูพรุน เมื่อซีเมนต์เพสต์แห้ง น้ำในโพรงจะระเหยออก ทำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในโพรงเล็กๆ

ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง (> 80% RH) การหดตัวจะน้อยเนื่องจากการระเหยของน้ำในวัสดุเกิดขึ้นช้าหรือแทบไม่เกิดการระเหยเลย ความชื้นปานกลาง (50% - 70% RH) การหดตัวจะเกิดขึ้นเป็นบางส่วนเนื่องจากวัสดุเกิดการระเหยน้ำออกมาบางส่วน และความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 50% RH) การหดตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและรุนแรง เนื่องจากวัสดุจะระเหยน้ำออกมาอย่างรวดเร็ว การหดตัวในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นปานกลางถึงสูงจะอยู่ในระดับที่ควบคุมและคืนตัวได้ แต่ในสภาพที่มีความชื้นต่ำอาจทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแห้งในความชื้นต่างๆคือ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water to cement ratio) ยิ่งวัสดุมีอัตราส่วนที่สูง การสูญเสียน้ำจะมากขึ้นทำให้การหดตัวในสภาพความชื้นต่ำรุนแรงมากขึ้น และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยลดการหดตัวที่มากเกินไปเมื่อวัสดุสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ

ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นปานกลางถึงความชื้นสูงจะเกิดการหดตัวที่สามารถกลับคืนสู่ขนาดเดิมได้ (Reversible Shrinkage) เมื่อวัสดุได้รับความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำในโพรงของวัสดุที่ระเหยออกเมื่อวัสดุแห้ง จะรับน้ำกลับคืนโครงสร้างเดิม ส่วนสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำจะเกิดการหดตัวที่ไม่สามารถกลับคืนได้ (Irreversible Shrinkage) เมื่อได้รับความชื้นมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโพรงในวัสดุเกิดการระเหยออกอย่างรุนแรง ทำให้โครงสร้างโพรงภายในวัสดุเปลี่ยนแปลงไปอย่างถาวร

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Sugimoto และ คณะ (2018) ได้นำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1) ถูกนำมาใช้ในการทดลอง โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น L40 และ L55 กระบวนการผสมดำเนินการโดยใช้เครื่องผสมที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1.5 นาที จากนั้นเติมน้ำและผสมต่อเนื่องอีก 1.5 นาทีภายใต้เงื่อนไขควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 ℃ เป็นเวลา 1 วันก่อนการผสม [1]

การผสมดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง โดยมีการกวนทุก 30 นาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการแยกตัว หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกเทลงในแม่พิมพ์ภายใต้สภาวะปิดสนิท และถอดแบบหลังจาก 3 วัน แผ่นคอนกรีตถูกตัดให้มีความยาว 100 มม. โดยใช้เครื่องตัดที่มีความแม่นยำ และเก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ 20 ℃ จนถึงช่วงอายุ 3, 7, 28 และ 90 วัน หลังการผสม ก่อนเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง

โดยในการบ่มตัวอย่างโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ ยิ่งอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงเท่าใด การหดตัวเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำก็จะยิ่งเห็นได้ชัดมากขึ้นเท่านั้น

2.2.2 บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ ได้มีการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนผสมและสภาวะอุณหภูมิในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยระยอง โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องและการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40℃, 60℃ และ 80℃ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง [2]

ผลการทดสอบพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60℃ การบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า สำหรับการหดตัวแบบแห้ง พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องมีค่าการหดตัวสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า โดยค่าการหดตัวลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองมีค่าการหดตัวสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่

2.2.3 พชร์พจี มากภิบาล และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล (2019) ได้ศึกษาผลการทดสอบประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่มีความแตกต่างกัน 4 สัดส่วนผสม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) ที่ 0.35 และ 0.50 ประกอบด้วย มอร์ตาร์ควบคุม และมวลรวมเบาสังเคราะห์แทนที่ทราย ร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดทั้งหมด โดยความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของตัวอย่างที่ทดสอบกรณีมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และ กรณีมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ซึ่งทุกส่วนผสมในทั้งสองกรณีดังกว่ามีการหดตัวแบบแห้งมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมที่มากกว่าและทำให้มีการระเหยของความชื้นมากขึ้นเพิ่ม [3]

2.2.4 Ippei Maruyama (2010) ได้มีการเตรียมตัวอย่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป (เรียกว่า N), ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนปานกลาง (M) และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ(L)ถูกผสมโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.55 และ 0.40 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเหล่านี้แสดงในตารางที่ 1 เพื่อป้องกันการแยกตัว ได้รับการหมุนเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจนได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อนจะเทลงในแม่พิมพ์ตัวอย่างถูกเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 ± 1 ℃ และถูกถอดแบบระหว่าง 2 ถึง 5 วัน จากนั้นก็ถูกบ่มภายใต้สภาวะที่มีความชื้นอิ่มตัวจนถึงวันที่เริ่มการทดสอบที่อายุ 91 วัน ผลการทดลองพบว่าการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพลสต์เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำกว่า 40% และมีความแตกต่างระหว่างเส้นทางของการหดตัวและการขยายตัวเมื่อซีเมนต์เพสต์ปล่อยน้ำและดูดซับน้ำกลับมา โดยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงและพื้นที่ผิวมาก แสดงการหดตัวมากขึ้นนอกจากนี้พบว่า ความดันไฮเดรชันลดลงแบบเอ็กซ์โพแนนเชียลตามความหนาของชั้นน้ำที่ถูกดูดซับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงไฮเดรชันเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ [4]

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

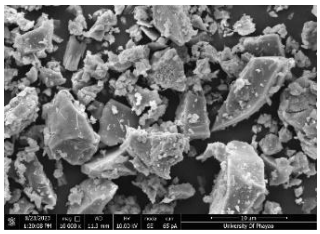
3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอก.15 มีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 59.07%

3.1.2 เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 16.55 %

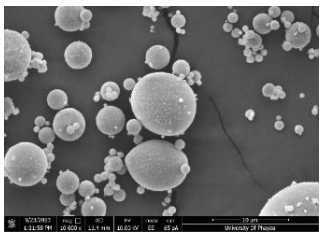
3.1.3 เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำจากโรงไฟฟ้า จังหวัดระยอง มีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 2.08 %

3.1.4 น้ำ Deionzed Water (DI)

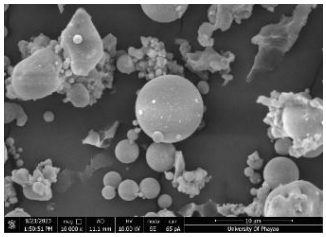
3.1.5 สารเคมีสำหรับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (ตารางที่ 3)



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 59.07 %



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงเถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 16.55%



รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงเถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าระยอง มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 2.08%

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (ลำปาง)	เถ้าถ่านหิน (ระยอง)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	23.72	37.93	72.89
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.10	18.06	19.74
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.61	15.92	3.15
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	59.07	16.55	2.08
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.98	-	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.33	1.78	0.81
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	5.42	8.94	-
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.24	0.38	1.11
โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3)	0.02	0.02	0.01
แมงกานีสไดออกไซด์(MnO_2)	0.05	0.14	0.04
คอปเปอร์ออกไซด์(CuO)	0.02	0.01	0.01
ซิงค์ออกไซด์(ZnO)	0.05	0.02	0.01
สตรอนเชียมออกไซด์(SrO)	0.06	0.14	0.09
เซอร์คอนเนียมไดออกไซด์(ZrO_2)	0.02	0.03	0.06
อิตเทอร์เบียมออกไซด์(Yb_2O_3)	0.33	-	0.01
นิกเกิล (NiO)	-	0.01	-
อาร์เซนิกไตรออกไซด์(As_2O_5)	-	0.04	-
รูบิเดียม (Rb_2O)	-	0.03	-
การสูญเสียจากการไหม้ (LOI)	0.44	0.14	0.39

ตารางที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้

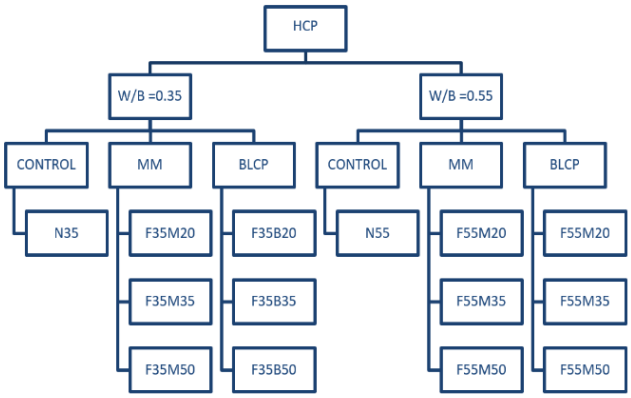
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (ลำปาง)	เถ้าถ่านหิน (ระยอง)
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	2.49	2.16
เปอร์เซ็นต์ค้างบนตะแกรง #325	-	30.08	26.86

ตารางที่ 3 สารเคมีสำหรับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ20±1°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	สารเคมี
11	สารลิเทียมคลอไรด์ (Lithium chloride)
23	สารโพแทสเซียม อะซิเตท (Potassium acetate)
40	สารโซเดียมไอโอไดด์ (Sodium Iodide)
55	สารแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซาไฮเดรต (Magnesium nitrate hexahydrate)
79	สารแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride)
95	สารโพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate)

3.2 ขั้นตอนการตากแห้ง

ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 14 ส่วนผสมดังรูปที่ 4 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.55 ทำการแทนที่เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ที่ 0, 20, 35, 50 เมื่อครบเวลาบ่ม 365 วัน ทำการตัดชิ้นตัวอย่างขนาด 13x30x300 มิลลิเมตร เป็น 3 ท่อน ความยาวท่อนละ 100 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องตัดแบบวิธีตัดเปียก ทำการตากแห้งซีเมนต์เพสต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11, 23, 40, 55, 79, 95 โดยใช้สารเคมีตามตารางที่ 3 โดยตากแห้งที่อุณหภูมิ 20 ± 1 ℃ ผสมน้ำกับสารเคมีในถาดเพื่อให้ได้สารละลายเกลืออิ่มตัวยิ่งยวด นำตะแกรงวางจากนั้นนำตัวอย่างมาวางไปด้านบนแล้วนำไปใส่ภาชนะปิดผนึกโดยหนึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะมีตัวอย่างละ 10 ชิ้น ก่อนจะเริ่มการตากแห้งจะทำการวัดความยาวและวัดน้ำหนักเริ่มต้นโดยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.1 mgเริ่มต้น โดยทำการวัดความยาวแท่งตัวอย่างอ้างอิง (Invar) จากนั้นทำการวัดความยาวชิ้นตัวอย่าง แล้วนำไปตากแห้งโดยจะตากแห้งที่อายุ 7, 14, 28, 56, 90, 180 และ210 วัน ในระยะเวลานี้การหดตัวของตัวอย่างจะเริ่มคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



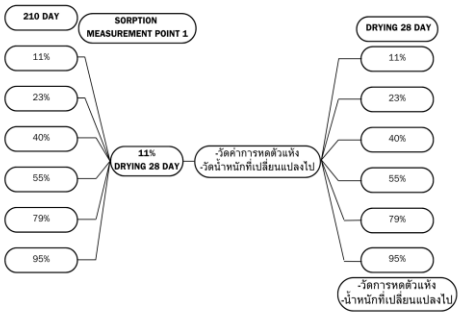
รูปที่ 4 แผนผังส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

$$Dry\ Shrinkage = \frac{L_{dry} - L_0}{L_0} \quad (1)$$

โดย L_0 คือ ความยาวก่อนการตากแห้ง
L_{dry} คือ ความยาวหลังการตากแห้ง

$$Mass\ reduction = \frac{M_{dry} - M_0}{M_0} \quad (2)$$

โดย M_0 คือ น้ำหนักก่อนการตากแห้ง
M_{dry} คือ น้ำหนักหลังการตากแห้ง



รูปที่ 5 แผนผังวิธีการทำการหัวตัวแบบคืนกลับได้และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้
และการทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน

3.3 การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน (Sorption measurement)

เมื่อทำการวัดค่าการหดตัวแห้งและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการตากแห้งครบ 210 วัน จะนำตัวอย่างไปทำการทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน (Water vapor sorption and Nitrogen sorption) จำนวน 1 จุด จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการทดสอบการหัวตัวแบบคืนกลับได้ และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้ (Shrinkage Isotherm) โดยการนำตัวอย่างทุกความชื้นมาไว้ที่ความชื้น 11% ตากแห้งเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบเวลาที่กล่าวมาแล้ว ทำการวัดค่าการหดตัวแห้งและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำตัวอย่างกลับไปไว้ที่ความชื้นเดิมแล้วตากแห้งต่อเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบเวลาที่กล่าวมาทำการวัดค่าการหดตัวแห้งและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

3.4 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ (Water content measurement)

ในการทดสอบนี้ ตัดตัวอย่างให้เป็นบล็อกขนาดประมาณ 3×3×3 มิลลิเมตร โดยมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.20 ± 0.02 กรัม จากนั้นทำการเขียนรหัสกำกับลงบนตัวอย่าง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักเบื้องต้น (Mini) เพื่อทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว ตัวอย่างถูกแช่ในน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศ 0.1 hPa เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างขณะอยู่ในน้ำ (MWater) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างในอากาศภายใต้สภาวะ SSD (Mair) จากนั้น ตัวอย่างถูกนำเข้าเครื่องดูดอากาศ (Vacuum samples) เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างบรรจุลงในขวดชมพู่ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตัวอย่างถูกนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ภายใต้สภาวะที่ไม่มี CO_2 หลังการอบแห้ง ตัวอย่างถูกพักไว้บนซิลิกาเจลภายในภาชนะปิดสนิทเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่แห้งสมบูรณ์ ($M_{dry,105}$) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 การหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์เทียบกับเวลา

จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 6a และ 6b พบว่าในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (11% RH) วัสดุเกิดการหดตัวแบบแห้งมาก เนื่องจากการสูญเสียน้ำในปริมาณสูง ขณะที่ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (95% RH) การหดตัวมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากความชื้นที่สูงช่วยรักษาสภาพโครงสร้างของวัสดุได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ

นอกจากนี้ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินระยองและเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ระดับ 0%, 20%, 35% และ 50% โดยมวล พบว่า การแทนที่ในอัตรา 50% โดยมวล ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการแทนที่ในอัตรา 20% โดยมวล ทั้งนี้ เนื่องจากเถ้าถ่านหินระยองและเถ้าถ่านหินแม่เมาะเมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถแทรกตัวเข้าไปอุดช่องว่างภายในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้ ส่งผลให้การหดตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่

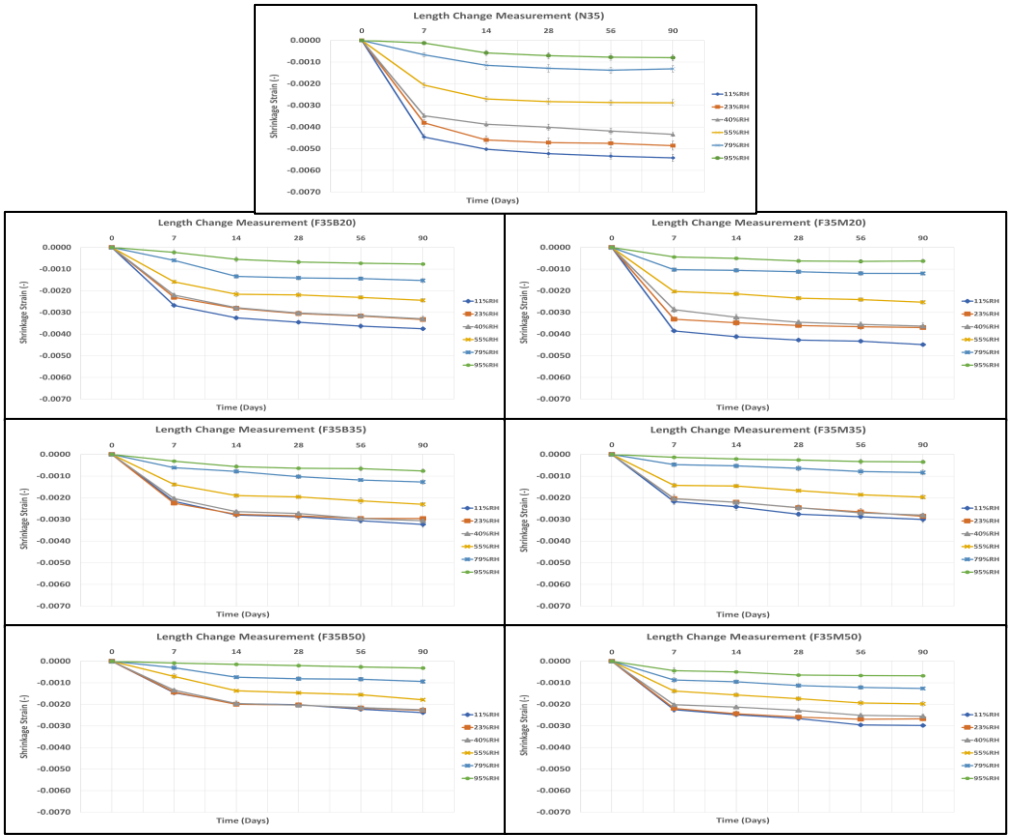
นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่สูงขึ้นทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น โดยพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำที่สูงทำให้เกิดโพรงในเนื้อวัสดุมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำช่วยให้ซีเมนต์มีเนื้อแน่นขึ้น ลดปริมาณโพรง และส่งผลให้การหดตัวลดลง

การหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์มีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ (RH) โดยที่ RH ต่ำ (11%) ทำให้การหดตัวแห้งสูง เนื่องจากสูญเสียน้ำมาก ส่วน RH สูง (95%) ทำให้การหดตัวแห้งต่ำเนื่องจากความชื้นช่วยรักษาโครงสร้างซีเมนต์ได้ดีขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินระยองและเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วน 50% โดยมวลช่วยลดการหดตัวแห้ง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคสร้าง C-S-H ที่เติมเต็มช่องว่างในโครงสร้าง ทำให้รูพรุนลดลง การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง 0.55 ทำให้การหดตัวแห้งสูงขึ้นเพราะมีรูพรุนมาก ขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ 0.35 ทำให้การหดตัวแห้งลดลงเพราะโครงสร้างมีเนื้อแน่นกว่า เถ้าถ่านหินระยองมีการหดตัวแห้งน้อยกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ เพราะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและ C-S-H แน่นกว่า การเปรียบเทียบเถ้าถ่านหินลำปางกับเถ้าถ่านหินระยองพบว่าเถ้าถ่านหินลำปางหดตัวแห้งมากกว่า เนื่องจากมีแคลเซียม (CaO)ออกไซด์สูงและความละเอียดมาก ทำให้ดูดซับน้ำได้มากขึ้น

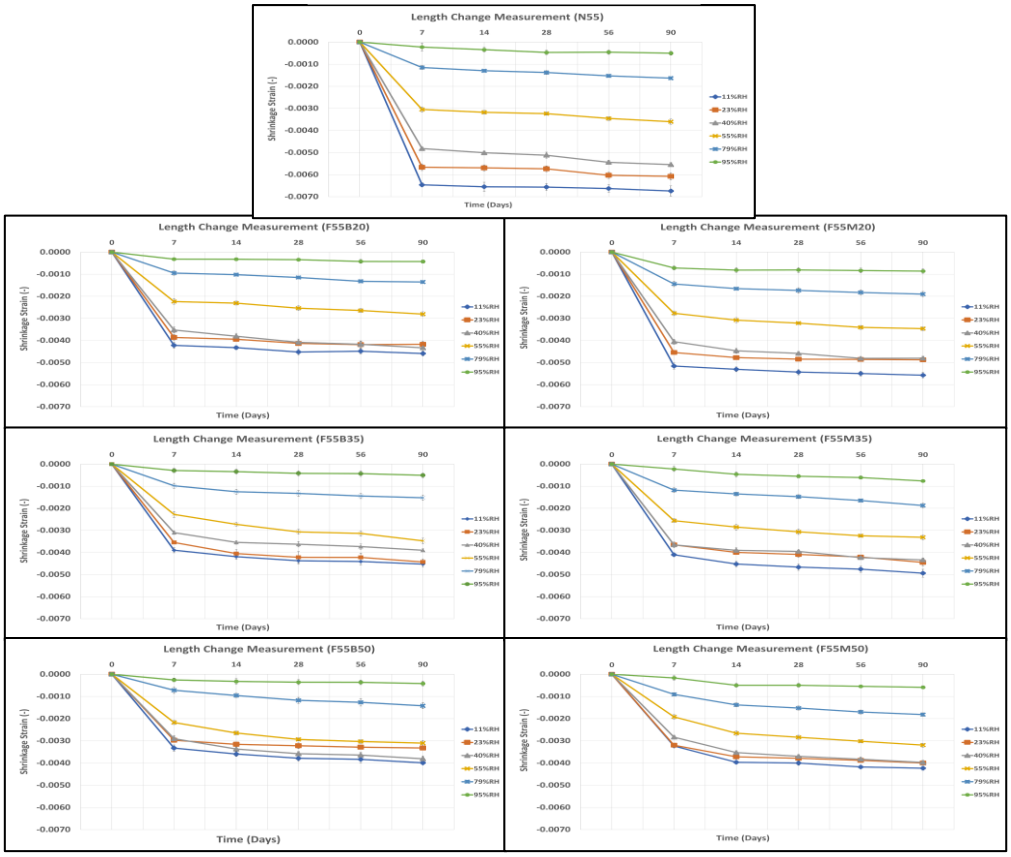
4.2 การวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการตากแห้ง

จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 7a และ 7b พบว่าในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (11% RH) มีการสูญเสียน้ำหนักสูง เนื่องจากการระเหยของน้ำในตัวอย่างที่มากกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูง (95% RH) ในสภาวะความชื้นที่ต่ำจะควบคุมการระเหยของน้ำได้ดีกว่าทำให้สูญเสียน้ำหนักในตัวอย่างน้อย นอกจากนี้ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินระยองและเถ้าถ่านหินลำปาง ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 , 35 และ 50 โดยมวล พบว่าการแทนที่ร้อยละ 50 โดยมวล เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 โดยมวล เนื่องจากการแทนที่ของเถ้าถ่านหินทั้งสองแหล่งจะทำให้ตัวอย่างกักเก็บน้ำได้มากขึ้น จึงเกิดการสูญเสียน้ำหนักที่มาก และเมื่อแทนที่มากขึ้นการสูญเสียน้ำจะมากขึ้น

นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำที่น้อยทำให้เนื้อของตัวอย่างแน่นมากขึ้น รูพรุนที่น้อย ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูงกว่า และนอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินระยองและเถ้าถ่านหินลำปาง เมื่อแทนที่มากขึ้นการสูญเสียน้ำหนักจะเพิ่มมากขึ้นตาม เถ้าถ่านหินลำปางเกิดการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าเถ้าถ่านหินระยอง

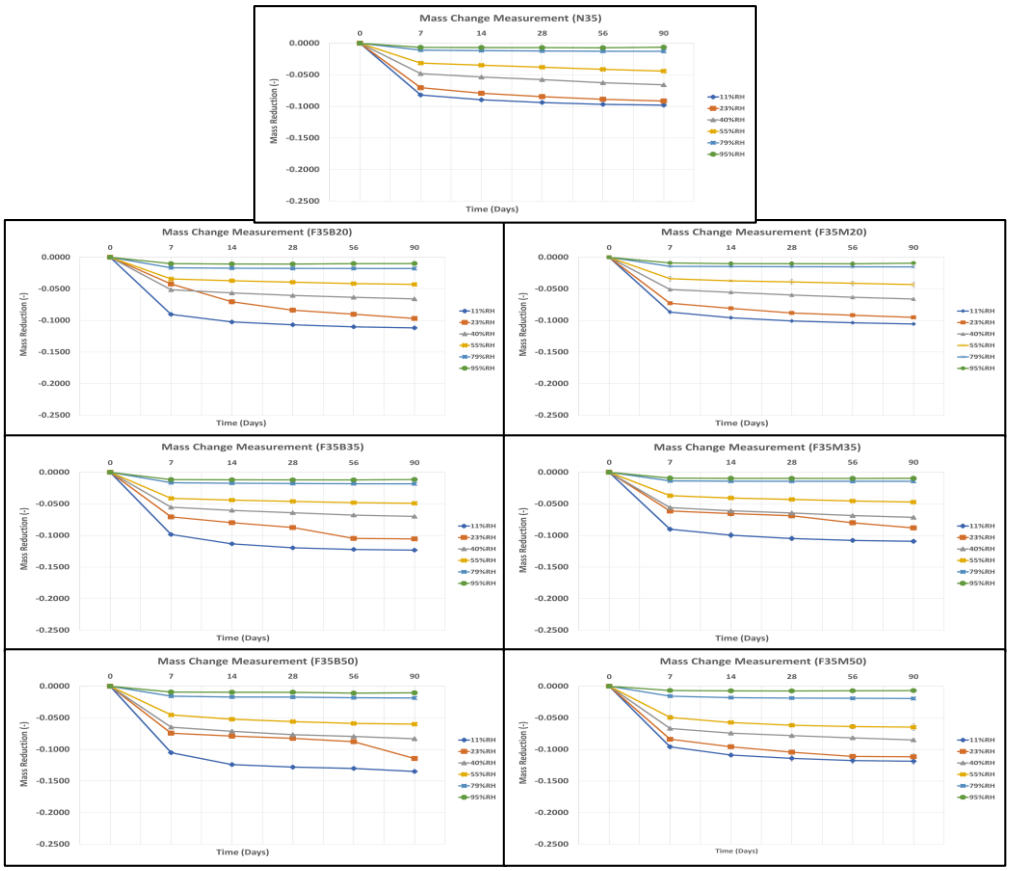


(a) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เท่ากับ 0.35

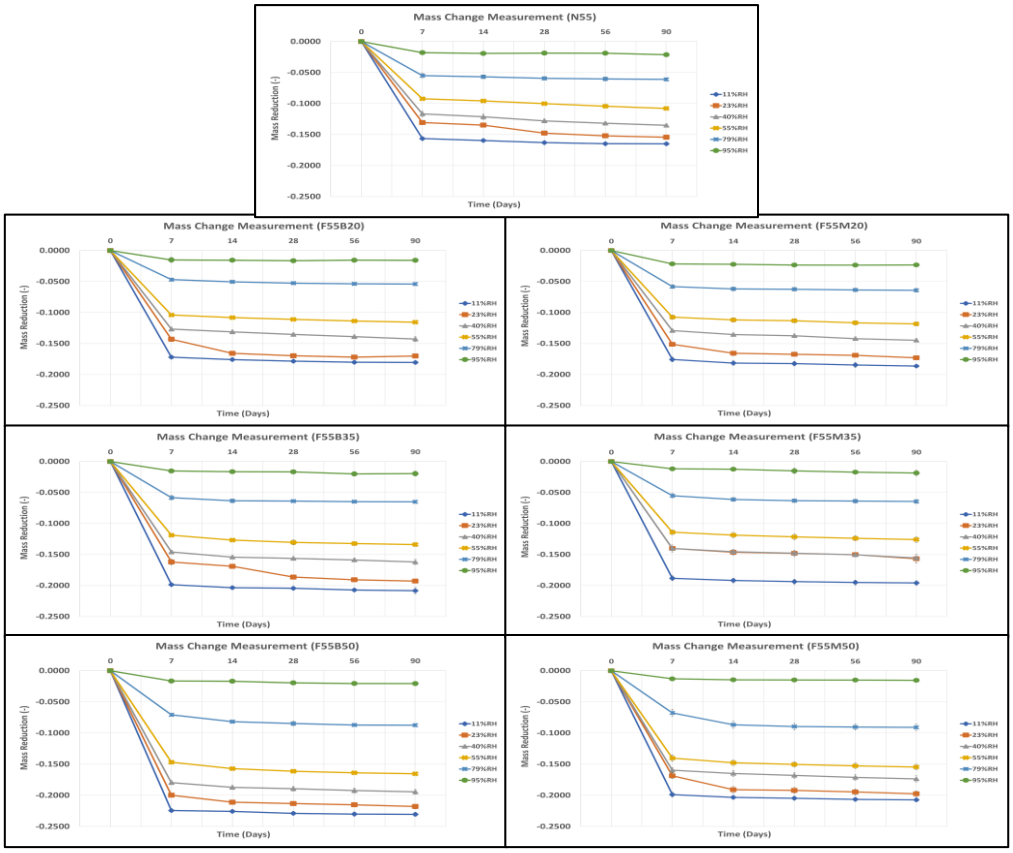


(b) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เท่ากับ 0.55

รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความยาวของซีเมนต์เพสต์ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

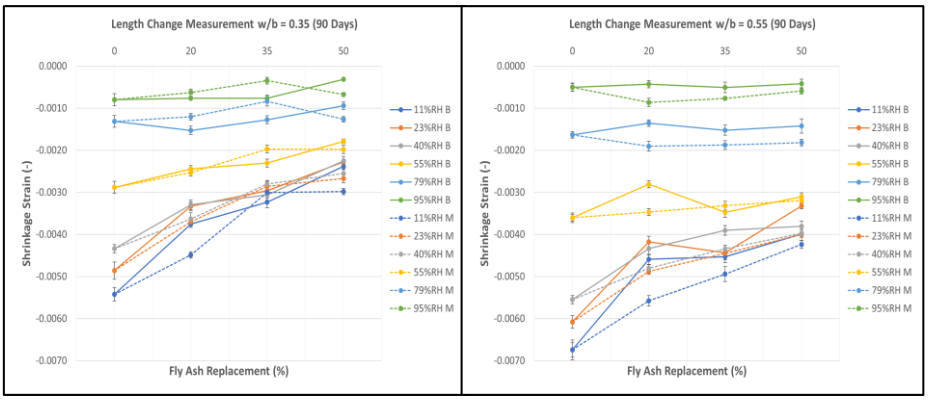


(a) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เท่ากับ 0.35

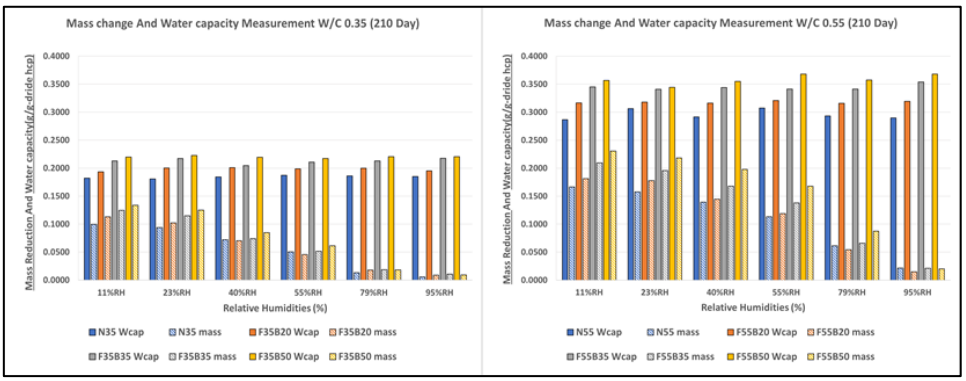


(a) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เท่ากับ 0.55

รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์
ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความยาวของซีเมนต์เพสต์ภายใต้อัตราส่วนการแทนที่และความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 การแทนที่และเถ้าถ่านหินส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำและการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์

4.3 การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน (Sorption measurement)

การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจนใช้ในการวิเคราะห์โพรงขนาดเล็ก เช่น พื้นที่ระหว่างชั้น (Interlayer Space) หรือ โพรงเจล (Gel Pores) โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลง อนุภาคของ C-S-H จะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่เรียกว่าความหนาแน่น (Densification)

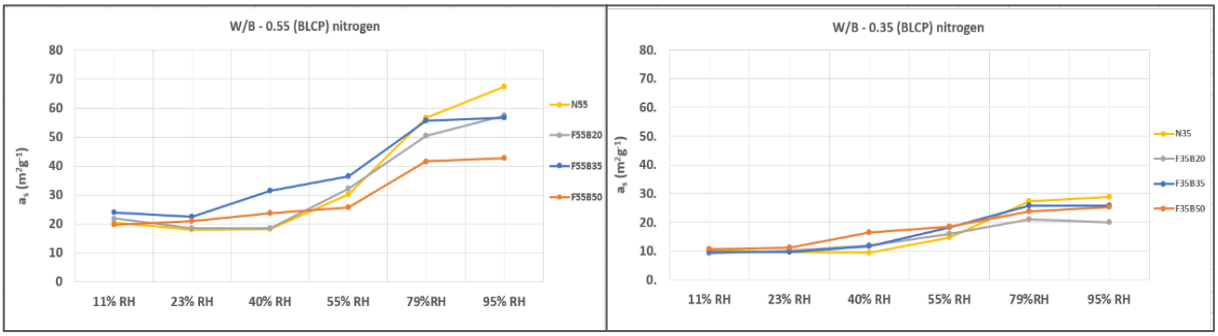
ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 พบว่า N55 มีค่าการดูดซับสูงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง เนื่องจากไม่มีการผสมเถ้าถ่านหิน ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิด C-S-H เกิดขึ้นในปริมาณมากทำให้มีโพรงขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลง อนุภาคขนาดเล็กก็จะหดตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นมากขึ้น

ในวัสดุ F55B20 ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะมีพื้นที่ผิวต่ำกว่า N55 เนื่องจากมีโพรงขนาดเล็กภายในน้อยกว่า เมื่อผ่านกระบวนการตากแห้งจึงเกิดความหนาแน่น ในลักษณะเดียวกัน

วัสดุ F55B35 มีพฤติกรรมการเกิดความหนาแน่นของ C-S-H คล้ายกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีการแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 35% เถ้าถ่านหินไม่ได้ทำปฏิกิริยาทั้งหมด ส่วนที่เหลือจึงไม่ถูกแปรสภาพเป็น C-S-H ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

สำหรับวัสดุ F55B50 ซึ่งมีปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินสูงขึ้น พบว่ามีปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นเพียงบางส่วน ทำให้การก่อตัวของ C-S-H มีปริมาณน้อย และจำนวนโพรงขนาดเล็กภายใน C-S-H ลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านกระบวนการตากแห้ง จึงทำให้เกิดความหนาแน่น ในลักษณะเดียวกัน

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเท่ากับ 0.35 มีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมในทิศทางเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเท่ากับ 0.55 อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้มีแนวโน้มต่ำกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้น้อยกว่า ส่งผลให้โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นสูงขึ้น และการก่อตัวของ C-S-H เกิดขึ้นในปริมาณมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเท่ากับ 0.55



รูปที่ 10 การทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน
(Sorption measement)

4.4 การทดสอบการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบการหัวตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 11 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน N55 มีค่าการหดตัวที่คืนกลับได้สูงที่สุด แต่ก็มีค่าการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้สูงที่สุดเช่นกัน เมื่อแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ F55B20 F55B35 และ F55B50 พบว่าค่าการหดตัวที่คืนกลับได้ลดลงสาเหตุของปรากฏการณ์นี้เกิดจากซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินมีปริมาณ C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปริมาณสูง ส่งผลให้สามารถดูดซับและคายความชื้นได้มากกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่คืนกลับได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ค่าการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้ก็ตาม

4.5 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของการทดสอบการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของการหัวตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 12 โดยมีแนวโน้มที่น่าสนใจในระยะฟื้นฟูความชื้นที่ 95% สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน N55 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นของมวลเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเริ่มต้นของการตากแห้ง ในทางตรงกันข้าม ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ F55B20 F55B35 และ F55B50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95% ทั้งในระยะการตากแห้งและระยะฟื้นฟูความชื้นมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่คืนกลับไม่ได้มากกว่า N55

เนื่องจากเมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินปริมาณเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของมวลก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งบ่งชี้ว่าการแทนที่เถ้าถ่านหิน ไม่เพียงส่งผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ แต่ยังอาจมีบทบาทในการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านและพฤติกรรมการกักเก็บความชื้นของวัสดุอีกด้วย

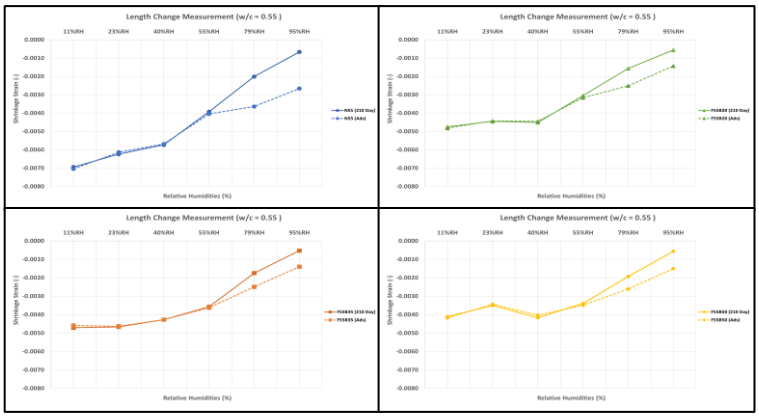
4.6 การทดสอบการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบแสดงให้เห็นดังรูปที่ 13 การหัวตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage) และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินมีค่าการหดตัวที่คืนกลับได้สูงที่สุด เมื่อแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวที่คืนกลับได้ลดลงสาเหตุของปรากฏการณ์นี้เกิดจากซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินมีปริมาณ C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปริมาณสูง ส่งผลให้สามารถดูดซับและคายความชื้นได้มากกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่คืนกลับได้มากขึ้น นอกจากนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินยังมีค่าการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการแทนที่ซีเมนต์เพสต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ค่าการหดตัวที่คืนกลับไม่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้ก็ตาม

4.7 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์

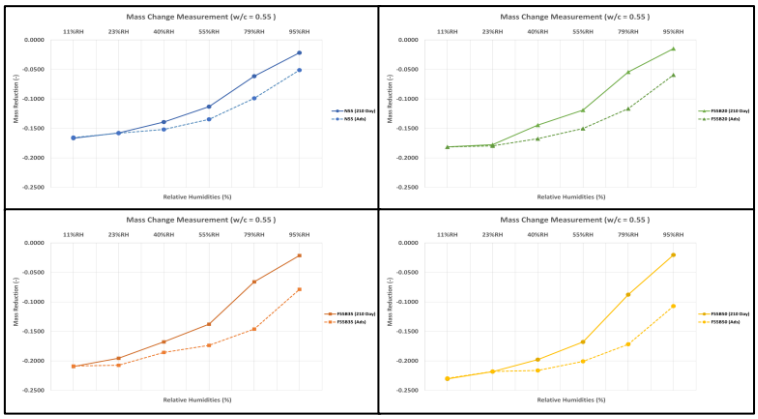
จากผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 14 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเริ่มต้นอยู่ในระดับต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ค่าปริมาณน้ำของตัวอย่างแต่ละชนิดมีความใกล้เคียงกันตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งบ่งชี้ว่าที่ค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำ วัสดุสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่ต่ำ

โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเริ่มต้นสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่วง 40%-55% ที่มีจุดสูงสุดของการดูดซับน้ำอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ความแตกต่างของปริมาณน้ำระหว่างตัวอย่างแต่ละชนิดเริ่มเห็นได้ชัดขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อค่าความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น วัสดุจะสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น และจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 วัสดุมีโพรงมากกว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 เนื่องจากสามารถกักเก็บน้ำได้มากขึ้นและตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ได้มากกว่า



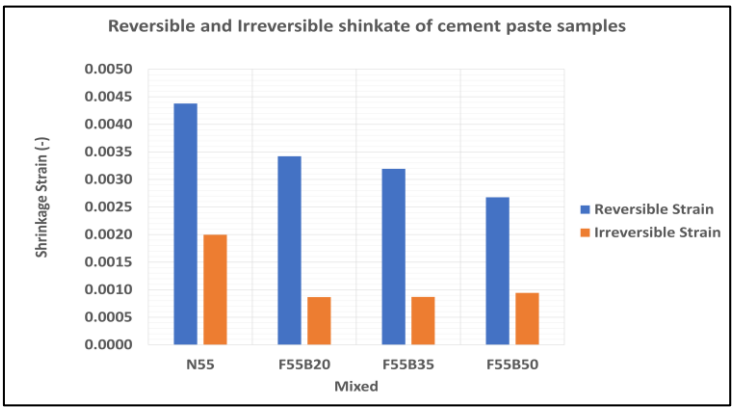
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

รูปที่ 11 Isotherms ของการเปลี่ยนแปลงความยาวของซีเมนต์เพสต์

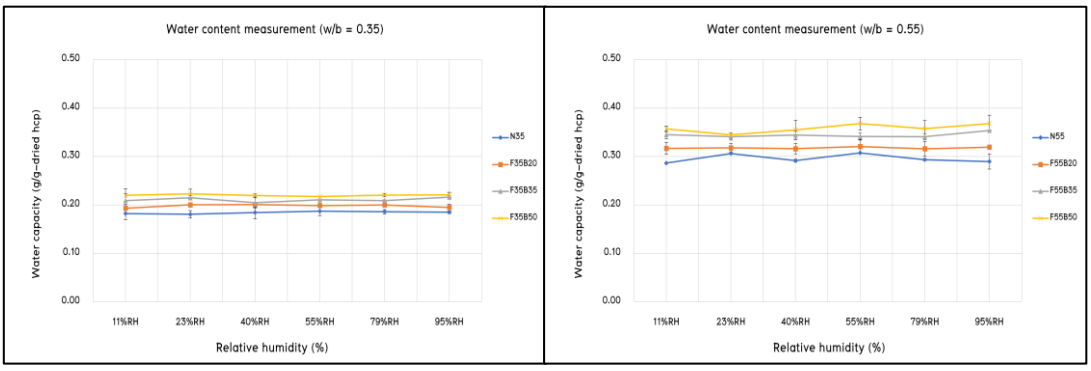


อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

รูปที่ 12 Isotherms การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 13 การหัวตัวแบบคืนกลับได้และการหดตัวแบบคืนกลับไม่ได้ของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 14 การทดสอบความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์

5.สรุปผลลการวิจัย

5.1 ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมมีอัตราการหดตัวสูงในช่วง 7 วันแรก โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 55% หลังจากนั้นอัตราการหดตัวจะลดลงเมื่อระยะเวลาการตากแห้งเพิ่มขึ้น
5.2 ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะมีการหดตัวสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งการสูญเสียน้ำของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัว
5.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีผลต่อการหดตัวแห้ง โดยพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัวมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำเริ่มต้นมาก ส่งผลให้เกิดโพรงและการสูญเสียน้ำที่มากขึ้นตามไปด้วย
5.4 การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นช่วยลดการหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ โดยเฉพาะภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ซึ่งเกิดจากการเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ทำให้วัสดุมีความหนาแน่นมากขึ้น
5.5 ผลการทดสอบการดูดซับไอน้ำและไนโตรเจน (Sorption - Measurement) แสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้า-ถ่านหินมีค่าการดูดซับไนโตรเจนสูงกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีโพรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงตึงผิวที่สูงขึ้นและทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น ในขณะที่วัสดุที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงจะมีค่าการดูดซับไนโตรเจนต่ำกว่า เนื่องจากโครงสร้างมีความหนาแน่นขึ้น ซึ่งช่วยลดจำนวนและขนาดของโพรงส่งผลให้การหดตัวลดลง
5.6 จากการเปรียบเทียบระหว่างเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่าน-หินแคลเซียมต่ำพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแคล-เซียมสูงมีค่าการหดตัวที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำเนื่องจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีโพรงสูงกว่าส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำและการหดตัวที่มากขึ้น
5.7 ผลการทดสอบ ความสามารถในการกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ยืนยันว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ทำให้วัสดุสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มาก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำสูงสุด
5.8 การใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการหดตัวแห้งได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการแทนที่เถ้าถ่านหิน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบคอนกรีตที่มีความทนทานมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย สำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับวัดการหดตัว ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการโยธา รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ ที่ได้ให้คำแนะนำจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Hiroki Sugimoto, Ryo Kurihara, Ippei Maruyama, 2018, Research on drying shrinkage and pore structure in7 cement paste, Material construction, Architectural Institute of Japan, pp 101-102.
[2] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ. อิทธิพลของส่วนผสมและสภาวะอุณหภูมิบ่มที่มีต่อกำลังลังรับแรงอัด และการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยอง Effect of Mix Proportion and Curing Temperature on Compressive Strength and Drying Shrinkage of Cement Paste Containing Rayong Fly Ash ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.กลองหลวง จังหวัดปทุมธานี
[3] พชร์พจี มากภิบาล และรักติพงษ์ สหมิตรมงคล.(2019) ผลกระทบของมวลรวมเบาสังเคราะห์ต่อการหดตัวของมอร์ตาร์ในช่วงอายุต้น (Effect of synthetic lightweight aggregate on early age shrinkage of mortar) Journal of Thailand Concrete Association (วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย)
[4] Ippei Maruyama. (2010) Maruyama JACT10 Origin of Drying Shrinkage of hardened Cement Paste: Hydration Pressure

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน

Study of microstructures and mechanical properties of cement paste containing ground coal bottom ash using adsorption and micro-indentation.

ณัฐธิดา วงค์คม[1] ศศิธร ศรีวิเศษ[1] อัษฎา แซ่มศิริ[1] และปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ[2]

[1] *นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*

[2] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*

**Corresponding author; E-mail address: 64101541@up.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ทำการหล่อในซีเมนต์เพสต์ขนาด 3x13x300 มิลลิเมตร บ่มตัวอย่างในสภาะปิดผนึก 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 20± 1 องศาเซลเซียสแล้วนำตัวอย่าไปบดละเอียดจนผ่านตะแกรง ขนาด 75 ไมครอน (เบอร์ 200) และค้างบนตะแกรงขนาด 25 ไมครอน (เบอร์ 500) เพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้เทคนิคการดูดซับ และตัดตัวอย่างให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบคุณสมบัติการยืดหยุ่นและการคืบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยการใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

คำสำคัญ:โครงสร้างจุลภาค,สมบัติเชิงกล,ซีเมนต์เพสต์,เถ้าก้นเตา, การคืบ,ไมโครอินเดนเทชัน

Abstract

This research is to study the microstructure and mechanical properties of cement paste mixed with finely ground bottom ash using adsorption and micro-indentation techniques by replacing Portland cement type 1 with finely ground bottom ash at the ratios of 0, 20, 35 and 50 percent by weight and controlling the water to binder ratio at 0.35 and 0.55. Casting in cement paste with the size of 3x13x100 mm., curing in sealed condition for 6 months at 20± 1 °C, then the sample was ground until it passed through a 75 micron sieve (No. 200) and held on a 25 micron sieve (No. 500) to study the microstructure using adsorption techniques and cutting the sample to a size of 5 mm. to test the elasticity and creep properties of cement paste mixed with finely ground bottom ash using the micro-indentation technique.

Keywords: microstructure, mechanical properties, cement paste, bottom ash, creep, micro-indentation

1.บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากสถานการณ์ภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) เป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากปัจจุบันโครงสร้างส่วนใหญ่นั้นจะนิยมใช้คอนกรีตเป็นปัจจัยหลักในงานก่อสร้างอาคาร จากปัญหาโลกร้อนในปัจจุบัน การที่จะเลือกใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมแบบเดิม เพื่อมาใช้แทนปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานล้วนจึงไม่นิยมอีกต่อไป ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามนำวัสดุทดแทน เพื่อมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงของการผลิตคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอาศัยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความทนทานให้กับคอนกรีต โดยยังคงความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตตามความต้องการอย่างปลอดภัย

โรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยเกิดเป็นเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ที่มีอนุภาคเล็กจะลอยขึ้นสู่ปล่องควัน ส่วนเถ้าที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และเป็นรูพรุนจะตกลงสู่ก้นเตาเรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ซึ่งเถ้าลอยส่วนใหญ่นั้นจะมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตนิยมใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากกว่าปูนซีเมนต์เมื่อผสมอยู่ในคอนกรีตเถ้าลอยนั้นสามารถอุดช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมและสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น จะต่างจากเถ้าก้นเตาที่ยังไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทำให้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมากจึงเกิดแนวคิดต่างๆที่จะมีการนำเอาเถ้าก้นเตามาใช้ประโยชน์ แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ จึงต้องนำเถ้าก้นเตาไปบดละเอียดแล้วทดสอบความละเอียดของเถ้าก้นเตาบดละเอียด

ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมต่อการดำเนินงาน และตรวจสอบความเสียหายของวัสดุที่พังทลายเพื่อให้เข้าใจสาเหตุของการแตกหักและนำไปสู่การออกแบบที่ปรับปรุงวัสดุให้มีความทนทานมากขึ้น อีกทั้งยังลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม และลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเป็นจำนวนมากในอัตราส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นองค์ความรู้สำหรับการใช้งานคอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมเพื่อใช้หาความแข็งของคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมกับเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาการคืบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นการนำเถ้าก้นเตามาบดให้มีความละเอียดค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 โดยจะใช้ร้อยละการแทนที่ในปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0,20,35 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 3x13x300 มิลลิเมตร พอครบเวลา 3 วัน จะทำการแกะออกจากแบบหล่อและบ่มในสภาพปิดผนึก(sealed condition) ซึ่งไม่มีการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างตัวอย่างและสิ่งแวดล้อม เป็นระยะเวลา 6 เดือน ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 ±1 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยให้คงระดับความชื้นในซีเมนต์เพสต์ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคการดูดซับและไมโครอินเดนเทชัน

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมกับเถ้าก้นเตาบดละเอียดโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

1.4.2 ทราบถึงการคืบของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

1.4.3 ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุบรรณ สนิทอินทร์และคณะ[1] ได้พัฒนาความสามารถในการรับกำลังและการต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตา(BA)เป็นวัสดุประสาน โดนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ในอัตราร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ผสม BA มีกำลังอัดคอนกรีตที่ 7 และ 28 วันสูงถึง 394 และ 496 กก/ซม^2 ตามลำดับโดยสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึง 135กก/ม^3 และความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตอยู่ในระดับที่มีความเป็นไปได้ร้อยละ 90ที่จะไม่เกิดสนิมดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีศักยภาพสูงที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์และคณะ[2] ได้ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสรรถนะสูงโดยนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0,20,40 และ60 โดยน้ำหนัก พบว่าความสามารถในการทำงานได้และกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลงเล็กน้อย และการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักสามารถพัฒนากำลังอัดสูงสุดกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ดังนั้น เถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้ในคอนกรีตสรรถนะสูงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชาและคณะ[3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าก้นเตาปริมาณสูงในคอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุปอสโซลานต่อกำลังอัดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต เมื่อนำมาแทนที่ 10, 20, 30, 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำหนักตาอวัสดุประสานเท่ากับ 0.45ที่อายุทดสอบ 7,14, 28, 56 และ90 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้

ปริมาณเถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ ในส่วนผสมอื่นทุกอายุการทดสอบ ดังนั้นการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงในส่วยผสมคอนกรีตส่งผลให้มีค่ากำลังต่ำลง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงศักยภาพของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่จะสามารถนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและผลกระทบของโครงสร้างโพรงที่เกิดจากการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียด ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต เพื่อที่จะช่วยให้เข้าใจกลไกการทำงานของเถ้าก้นเตาในระดับจุลภาค และนำไปสู่การพัฒนาสูตรผสมคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 แบบหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาด 3x13x300 มิลลิเมตร จำนวน 10 ช่อง

3.1.2 โต๊ะสั่นคอนกรีต

3.1.3 พลาสติกปิดหน้าซีเมนต์

3.1.4 เทปกระดาษ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.2.2 เถ้าก้นเตาบดละเอียด (BO)

3.2.3 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	sieve #325
OPC	3.12	-
BO	2.91	ร้อยละ 6

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ก่อนเริ่มการทดลอง วัสดุทุกชนิดถูกนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพให้มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน จากนั้นจึงนำวัสดุมาชั่งตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ และผสมในหม้อผสมมอร์ตาร์โดยทำการผสมที่ความเร็วต่ำ 140 ± 5 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที ตามด้วยการคนด้วยมือเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้นจึงเพิ่มความเร็วในการผสมเป็น 285 ± 10 รอบต่อนาที อีก 3 นาที หลังจากนั้นนำส่วนผสมเทใส่ภาชนะสแตนเลส และคนด้วยมือเป็นระยะทุก ๆ 30 นาที จนกว่าจะไม่มีการเยิ้มน้ำ (Bleeding)

ส่วนผสมที่ได้จะถูกนำไปหล่อในแบบหล่อขนาด 13 x 3 x 300 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น โดยแบบหล่อจะถูกห่อหุ้มด้วยฟิล์มโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride) 3 ชั้น แล้วหุ้มผ้าชุบน้ำบิดหมาดจากนั้นห่อด้วยฟิล์มโพลีไวนิลคลอไรด์อีก 3 ชั้น เพื่อควบคุมอัตราการสูญเสียน้ำ และเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นจึงแกะแบบหล่อออกและเก็บตัวอย่างในสภาพปิดผนึก ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิเดิมเป็นระยะเวลา 6 เดือน ก่อนนำไปทำการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 2 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์

ชื่อส่วนผสม	ส่วนซีเมนต์เพสต์(กก./ลบ.ม.)			
	ปูนซีเมนต์	น้ำ	วัสดุประสาน (เถ้าก้นเตาบดละเอียด)	น้ำต่อวัสดุประสาน
NN35	1790	626	0	0.35
B35O20	1303	570	326	0.35
B35O35	1054	567	567	0.35
B35O50	806	564	806	0.35
NN55	1264	695	0	0.55
B55O20	1006	691	251	0.55
B55O35	814	689	438	0.55
B55O50	624	686	624	0.55

3.4 การทดสอบ

3.4.1 วิธีการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการดูดซับ

การวัดไอโซเทอมของการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 โดยใช้เครื่อง Belsorp Max X ดังรูปที่1 เพื่อประเมินโครงสร้างโพรงขนาดกลางและเล็ก ตัวอย่างจะถูกนำไปบดละเอียดจนผ่านตะแกรง ขนาด 75 ไมครอน (เบอร์ 200) และค้างบนตะแกรง ขนาด 25 ไมครอน (เบอร์500)

การทดสอบโดยใช้ไนโตรเจน นำตัวอย่างที่ผ่านการบดอย่างละเอียดที่ค้างบนตะแกรงขนาด 25 ไมครอน (เบอร์ 500) มาชั่งให้ได้น้ำหนัก 100-110 มิลลิกรัม แล้วนำตัวอย่างที่บรรจุในเซลล์ไปต่อกับเครื่อง Belprep-vac3 ดังรูปที่2 เพื่อทำให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสในการวัดแต่ละครั้งจะเริ่มจากสภาวะ

สุญญากาศ เพื่อควบคุมความดันสัมพัทธ์และภายในเซลล์จะต้องไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น จากนั้นนำเซลล์ไปติดตั้งกับเครื่อง Belsorp Max X และภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเครื่องจะทำการยกขึ้นเพื่อนำแก๊สไนโตรเจนเหลวผ่านเข้ามาในเซลล์ที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ จะเกิดการดูดซับแบบ Adsorption เพื่อให้ไนโตรเจนไปเกาะบนพื้นผิววัสดุ และในเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างวัสดุจนความดันในเซลล์จะเกิดการอิ่มตัว(P/P0=1) จากนั้นเครื่องจะทำการ Desorption จะได้ค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ดูดซับได้ โดยเครื่องใช้ทฤษฎี Brunauer-Emmett-Teller (BET) คำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุในความดันสัมพัทธ์

การทดสอบโดยใช้ไอน้ำ นำตัวอย่างที่ผ่านการบดอย่างละเอียดที่ค้างบนตะแกรงขนาด 25 ไมครอน (เบอร์ 500) มาชั่งให้ได้น้ำหนัก 25-26 มิลลิกรัม จะทำการทดสอบคล้ายกับวิธีการเดียวกับทดสอบโดยใช้ไนโตรเจน โดยที่เปลี่ยนจากการใช้ไนโตรเจนเป็นการใช้ไอน้ำในการทดสอบ



รูปที่ 1 Belsorp Max X



รูปที่ 2 Belprep-vac3

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

การทดสอบโดยใช้เทคนิคไมโครอินเดนเทชัน เป็นการทดสอบคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่น และการคืบ โดยหล่อตัวอย่างใส่ไว้ในอีพ็อกซีเรซิน จากนั้นใช้เครื่องตัด Isomet 1000 ดังแสดงในรูปที่ 3 เป็นชิ้นให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร เก็บไว้ในกล่องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นสัมพัทธ์เทียบเคียงสภาวะปิดผนึก

การทดสอบไมโครอินเดนเทชัน โดยใช้เครื่อง Shimadzu Autograph AGS-X ดังแสดงรูปที่ 4 โดยให้แรงสูงสุดที่ 20 นิวตัน ใช้หัวกดแบบ Berkovich โดยจะให้แรงกดที่ 1.33 นิวตันต่อวินาที โดยประมาณ 15 วินาที เมื่อแรงกดถึง 20 นิวตันจะให้กดคงที่เป็นเวลา 300 วินาที แล้วทำการถอนแรงกดออกเป็นเวลา 15 วินาที ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 5 พร้อมบันทึกการยุบตัวของซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบเลเซอร์ ระหว่างการทดสอบ ตัวอย่างจะถูกทดสอบในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส การทดสอบทำในตำแหน่งห่างกันเท่ากัน 1.5 มม. และทำการทดสอบไม่น้อยกว่า 20 ตำแหน่งต่อตัวอย่าง โดยจะสามารถคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้สามารถคำนวณได้จากสูตร $M = \frac{S\sqrt{\Pi}}{2\beta\sqrt{A_C}} = \frac{S}{2\beta a_c}$

โดยให้ $\beta = 1.034$ เป็นค่าคงที่

และสามารถคำนวณค่า $A_C = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2\theta$

โดยให้ $h_c = h_{max} - \varepsilon\frac{P_{max}}{S}$

และ $\theta = 65.03°$ เป็นค่าคงที่

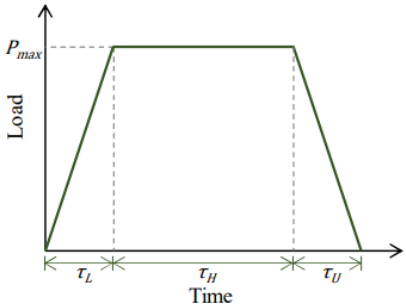
และสามารถคำนวณค่า $a_c = \frac{\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi}}$ จากสูตรสามารถดูระยะการเกิดความยืดหยุ่นจากรูปที่ 11 และคำนวณค่าความแข็งของวัสดุได้จากสูตร $H = \frac{P_{max}}{A_c}$ สามารถคำนวณ Creep Coefficient ได้จากสูตร $C = \frac{h_{max} - h_{ini}}{h_{ini}}$



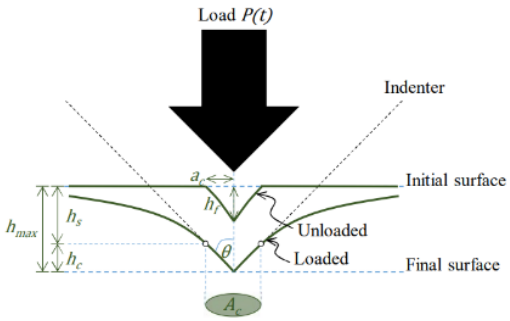
รูปที่ 3 เครื่องตัด Isomet 1000



รูปที่ 4 เครื่อง Shimadzu Autograph AGS-X



รูปที่ 5 Load history

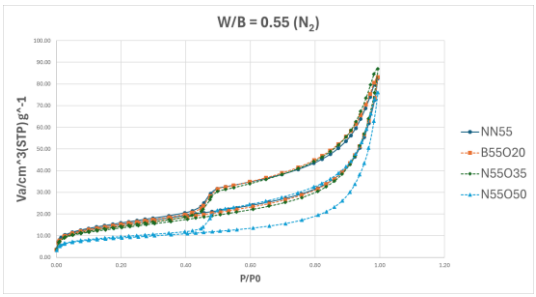


รูปที่ 6 ทฤษฎีการจำลองรอยกด

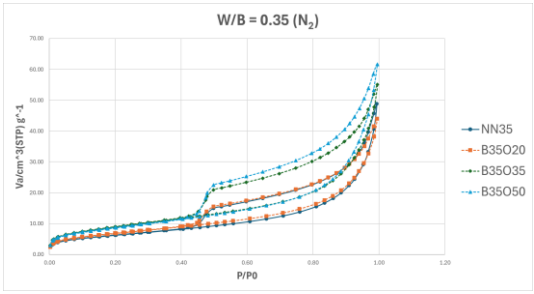
4.ผลการทดสอบ

4.1 ผลการการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการดูดซับ

จากการทดสอบการดูดซับด้วยไนโตรเจน เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากการใช้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0,20,35 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.35 จากรูปที่ 6 (a) เป็นการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 35 มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดอยู่ที่ 86.99 STP/g และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยสุดอยู่ที่ 76.09 STP/g และจากรูปที่ 6 (b) การใส่อัตราส่วนวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสุดอยู่ที่ 61.57 STP/g และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20 ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุดอยู่ที่ 44.00 STP/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 จะได้ค่าการดูดซับไนโตรเจนน้อยกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความหนาแน่นมากกว่าและมีรูพรุนต่ำ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงกว่า



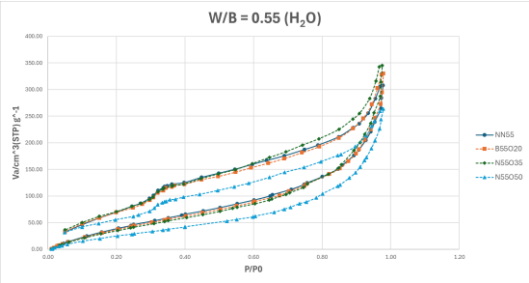
(a)



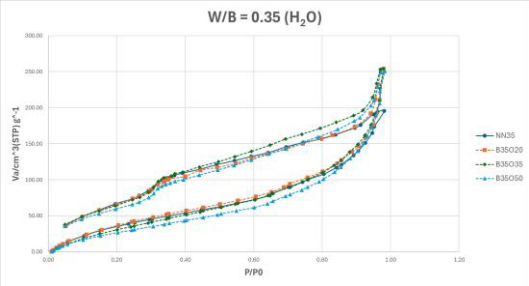
(b)

รูปที่ 7 N2 Sorption Isotherm

จากการทดสอบการดูดซับด้วยไอน้ำ โดยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 0,20,35 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.35 จากรูปที่ 7 (c) เป็นการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 35 มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดอยู่ที่ 344.93 STP/g และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยสุดอยู่ที่ 263.42 STP/g และจากรูปที่ 7 (d) การใส่อัตราส่วนวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 35 มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสุดอยู่ที่ 254.46 STP/g และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุดอยู่ที่ 195.64 STP/g จะเห็นได้ว่าจากการทดสอบการดูดซับด้วยไอน้ำ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 จะได้ค่าการดูดซับไอน้ำน้อยกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความหนาแน่นสูง ดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้มีความทนทานสูงกว่า



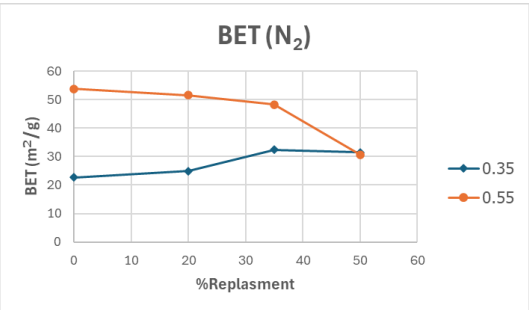
(c)



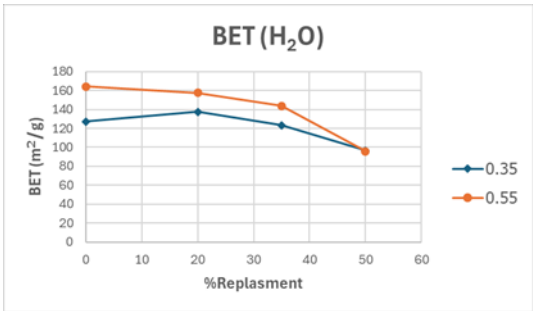
(d)

รูปที่ 8 H_2O Sorption Isotherm

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคจากเครื่อง Belsorp Max X จะได้ค่า BET ที่คำนวนพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ จากรูปที่ 8 (e) จะเห็นได้ว่าเมื่อทดสอบการดูดซับด้วยไนโตรเจนแล้วใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลง กล่าวคือโพรงจะลดลง และเมื่อใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พื้นที่ผิวจำเพาะก็จะมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ต้องเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม และจากรูปที่ 9 (f) จากการทดสอบการดูดซับด้วยไอน้ำจะเห็นได้ว่า เมื่อใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.35 จะทำมีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง โพลงจะลดลง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใส่เถ้าก้นเตาบดละเอียด จะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเสื่อมสภาพสูงขึ้น



(e)



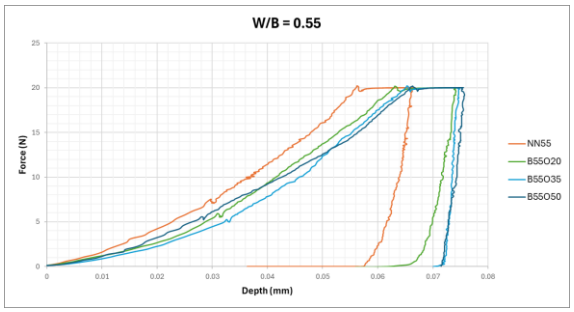
(f)

รูปที่ 9 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

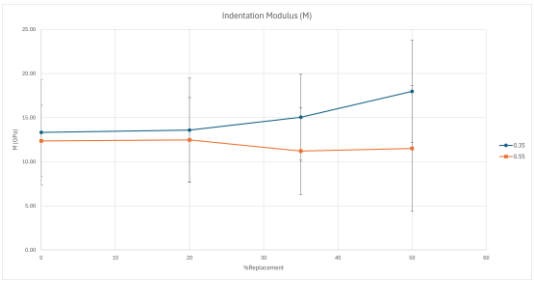
4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตา โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.35 อายุของตัวอย่างที่ 6 เดือน เพื่อทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าความแข็งของวัสดุ และการคืบ

การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่ายิ่งใส่วัสดุประสานเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม แสดงดังรูปที่ 9 จากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ที่ 12.47 GPa และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 35 ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุดอยู่ที่ 11.22 GPa ส่วนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 การใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ที่ 17.99 GPa และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 13.33 GPa แสดงดังรูปที่ 10

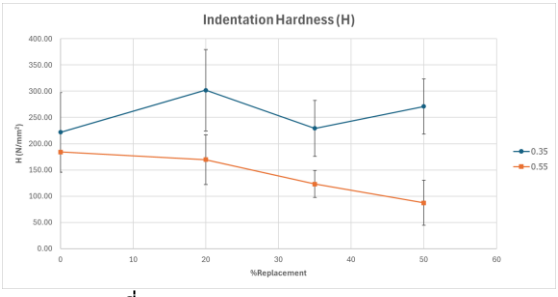


รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงและความลึกของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55



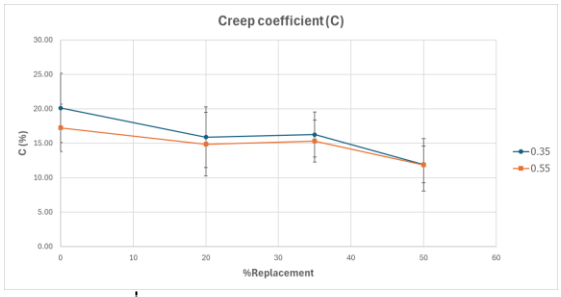
รูปที่ 11 Indentation Modulus

การทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าการใส่วัสดุประสานมีแนวโน้มลดลง การใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าความแข็งของวัสดุมากที่สุดอยู่ที่ 184.32 N/mm^2 และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าความแข็งของวัสดุน้อยที่สุดอยู่ที่ 87.15 N/mm^2 ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20 ได้ค่าความแข็งของวัสดุมากที่สุดอยู่ที่ 301.85 N/mm^2 และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าความแข็งของวัสดุน้อยที่สุดอยู่ที่ 221.66 N/mm^2 ดังรูปที่ 12



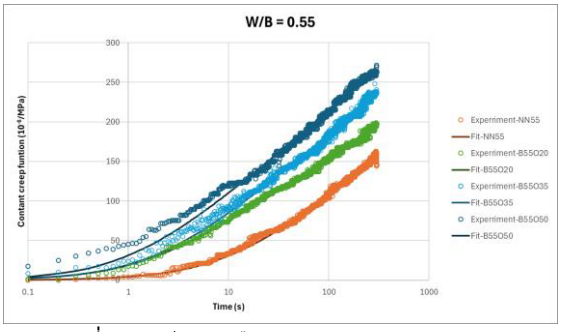
รูปที่ 12 Indentation Hardness

การทดสอบการคืบ พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การคืบ โมดูลัสการคืบ และค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว จากรูปที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การคืบการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าจากใส่วัสดุประสานมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใส่วัสดุประสาน จากการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบน้อยสุดอยู่ที่ร้อยละ 11.86 และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าสัมประสิทธิ์มากสุดอยู่ที่ร้อยละ 17.23 ส่วนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบน้อยที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 11.92 และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบมากสุดอยู่ที่ร้อยละ 20.11 แสดงให้เห็นว่าทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55 การใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้านทานต่อการคืบดีกว่าการไม่ใส่วัสดุประสาน

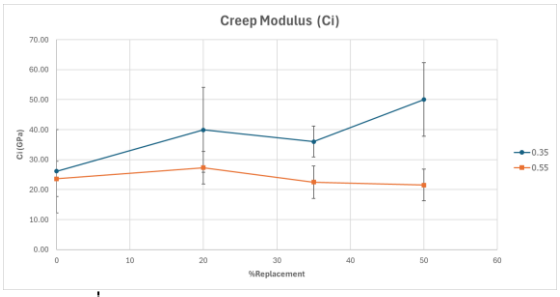


รูปที่ 13 Creep Coefficient

จากรูปที่ 14 ค่าฟังก์ชันการคืบจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่วัสดุประสาน จากรูปที่ 15 ค่าโมดูลัสการคืบ จากการใช่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20 ได้ค่าโมดูลัสการคืบสูงสุดอยู่ที่ 27.29 GPa และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าโมดูลัสการคืบน้อยสุดอยู่ที่ 21.53 GPa ส่วนการใช่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าโมดูลัสการคืบสูงสุดอยู่ที่ 50.06 GPa และการใส่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าโมดูลัสการคืบน้อยสุดอยู่ที่ 26.14 GPa ทำให้ทราบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 สามารถทนทานต่อการคืบได้ดีที่สุด



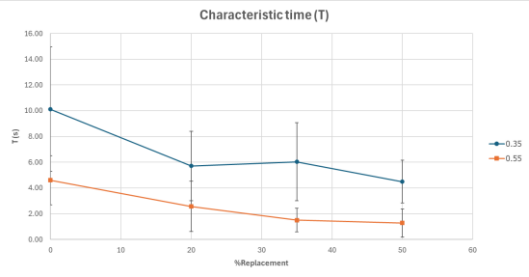
รูปที่ 14 ฟังก์ชันการคืบ



รูปที่ 15 Creep Modulus

จากรูปที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว มีแนวโน้มลงลงเมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานเพิ่มขึ้น จากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานที่ 0.55 พบว่าการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัวสูงสุดอยู่ที่ 4.60 วินาที และการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัวน้อยสุดอยู่ที่ 1.28 วินาที ส่วนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 0 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัวสูงสุดอยู่ที่ 10.11 วินาที และการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัวน้อยสุดอยู่ที่ 4.49 วินาที



รูปที่ 16 Characteristic Time

5.สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดสอบโครงสร้างด้วยเนคนิคการดูดซับ

จากการทดสอบการดูดซับด้วยไนโตรเจนและการทดสอบการดูดซับด้วยไอน้ำ เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากการใช้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด พบว่าการใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าการใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 ซึ่งจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ต่ำ ซึ่งจะแสดงได้ว่าเมื่อผ่านไป 6 เดือนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 มีค่าการดูดซับน้อย ทำให้ทราบว่าโครงสร้างมีความหนาแน่นมากกว่าและมีรูพรุนต่ำ ดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงกว่ามีความทนทานต่อสารเคมีสูงกว่า [3]

จากค่า BET การทดสอบการดูดซับด้วยไนโตรเจนใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลง โพรงจะลดลง และการใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พื้นที่ผิวจำเพาะก็จะมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ต้องเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม จากการทดสอบการดูดซับด้วยไอน้ำจะเห็นได้ว่า เมื่อใส่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.35 มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง โพรงจะลดลง ทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใส่เถ้าก้นเตาบดละเอียด จะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเสื่อมสภาพสูงขึ้น

5.2 สรุปผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิคไมโครอินเดนเทชัน

จากค่าโมดูลัสยืดหยุ่น การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 มีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ปริมาณวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่าการใส่วัสดุประสานจะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความทนทานน้อยลง ส่วนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่วัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่าการใส่วัสดุประสานที่มาก จะส่งผลให้ความทนทานของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น[4]

จากค่าความแข็งของวัสดุ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 จะมีแนวโน้มคล้ายค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ส่วนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20 จะได้ค่าความแข็งของวัสดุที่สูงที่สุด ทำให้ทราบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยและแทนที่วัสดุประสานในปริมาณที่เหมาะสม จะส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความแข็งแรงขึ้นมากกว่าการไม่ใส่วัสดุประสานเลย

จากค่าโมดูลัสการคืบ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 เมื่อแทนที่วัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มที่ซีเมนต์เพสต์จะเกิดการคืบมากกว่า มีความแข็งแรงน้อยกว่าการไม่ใส่วัสดุประสาน ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่าการแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 50 สามารถทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแข็งแรงและทนทานต่อการเกิดคืบได้ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ผู้เป็นแรงบันดาลใจและกระตุ้นให้ทำวิจัยเสมอมา ขอบคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปางที่สนับสนุนเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ สำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ธีรเดช ทัพภะ,เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์, นันทวัฒน์ ขมหวาน, ชิษณุพงษ์ สุธัมมะ, และ สุบรรณ สนิทอินทร์(2566) การปรับปรุงคุณภาพวัสดุประสานจากเถ้าก้นเตา เพื่อพัฒนาศักยภาพในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม ศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

[2] ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์, ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, ปิยะพล สีหาบุตร และ เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ (2555) การใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมืองจ.มหาสารคาม

[3] กมล ตรีผอง,อรรคเดช อับดุลมาติน และ วีรพันธุ์ เจียมมี ปรีชา อิทธิพลของการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงเป็นวัสดุปอซโซลานต่อกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการต้านทานแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

[4] จิรา ธรรมนิยม , สุรเชษฐ์ วรรณา(2567) การศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดกรณีศึกษาส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสำรวจ เพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาณวัดหล่ายพัฒนาจังหวัดพะเยา Using Application Surveying Technology for Heritage Building information Modeling Data: A Case Study of Lai Phatthana Temple, Phayao Province

พรปวีณ์ ชัยแก้ว1 พัชราภา อุตุภรณ์2 ติณณภพ บุญศาสตร์3 ธีรภัทร์ อัครโชคทรัพย์4,*

[1,2,3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: author@up.ac.th*

บทคัดย่อ

โบราณสถานเป็นหลักฐานสำคัญที่สะท้อนถึงประวัติศาสตร์ ศิลปะ วัฒนธรรม และภูมิปัญญาของแต่ละยุคสมัย เนื่องด้วยโบราณสถานจำนวนมากมีความเก่าแก่จึงมีสภาพที่เสื่อมโทรมไปตามกาลเวลา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการทำแบบจำลอง 3 มิติ โดยเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ เทปวัดสนาม เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับ โดยนำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบความแม่นของระยะ จากการสำรวจภาคสนาม ณ พระเจ้าทันใจวัดหล่ายพัฒนา ตำบล หล่ายพัฒนา อำเภอ เชียงคำ จังหวัดพะเยา

กำหนดระยะอ้างอิง จากการใช้เทปวัดสนามเป็นตัวแปรควบคุม และเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับเป็นตัวแปรต้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap , Agisoft Metashape ในการประมวลข้อมูล วัดระยะจากซอฟต์แวร์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบแม่นยำหาความคลาดเคลื่อนก่อนนำมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และนำเสนอแบบจำลอง 3 มิติผ่าน Google Eart Pro ผลการวิจัยในครั้งนี้พบว่า เครื่องมือสำรวจที่สามารถระบุค่าพิกัดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ได้แก่ เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ ตามลำดับ และสามารถนำแบบจำลอง 3 มิติ มานำเสนอผลงานผ่านรูปแบบของซอฟต์แวร์ Google Eart Pro

คำสำคัญ: เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS), อากาศยานไร้คนขับ (UAV), แบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถาน (H-BIM)

Abstract

Ancient sites are important evidence that reflects the history, art, culture, and wisdom of each era. Since many ancient sites are old, they have deteriorated over time. This research aims to collect data for creating 3D models using the following tools: field tape measure, 3D data collector, and drone. The data obtained were used to check the accuracy of the distance from the survey at Phra Chao Tan Jai, Wat Lai Phatthana, Lai Phatthana Subdistrict, Chiang Kham District, Phayao Province.

The reference distance was determined by using the field tape measure as a control variable and the 3D data collector and drone as the independent variables. Autodesk Recap and Agisoft Metashape software were used to process the data, measure the distance from the software, and compare the results for accuracy to find errors before creating a 3D model using Autodesk Revit software and presenting the 3D model via Google Eart Pro. The results of this research found that the survey tools that can accurately specify location coordinates include the 3D data collector and drone, respectively, and can present the 3D model via Google Eart Pro software.

Keywords: 3D Data Acquisition (TLS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Heritage Building Information Modeling (H-BIM)

คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โบราณสถานมีความสำคัญอย่างมากซึ่งโบราณเป็นสถานที่ที่มีอยู่มากมายหลายแห่งในประเทศไทย โดยถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ยืนยัน คุณค่าทางประวัติศาสตร์ สังคม และความเก่าแก่ของแหล่งชุมชนหรือสถานที่นั้นๆ ซึ่งถือเป็นมรดกทางกายภาพที่มีค่าทางจิตใจต่อผู้อยู่อาศัยในชุมชนนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงวิถีชีวิต คติความเชื่อของคนในท้องถิ่น และภูมิปัญญาในเชิงช่างของบรรพบุรุษรวมถึงเทคโนโลยีการก่อสร้างและทรัพยากรที่หาได้ในแต่ละยุคสมัย จากการสำรวจสิ่งปลูกสร้างที่เก่าแก่จะมีเอกลักษณ์และลักษณะทางศิลปะสถาปัตยกรรมที่โดดเด่น ซึ่งถือเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สามารถยืนยันคุณค่าของชุมชนดั้งเดิม เนื่องจากโบราณสถานเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอายุเก่าแก่จึงมีสภาพที่เสื่อมโทรมตามกาลเวลายากต่อการดูแลรักษาให้ดำรงอยู่ ส่งผลให้มีจำนวนลดน้อยลงและถูกรื้อถอนหรือดัดแปลงจนสูญเสียบูรณภาพของสิ่งปลูกสร้างเดิม

ในปัจจุบันแนวคิดการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถาน (Heritage Building Information Modeling : H-BIM) เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเป็นงานประเภทอาคารอนุรักษ์นอกจากจะเป็นการสร้างแบบจำลองแล้วนั้น อีกทั้งสามารถนำมาวิเคราะห์รายละเอียดของตัวโบราณสถานได้อย่างแม่นยำอีกด้วย โดยที่ H-BIM จะต้องมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ สำรวจ ซึ่งจะเป็นส่วนขยายความสามารถของ BIM ที่เหมาะสำหรับอาคารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์และศิลปะ โดยใช้วิธีการจัดการและเก็บรวบรวมข้อมูลโครงสร้างทางประวัติศาสตร์โดยใช้วัตถุพาราเมตริก ที่สร้าง ขึ้นจากทั้งข้อมูลปัจจุบันและการวิจัยทางประวัติศาสตร์ เนื่องจาก BIM มีซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบ การทำแบบ วิเคราะห์วัตถุต่างๆ

ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการใช้เทคโนโลยีข้อมูลโฟโตแกรมเมตรีร่วมกับเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ เพื่อรวบรวมข้อมูลโบราณสถานที่มีอายุประมาณ 50 ปี ซึ่งมีการสำรวจการบันทึกข้อมูล และการประมวลผลโดยการนำเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ มาเก็บข้อมูลค่าพิกัดตำแหน่ง และภาพเสมือนจริง

เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง โดยใช้ซอฟต์แวร์และโปรแกรมประยุกต์ดังต่อไปนี้ Autodesk Recap Pro, Google Earth Pro, DJI GO 4, Pix 4d Capture และ Autodesk Revit ในการจัดเก็บ วิเคราะห์ข้อมูล และการนำเสนอผลงานที่ได้จากการจำลอง โบราณสถานแบบ 3 มิติลงในแผนที่ที่เกิดจากภาพถ่ายดาวเทียม ทำให้สามารถเห็นแบบจำลอง 3 มิติในสถานที่นั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการรวบรวมข้อมูลในการสร้างแบบจำลองโบราณสถาน

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองโบราณสถานกับสถานที่จริง

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการนำเสนอแบบจำลองและถ่ายทอดข้อมูล ของโบราณสถาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สถานที่ พระเจ้าทันใจ วัดหล่ายพัฒนา ตำบลอ่างทอง อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา

1.3.2 เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ ใช้เพื่อสร้างสำเนาข้อมูลในรูปแบบ 3 มิติ

1.3.3 อากาศยานไร้คนขับ ใช้บินสำรวจ สร้างสำเนาข้อมูลแบบ 3 มิติ

1.3.4 เทปวัดสนาม ใช้รังวัดตรวจสอบระยะจากการสำรวจภาคสนาม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แนวทางสร้างแบบจำลองโบราณสถาน (H-BIM) จากการศึกษาวิธีรวบรวมข้อมูล

1.4.2 ได้แนวทางในการวิเคราะห์แบบจำลองกับสถานที่จริงของโบราณสถานที่

1.4.3 ได้ข้อมูลเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองกับสถานที่จริง เพื่อสนับสนุนการอนุรักษ์

1.4.4 ได้นำเสนอแบบจำลองและถ่ายทอดข้อมูล

1.4.5 ได้ทราบพื้นที่ของโบราณสถานเพื่อจะนำไปบูรณะ

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พระเจ้าทันใจ หรือพระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ เป็นพระพุทธรูปที่มีพระพักตร์ (ใบหน้า) ลักษณะใบหน้ามีรูปทรงกลม หรือรูปทรงไข่ พระเนตร (ดวงตา) มีลักษณะหลบต่ำในท่ามองลงมาเล็กน้อย แสดงถึงความอ่อนโยนและความเมตตา พระโอษฐ์ (ปาก) มีลักษณะยิ้มน้อยๆ ซึ่งสื่อถึงว่าความสงบสุขและการต้อนรับผู้ที่มาเยือนมากราบไหว้ ในส่วนของพระเกตุมาลา (ส่วนบนศีรษะ) มีลักษณะเป็นยอดแหลมคล้ายกับดอกบัวตูม ทำให้สื่อถึงความรู้แจ้งและทรงปัญญา พระอิริยาบถ (ท่าทางของพระพุทธรูป) พระเจ้าทันใจจะอยู่ในท่านั่งสมาธิ (ปางมารวิชัย) โดยวางพระหัตถ์ขวาไว้บนพระเพลา (ตัก) และหงายฝ่าพระหัตถ์ซ้ายขึ้น เครื่องนุ่งห่ม (จีวรหรืออาภรณ์) มีลักษณะเรียบง่ายและไม่ประดับตกแต่งมากนัก ฐานพระพุทธรูป ฐานของพระเจ้าทันใจ มีลักษณะเป็นทรงรีลอมรอบด้วยกรีบดอกบัว พระเจ้าทันใจทั้งองค์พระ มีลักษณะเป็นสีขาวมุกสง่างาม ที่นั่งประทับบนดอกบัวสีขาวมุก โดยองค์พระมีขนาด สูง 13.90 เมตร หน้าตักกว้าง 9 เมตร ประดิษฐานอยู่ ณ บนยอดเขาภายในหมู่บ้าน บ้านหล่ายพัฒนา ตำบลอ่างทอง อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา เป็นองค์พระเจ้าทันใจที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ

2.1 เครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS)

เป็นการสแกนรวบรวมข้อมูลเชิงภาคพื้นดินในรูปแบบข้อมูล 3 มิติ ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองเสมือนจริง โดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุเป้าหมาย ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการรวบรวมข้อมูลวัตถุขนาดเล็กไปจนถึงสถานที่หรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ โดยหลักการทำงานของเครื่องมือคือ การยิงแสงเลเซอร์ออกมาเมื่อเลเซอร์กระทบวัตถุก็จะสะท้อนกลับไปยังตัวกล้อง จากนั้นกล้องก็จะทำการคำนวณเวลาไปกลับของคลื่น โดยสัญญาณที่ส่งกลับมาจะถูกบันทึกในลักษณะของค่าพิกัด 3 มิติ

โดยพื้นฐาน ของวัตถุเมฆ (Point Cloud) เป็นรูปแบบอย่างง่ายของแบบจำลอง 3 มิติ การรวบรวมแต่ละจุดลงในพื้นที่ 3 มิติ แต่ละจุดประกอบไปด้วยการวัดหลายอย่างรวมถึงพิกัดตามแกน X,Y, และ Z และบางค่าเป็นข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ค่าสีซึ่งจัดเก็บในรูปแบบ RGB และค่าความสว่าง ซึ่งกำหนดความสว่างของจุดที่เป็นเมฆ จุดถูกสร้างขึ้นจากการสแกนวัตถุหรือสแกนโครงสร้าง โดยการใช้เครื่องมือสแกนเนอร์ (Laser Scanner) หรือไลดาร์ (LiDar) ซึ่งจะเลเซอร์จากเครื่องรับ เมื่อเลเซอร์ตกกระทบกับวัตถุจะสะท้อนกลับมายังเครื่องทำให้เกิดรูปร่าง

- ข้อกำหนด คือ ไม่สามารถทะลุผ่านผิววัตถุที่ตกกระทบ ดังนั้นการปฏิบัติงานจำเป็นที่จะต้องเคลื่อนย้ายตำแหน่งของเครื่องสแกน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์
- เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนของรูปแบบเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นและด้วยข้อจำกัดในเรื่องของเทคโนโลยีการสแกนข้อมูล 3 มิติ เพียงอย่างเดียวแล้วนั้น จึงไม่เพียงพอสำหรับการรวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุม ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้เครื่องมือและเทคนิคอื่นๆ เข้ามาเพื่อช่วยในการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS) รุ่น Faro Focus M70

2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการอยู่บนเครื่อง เป็นอากาศยานที่ไร้คนขับหรือนักบินแต่สามารถควบคุมได้อากาศยานไร้คนขับมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไป ตามหลักแล้วอากาศยานไร้คนขับ คือ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ควบคุมจากระยะไกล ใช้การควบคุมอัตโนมัติซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกล และการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเองซึ่งต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนแล้วมีการติดตั้งไว้ในอากาศยาน

อาจกล่าวได้ว่า อากาศยานไร้คนขับ คือ เครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้ นักบินประจำการอยู่บนอากาศยาน อาจมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงทั้งกล้องถ่ายภาพในเวลากลางวัน (Electro Optical) และกล้องอินฟราเรด (Infrared Sensor) ที่สามารถบันทึกภาพถ่าย จากระยะไกลและส่งสัญญาณภาพถ่ายมายังจอแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สถานีภาคพื้นดิน ในเวลาที่ใกล้เวลาจริงมากที่สุด (Near Real Time: NRT) ซึ่งประเภทโดรนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ ได้แก่

- Quadcopter ยี่ห้อ DJI เป็นหนึ่งในโดรนที่มีความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะในการถ่ายภาพทางอากาศและถ่ายวิดีโอ ซึ่งโดรนลักษณะนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานหลายประเภท ลักษณะของโดรนมีใบพัด 4 พัด กล้องความละเอียดสูง และระบบนำทาง โดยหลักการทำงานโดรนจะถูกควบคุมผ่านทางรีโมทคอนโทรลหรือโปรแกรมประยุกต์ที่สามารถควบคุมระยะไกลได้โดยใช้
- คลื่นวิทยุหรือ สัญญาณอินเตอร์เน็ตเมื่อเริ่มบินใบพัดจะเริ่มหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างแรงยกและแรงหมุน ช่วยให้โดรนโดย ใบพัดสองใบจะหมุนตามเข็มนาฬิกาและอีกสองใบจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เพื่อลดแรงบิดของโดรนซึ่งจะช่วยให้โดรนมีสเถียรภาพในการบินและยังสามารถเคลื่อนที่ในทุกทิศทางได้อย่างง่ายดาย โดยการเปลี่ยนความเร็วของใบพัดแต่ละตัว ทำให้สามารถเลี้ยว, เคลื่อนที่ขึ้น-ลง, หรือหมุนรอบตัวเองได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อากาศยานไร้คนขับ (UAV) รุ่น DJI Phantom 4 Pro

2.1.2 เทปวัดสนาม (Measuring Tape)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระยะทางในงานสำรวจ โดยมีลักษณะเป็นสายวัดที่มีระยะ 5 เมตร ซึ่งสามารถม้วนเก็บได้มีหน่วยเป็นเมตรหรือฟุต วัสดุของเทปวัดสนามเป็นไฟเบอร์กลาส เพื่อให้เกิดความทนทานและป้องกันการฉีกขาดได้ ซึ่งเทปวัดสนามมีวิธีการใช้ที่ง่ายและรวดเร็วในการสำรวจภาคสนาม ดังรูปที่ 4

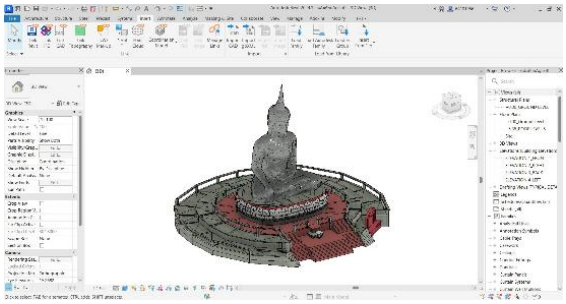


รูปที่ 4 เทปวัดสนาม (Measuring Tape)

2.2 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Autodesk Revit (Education)

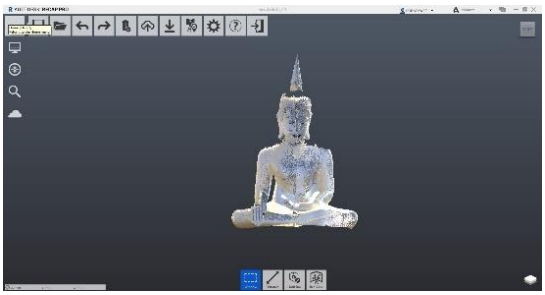
เป็นซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาเพื่อการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling หรือ BIM) โดย Autodesk Revit ใช้สำหรับการออกแบบทางสถาปัตยกรรม วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมระบบอาคาร (MEP) และการก่อสร้าง โดยหลักการทำงานในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจะสร้างจากข้อมูลจริงที่เกี่ยวกับโครงสร้าง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Revit *(Education)*

2.2.2 Autodesk Recap (Education)

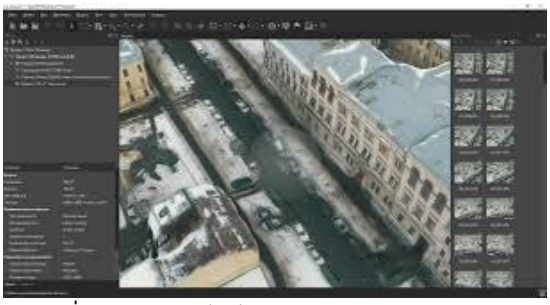
เป็นซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาเพื่อจัดการและประมวลผลข้อมูล 3 มิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการ สแกนเลเซอร์และภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีความละเอียดสูง ซอฟต์แวร์นี้มีฟีเจอร์ที่หลากหลายซึ่งช่วยในการทำงาน ในหลายด้าน อย่างเช่นการเก็บข้อมูลจากการสแกนเลเซอร์ โดยจะมีการรองรับการนำเข้าข้อมูลจาก LiDAR Scanner และ 3D Laser Scanner ซึ่งจะช่วยสร้างข้อมูลวัตถุเมฆ และการใช้ภาพถ่าย Autoddesk Recap ยังสามารถนำเข้าภาพถ่ายจากกล้องต่างๆ เพื่อใช้ร่วมกับข้อมูลจากการสแกนเลเซอร์ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Recap *(Education)*

2.2.3 Agisoft Matshape (Education)

เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ 3 มิติ โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานสร้างแบบจำลอง 3 มิติ,ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์(GIS),และการอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรม โดยหลักการทำงานซอฟต์แวร์จะเริ่มด้วยการจัดตำแหน่งภาพ เพื่อนำมาสร้างวัตถุเมฆจุดหนาแน่น (Dense Cloud Generation) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลพิกเซลของภาพถ่าย หลังจากนั้นจะมีการสร้างตาข่ายขึ้นซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นผิวที่มีหลายเหลี่ยมเชื่อมต่อติดกัน แล้วทำการใส่พื้นผิวที่ได้จากภาพถ่ายต้นฉบับลงไปและสุดท้ายจึงทำการวิเคราะห์ส่งออกข้อมูล ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ *Agisoft Matshape (Education)*

2.2.4 DJI GO 4

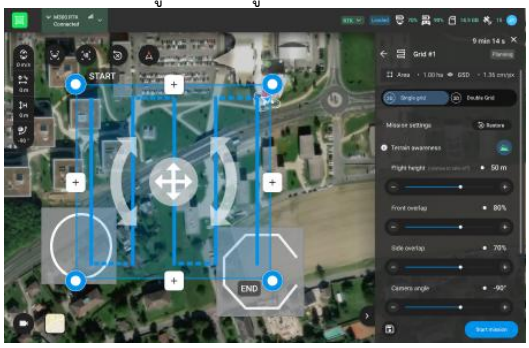
เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมและจัดการการบินของโดรน DJI โดยเฉพาะ มีฟังก์ชันที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายภาพทางอากาศและการบินอย่างปลอดภัย โดยหลักการทำงานจะมีการเชื่อมต่อโปรแกรมประยุกต์กับโดรนผ่าน สัญญาณอินเตอร์เน็ตหรือสายเชื่อมต่อข้อมูลเพื่อควบคุมการบินและตั้งค่าต่างๆ และนอกจากนี้ยังการแสดงผลของข้อมูล โหมดอัจฉริยะ การบันทึกและแก้ไขข้อมูล ความปลอดภัยในการบินโดยการตรวจจับสิ่งกีดขวางและเมื่อแบตเตอรี่ต่ำหรือสูญเสียสัญญาณจากรีโมท คำสั่ง RTH จะทำให้โดรนกลับไปยังจุดเริ่มต้นโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ DJI GO 4

2.2.5 PIX4Dcapture

เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพซึ่งได้มาจากการทำร่วมกับโดรนและอุปกรณ์มือถือ ด้วยการใช้ อัลกอริทึมที่ล้ำสมัยและเทคนิคการประมวลผลโฟโตแกรมเมตริกขั้นสูง โดยหลักการทำงานจะมีการวางแผนเส้นทางการบิน พื้นที่และการตั้งค่าต่างๆ แล้วยังสามารถเปิดโหมดการบินอัตโนมัติ เพื่อให้โดรนบินไปตามเส้นทางที่กำหนดแล้วนอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลจากการถ่ายภาพทางอากาศได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพสูง เพื่อส่งต่อไปยังการประมวลผลของข้อมูลต่อไป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ PIX4Dcapture

2.2.6 Google Earth Pro

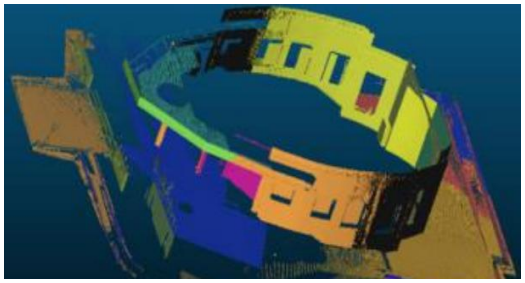
เป็นซอฟต์แวร์ที่มีพื้นฐานอยู่บนการรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม และข้อมูลภูมิศาสตร์ (geospatial data) มาประมวลผลเพื่อสร้างแผนที่แบบสามมิติของพื้นผิวโลก อีกทั้งยังสามารถสร้างโมเดล 3 มิติได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพและข้อมูลความสูงของพื้นที่ นอกจากนี้ข้อมูลที่แสดงบน Google Earth Pro มีการอัปเดตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่เป็นปัจจุบันและแม่นยำที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Google Earth Pro

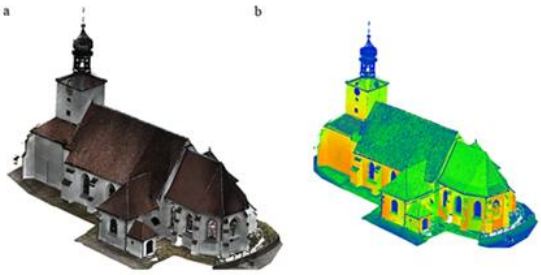
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohammed Bouziani et, All (2021) ได้ศึกษาการประเมินการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของอาคารและการดึงองค์ประกอบโครงสร้างจาก วัตถุเมฆที่ได้รับ โดยใช้เทคนิคการรับสองวิธี (โดรนและเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน) รวมถึงการประเมินประโยชน์ของการรวมเข้าด้วยกัน โดยใช้ Drone ยี่ห้อ DJI Phantom 3 ProFessional และกล้อง Sony EXMOR 1/2.3" MOS RGB และการสแกนดวยเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ ได้ดำเนินการสถานีสแกน 9 สถานีโดยใช้เครื่องสแกนรุ่น FARO Focus S350 เพื่อให้เกิดการหลอมรวมของทั้งสองวัตถุเมฆ ที่ได้รับภาพจากโดรนและ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ ขั้นตอนนี้ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึม Iterative Nearest Point แล้วอัลกอริทึมตัวนี้ได้ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึม RANSAC ที่ดัดแปลงบน วัตถุเมฆที่ได้รับจากโดรนและ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ รวมถึงการรวม วัตถุเมฆเพื่อแยกองค์ประกอบโครงสร้างของอาคาร ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 งานวิจัยของ Mohammed Bouziani et, All (2021)

Marta Tarnowska, All (2023) ได้ศึกษาการผสมผสานระหว่างการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้น ดินและโฟโตแกรมเมตรี UAV สำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติและการประเมินความเสื่อมโทรมของ อาคารมรดกตามการวิเคราะห์แสง โดยการใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) และสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติของโบสถ์แบบจำลองข้อมูลอาคารในอดีต (H-BIM) ถูกสร้างขึ้นจากการใช้ Autodesk Revit โดยอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองที่สร้างขึ้นและคุณสมบัติการสะท้อนของลำแสงเลเซอร์สแกนและภาพสีแดง-เขียว-น้ำเงิน (RGB) ดังในรูที่ 12



รูปที่ 12 งานวิจัยของ Marta Tarnowska, All (2023)

Przemysław Klapa and Pelagia Gawronek ได้ศึกษาการทำงานร่วมกันของข้อมูลภูมิสารสนเทศจาก เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และ อากาศยานไร้คนขับ สำหรับการสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคาร (H-BIM) โดยการเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับในการเก็บข้อมูลแล้วทำการส่งมาอยู่ในรูปแบบของวัตถุเมฆ โดยวัตถุเมฆของเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ จะดำเนินการในซอฟแวร์ Leica Cyclone ในขณะที่การบวนการประมวณภาพอากาศยานไร้คนขับดำเนินการในซอฟแวร์ Agisoft Metashape Professional แล้วนำข้อมูลต่างๆ ที่ได้มาทำการสร้างโมเดล โดยการใช้ Autodesk Revit ซึ่งจะมี ความละเอียด (LOD) ระดับของข้อมูล (LOI) ข้อมูลของเรขาคณิตของแบบจำลอง (LOG) ระดับความแม่นยำ (LOA) เป็นตัวกำหนด ดังในรูปที่ 13



รูปที่ 13 งานวิจัยของ Pelagia Gawronek ,All (2022)

3. ระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาความเป็นมาและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยในหัว “การใช้เทคโนโลยีข้อมูลโฟโตแกรมเมตรีร่วมกับข้อมูลเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ เพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาน” ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 สถานที่ตั้งวัดพระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ

3.2 สำรวจพื้นที่และวางแผนการทำงาน

สำรวจภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย บริเวณพระเจ้าทันใจ (พระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ) ซึ่งสถานที่นี้ถือเป็นมรดกทางกายภาพที่มีค่าทางจิตใจต่อผู้อยู่อาศัยในชุมชน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงวิถีชีวิต คติความเชื่อของคนในท้องถิ่น และภูมิปัญญาของชุมชนในหมู่บ้านหล่ายพัฒนา ตำบลอ่างทอง อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา โดยการรวบรวมข้อมูลในเวลาที่เหมาะสม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวางแผนการดำเนินงานต่อไป ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 สำรวจพื้นที่และวางแผนการทำงาน

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดย 2 ส่วนหลักคือ การรวบรวมข้อมูล ที่ได้จากการรังวัดด้วยเทปวัดสนาม เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการประมวลผล

อีกส่วนคือการานำข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลของเครื่องมือมาทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และส่วนสุดท้ายคือ การนำแบบจำลอง 3 มิติที่ได้เข้าซอฟต์แวร์ Google Eart Pro เพื่อแสดงแบบจำลอง 3 มิติในแผนที่

3.3.1 การรวบรวมข้อมูลโดยใช้เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และการประมวลผล

การรวบรวมข้อมูลด้วยเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ รุ่น Faro Focus M70 โดยเริ่มจากการตั้งค่ากล้อง Manage : Project/Clusture >>Duplicate(ทำการคัดลอกสำเนา)>>File Base Name(ทำการตั้งชื่อ) , Selected Profile >> Out door 20m .... >> Resolution (1/4 ตามมาตรฐาน) >> Quality (3x , 4x เครื่องเลเซอร์จะกลับมาสแกนจุดเดิมซ้ำตามจำนวนที่เลือกและจำนวนที่เลือกจะแปรผันตรงกับเวลาเช่นกัน) >> Scan With Color(เปิด) หลังจากนั้นเริ่มทำการสแกนสำรวจเพื่อรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจมาประมวลผล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap เพื่อส่งออกข้อมูลเป็นวัตถุเมฆ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเก็บข้อมูลเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS)

3.3.2 การรวบรวมข้อมูลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) และการประมวลผล

การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ รุ่น DJI Phantom 4 Pro โดยเริ่มจากการเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ DJI GO 4 ผ่านสัญญาณอินเตอร์เน็ต หรือสายเชื่อมต่อข้อมูล เพื่อควบคุมการบินและทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรมประยุกต์ PIX4Dcapture เพื่อทำการตั้งค่าต่างๆแล้วออกแบบเส้นทางการบินหลังจากนั้นเริ่มทำการบินสำรวจเพื่อรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจมาประมวลผล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Matshape เพื่อส่งออกข้อมูลเป็นวัตถุเมฆ ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การเก็บข้อมูลจากอากาศไร้คนขับ (UAV)

3.3.3 การวัดระยะจากเทปวัดสนาม

การใช้งานเทปวัดระยะเพื่อหาจุดอ้างอิงเริ่มต้นด้วยการกำหนดจุด เช่นระบุจุดเริ่มต้นและจุดปลายที่จะใช้ในการรวบรวมข้อมูล จากนั้นใช้เทปวัดระยะเพื่อวัดระยะห่างระหว่างจุดที่อ้างอิง ด้วยการขึงเทปให้ตึงพอดีมือเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น เมื่อวัดระยะทางเสร็จเรียบร้อย ให้บันทึกค่าที่ได้อย่างละเอียด

นำข้อมูลของระยะที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Agisoft Metashape และ Autodesk Recap ดังรูปที่ 18



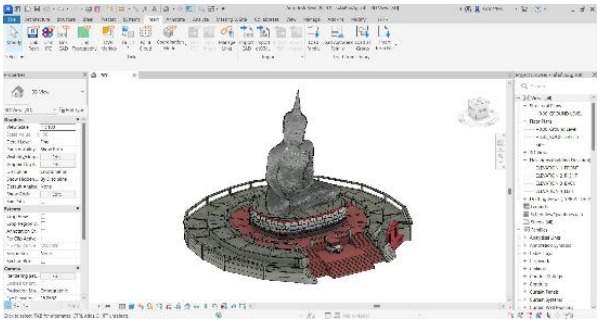
รูปที่ 18 การวัดระยะจากเทป

3.3.4 การนำมาเปรียบเทียบระยะ

นำระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Autodesk Recap, Agisoft Metashape และการลงพื้นที่มาเปรียบเทียบระยะเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนและความแม่นยำจากข้อมูลที่ได้จาก ตารางที่ 1

3.3.5 การประยุกต์ใช้ข้อมูลร่วมโดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

โดยการนำผลการประมวลที่ได้จากการส่งออกของข้อมูลที่เป็น Point Cloud จากซอฟต์แวร์ Autodesk Recap และ Agisoft Matshape มาประยุกต์ใช้ร่วมกันในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 Autodesk Revit

- *ประโยชน์ Autodesk Revit*

  ช่วยในเรื่องแบบจำลอง 3 มิติขององค์พระพุทธรูป ซึ่งสามารถทำให้ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายสำหรับการปรับปรุงบูรณะอีกทั้งยังสามารถส่งต่อแบบจำลอง 3 มิติเพื่อให้ผู้ที่สนใจศึกษาได้เรียนรู้เชิงอนุรักษ์อีกด้วย

- *ประโยชน์ Agisoft Matshape*

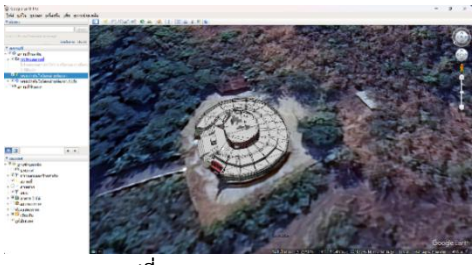
  สามารถแสดงข้อมูลวัตถุเมฆ ในรูปแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อแสดงความเสียหาย เช่น รอยแตกร้าว การเสื่อมสภาพของวัสดุ หรือความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างชัดเจน

- *ประโยชน์ Autodesk Recap*

  ช่วยให้ได้ ข้อมูลที่แม่นยำ รวดเร็ว ลดข้อผิดพลาด และสามารถนำวัตถุเมฆ ที่ได้มาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่จะนำไปสู่การใช้ในด้านอนุรักษ์ ฟื้นฟู และศึกษาวิจัย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีนี้ช่วยลดผลกระทบต่อโบราณสถาน และยังสามารถผสานข้อมูลร่วมกับเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3.3.6 การนำเข้าแบบจำลอง 3 มิติในซอฟต์แวร์ GoogleEarthPro

การนำแบบจำลอง 3 มิติจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit เข้าไปยังซอฟต์แวร์ Google Earth Pro โดยการเลือกสถานที่ตั้ง ดูค่าพิกัดค่า Google Earth Pro จากนั้นให้ทำการ ส่งออกไปยัง Autodesk Navisworks แล้วทำการตั้งค่าพิกัด และ ส่งออกไปยัง Autodesk Navisworks และส่งไปยัง Google Earth Pro เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นปรากฏใน Google Earth Pro ดังรูปที่ 20



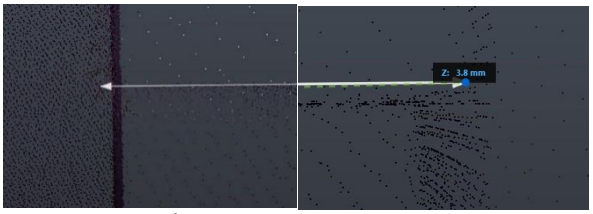
รูปที่ 20 *Google Earth Pro*

4. ผลการวิจัย

จากการศึกษาเก็บข้อมูลด้วยวิธีข้างต้นและการจำลองแบบโบราณสถาน ผลลัพธ์การศึกษาที่ได้ดังต่อไปนี้

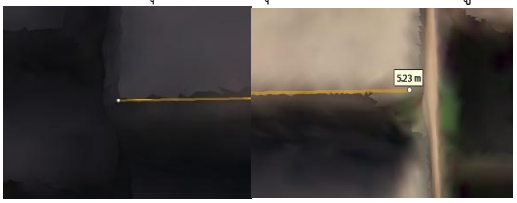
จากการรวบรวมข้อมูลด้วยการรวบรวมข้อมูลเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับและเทปวัดสนามจำนวน 30 จุด ดังตางรางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งมีวิธีการวัดระยะ ดังต่อไปนี้

- การรังวัดระยะ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 21



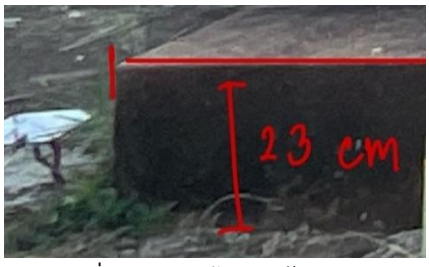
รูปที่ 21 การรังวัดด้วย Autodesk Recap

- การรังวัดระยะ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Matashape ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 20



รูปที่ 22 การรังวัดด้วย *Agisoft Matshape*

- การรังวัดระยะ โดยการใช้เทปวัดสนาม ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 การรังวัดด้วย *เทปวัดสนาม*

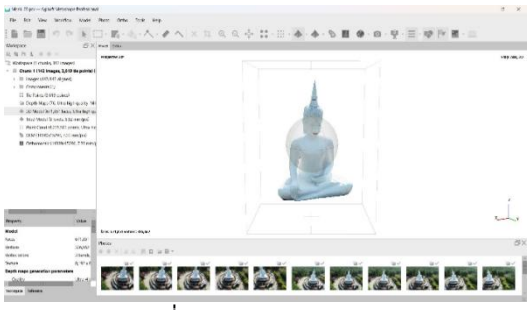
ตารางที่ 1 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Agisoft Metashape

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	Agisoft Matshape		
P1	0.23	0.228	0.002	0.870
P2	0.20	0.197	0.003	1.500
P3	0.20	0.20	0.000	0.000
P4	0.18	0.191	-0.011	-6.111
P5	0.19	0.193	-0.003	-1.579
P6	0.17	0.185	-0.015	-8.824
P7	5.30	5.31	-0.010	-0.189
P8	0.29	0.287	0.003	1.034
P9	0.29	0.297	-0.007	-2.414
P10	0.29	0.287	0.003	1.034
P11	0.30	0.298	0.002	0.667
P12	0.30	0.3	0.000	0.000
P13	1.00	0.997	0.003	0.300
P14	0.17	0.168	0.002	1.176
P15	0.18	0.181	-0.001	-0.556
P16	0.18	0.178	0.002	1.111
P17	0.18	0.181	-0.001	-0.556
P18	0.18	0.18	0.000	0.000
P19	0.20	0.205	-0.005	-2.500
P20	2.67	2.64	0.030	1.124
P21	0.21	0.213	-0.003	-1.429
P22	0.20	0.199	0.001	0.500
P23	0.20	0.202	-0.002	-1.000
P24	0.18	0.18	0.000	0.000
P25	0.18	0.173	0.007	3.889
P26	0.21	0.206	0.004	1.905
P27	1.47	1.44	0.030	2.041
P28	1.97	2.000	-0.030	-1.523
P29	0.26	0.259	0.001	0.385
P30	0.26	0.261	-0.001	-0.385
Total	17.84	17.836	0.004	-9.528
Average	0.5947	0.5945	0.0001	-0.318
Root Mean Squared Error			0.00073	0.12281

ตารางที่ 2 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Autodesk Recap

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	Autodesk Recap		
P1	0.23	0.224	0.006	2.609
P2	0.20	0.1972	0.003	1.400
P3	0.20	0.1970	0.003	1.500
P4	0.18	0.195	-0.015	-8.333
P5	0.19	0.190	0.000	0.000
P6	0.17	0.17	0.000	0.000
P7	5.30	5.300	0.000	0.000
P8	0.29	0.29	0.000	0.000
P9	0.29	0.2962	-0.006	-2.138
P10	0.29	0.2874	0.003	0.897
P11	0.30	0.2984	0.002	0.533
P12	0.30	0.3094	-0.009	-3.133
P13	1.00	1.003	-0.003	-0.300
P14	0.17	0.167	0.003	1.765
P15	0.18	0.182	-0.002	-1.111
P16	0.18	0.171	0.009	5.000
P17	0.18	0.183	-0.003	-1.667
P18	0.18	0.184	-0.004	-2.222
P19	0.20	0.198	0.002	1.000
P20	2.67	2.669	0.001	0.037
P21	0.21	0.206	0.004	1.905
P22	0.20	0.214	-0.014	-7.000
P23	0.20	0.198	0.002	1.000
P24	0.18	0.187	-0.007	-3.889
P25	0.18	0.177	0.003	1.667
P26	0.21	0.203	0.007	3.333
P27	1.47	1.46	0.010	0.680
P28	1.97	1.963	0.007	0.355
P29	0.26	0.2588	0.001	0.462
P30	0.26	0.259	0.001	0.385
Total	17.84	17.837	0.003	-5.266
Average	0.5947	0.5946	0.0001	-0.1755
Root Mean Squared Error			0.00047	0.07983

การรวบรวมข้อมูลพื้นที่ของแบบจำลององค์พระพุทธรูปผลการประมวลที่ได้จากซอฟต์แวร์ Agisoft Matshape ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีพื้นที่ 671,851 ตารางเมตร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 22 Agisoft Matshape

5. วิเคราะห์ผลงานวิจัย

5.1 เทปวัดสนาม

การรังวัดจากการใช้เทปวัดสนามสามารถใช้เป็นระยะอ้างอิงที่ได้จริงและมีความแม่นยำในพื้นที่สูง ซึ่งข้อจำกัดของการใช้เทปวัดสนาม คือ เมื่อมีพื้นที่มีมากเกินไปอาจจะส่งผลทำให้การวัดระยะไม่ทั่วถึงข้อมูลที่ได้อาจจะได้รับไม่ครบถ้วน

5.2 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS)

สามารถวัดระยะได้จากแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงผ่าน วัตถุเมฆ ซึ่งข้อจำกัดของเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ คือ การรวบรวมข้อมูลในแนวดิ่ง อาจเก็บข้อมูลได้ไม่ครบถ้วน ถ้าหากสภาพพื้นที่มีแสงสว่างมากเกินความจำเป็นหรือแสงสว่างเข้าไม่ถึงจึงส่งผลทำให้เกิดเงา ข้อมูลที่ได้รับจะไม่แสดงถึงวัตถุเมฆ ณ บริเวณนั้น ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ควรได้รับขาดหายหรือเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ราบและสภาพอากาศที่เหมาะสม

5.3 อากาศยานไร้คนขับ (UAV)

เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งมุมกว้างและมุมสูง ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและมีความสะดวกสบายในการทำงานมาก แต่อากาศยานไร้คนขับยังมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูล คือ การเก็บข้อมูลจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับสัญญาณอินเตอร์เน็ตจนกว่าทำการเก็บข้อมูลสำเร็จ ไม่ควรขึ้นบินในขณะที่แบตเตอรี่ต่ำให้ทำการชาร์จให้เต็มทุกครั้งก่อนทำการขึ้นบิน ควรหลีกเลี่ยงการบินใกล้กับบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางและไม่ควรขึ้นบินในสภาพอากาศที่มีลมแรง หรือฝนตก

สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาวิเคราะห์การเปรียบเทียบวิธีการรวบรวมข้อมูล เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองซึ่งเปรียบเทียบการรวบรวมข้อมูลโดยการใช้เครื่องมือ 2 ชนิด คือ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้เครื่องมือเทปวัดสนามเป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิงเพื่อนำ 2 เครื่องมือข้างต้นมาเปรียบเทียบ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้อากาศยานไร้คนขับ ทั้งนี้สามารถดูได้จากเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน (%RMSE) ค่าที่ได้จากซอฟต์แวร์ Agisoft Matshape มีค่าเท่ากับ 0.12281 และซอฟต์แวร์ Autodesk Recap มีความเท่ากับ 0.07983 ซึ่ง % RMSE มีค่าต่ำเทียบเท่าใกล้เคียง เท่ากับ 0 แสดงว่าโมเดลที่ได้จากเครื่องมือมีความถูกต้องแม่นยำสูง

จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือสำรวจ ที่มีความแม่นยำมากที่สุด ได้แก่ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองจึงทำให้ทราบถึงพื้นที่ของส่วนที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองที่ได้มานำเสนอในรูปแบบ 3 มิติผ่านทาง Google Eart Pro เพื่อเป็นการอนุรักษ์ในเชิงการท่องเที่ยว

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อ.ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง ในการให้คำปรึกษาการ ดำเนินงานวิจัย ตลอดจนได้ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่เริ่มดำเนินการจนกระทั่งดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็น อย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระ คุณผู้ใหญ่บ้าน นายทองคำ ศรีแพงมูล หมู่ที่ 3 บ้านหล่ายพัฒนา ที่ได้ช่วยประสานงานกับทางวัด ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ดีสำหรับกรณีการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้

อ้างอิง

[1] Mohammed Bouziani et, All (2021), “Evalution of 3D Building Model Using Terrestial Laser Scanning and Drone Photogrammetry, The International Archives of the Photogrammetry”, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-4/W4-2021 16th 3D GeoInfo Conference 2021, 11–14 October 2021, New York City, USA

[2] Marta Tarnowska, All (2023), “Combination of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry for 3D modelling and degradation assessment of heritage building based on a lighting analysis: case study—St. Adalbert Church in Gdansk, Poland”, Tysiac et al. Heritage Science, Received: 7 november 2022, Accepted: 1 March 2023, Published online: 15 March 2023

[3] Przemysław Klapa and Pelagia Gawronek, “Synergy of Geospatial Data from TLS and UAV for Heritage Building Information Modeling (HBIM)”, Remote Sens. 2023, 15, 128 Received: 16 November 2022 Accepted: 24 December 2022 Published online: 26 December 2022

[4] บทความ โดย นิสิตภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อินทาเนีย ฉบับที่ 4 ปี พ.ศ. 2563, “การใช้งานเครื่องมือเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (TLS) กับงานด้านการเกษตร”, ปีที่ 29 ฉบับที่ 4 ตุลาคม – ธันวาคม 2567

[5] Yahya Alshawabkeh, Ahmad Baik, Yehia Miky, “Integration of Laser Scanner and Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement”, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 316, Received: 21 March 2021 Accepted: 2 May 2021 Published online: 8 May 2021

[6] Patricio Martínez-Carricondo, Fernando Carvajal-Ramírez, Lourdes Yero-Paneque and Francisco Agüera-Vega, “Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain)”, Martínez Carricondo et al. Herit Sci, Received: 10 June 2021, Accepted: 2 August 2021, Published online: 10 August 2021

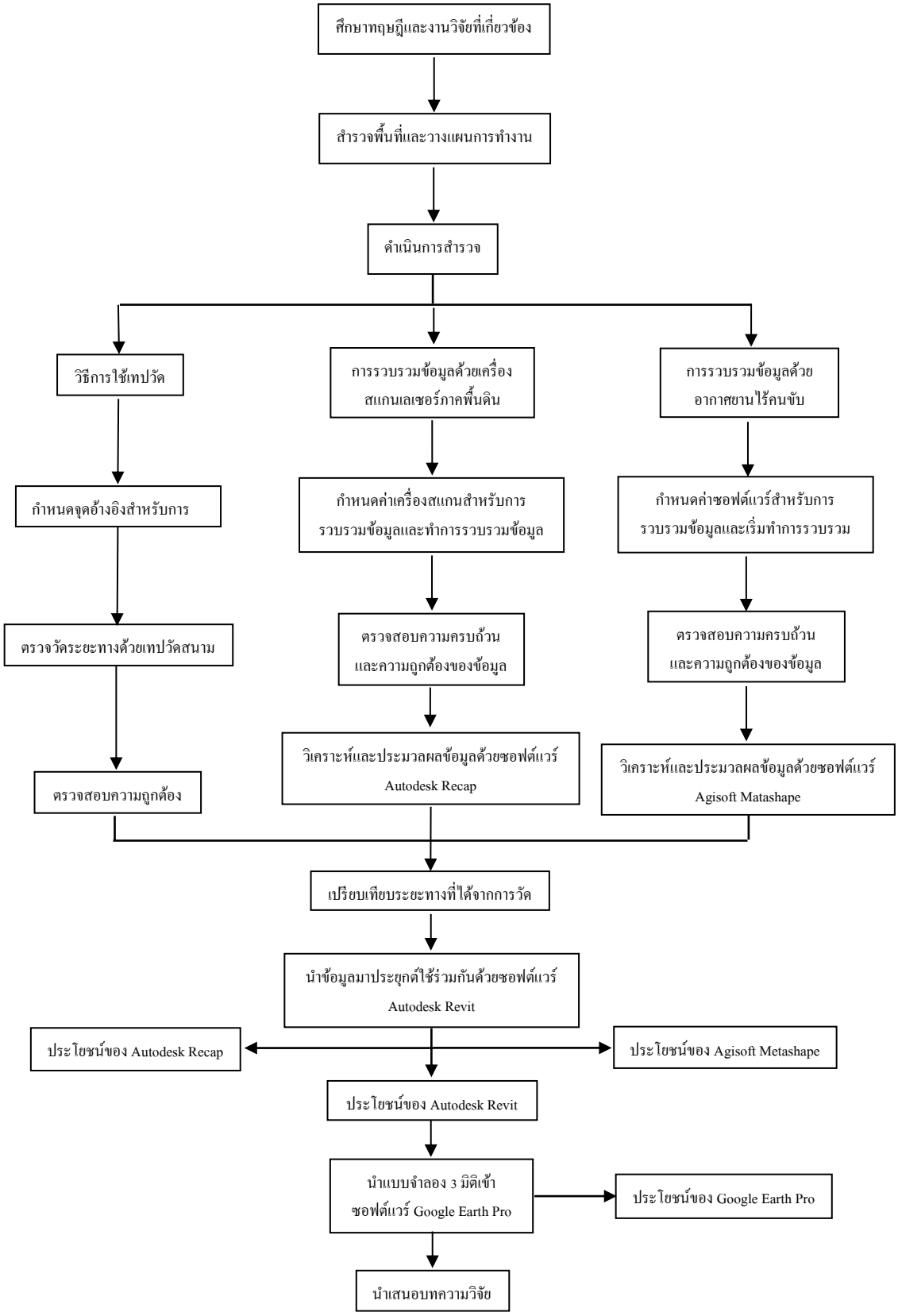
[7] Yahya Alshawabkeh and Ahmad Baik, “Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site”, Alshawabkeh and Baik Heritage Science, Received: 10 April 2023, Accepted: 10 July 2023, Published online: 19 July 2023

[8] Maria Alessandra Tini, Anna Forte Domenico Simone Roggio, Valentina Alena Girelli, Gabriele Bitelli, Alessandro Lambertini and LucaVittuari, “Scan-to-HBIM-to-VR: An Integrated Approach for the Documentation of an Industrial Archaeology Building”, Remote Sens. 2024, 16, 2859, Received: 5 June 2024, Recevied: 31 July 2024, Accepted: 2 August 2024, Published online: 5 August 2024

[9] Facundo José López, Pedro M. Lerones, José Llamas and Eduardo Zalama, “A ReviewofHeritage Building Information Modeling (H-BIM)”, Multimodal Technologies and Interact. 2018, 2, 21, Received: 28 March 2018, Accepted: 3 May 2018, Published online: 5 May 2018

ผากผนวก

วิธีการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 22 วิธีการดำงานวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทคโนโลยีสำรวจ เพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถานวัดหล่ายพัฒนาจังหวัดพะเยา Using Application Surveying Technology for Heritage Building information Modeling Data: A Case Study of Lai Phatthana Temple, Phayao Province

พรปวีณ์ ชัยแก้ว1 พัชราภา อุตุภรณ์2 ติณณภพ บุญศาสตร์3 ธีรภัทร์ อัครโชคทรัพย์4,*

[1,2,3] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา*Corresponding author; E-mail address: author@up.ac.th*

บทคัดย่อ

โบราณสถานเป็นหลักฐานสำคัญที่สะท้อนถึงประวัติศาสตร์ ศิลปะ วัฒนธรรม และภูมิปัญญาของแต่ละยุคสมัย เนื่องด้วยโบราณสถานจำนวนมากมีความเก่าแก่จึงมีสภาพที่เสื่อมโทรมไปตามกาลเวลา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการทำแบบจำลอง 3 มิติ โดยเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ เทปวัดสนาม เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับ โดยนำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบความแม่นของระยะ จากการสำรวจภาคสนาม ณ พระเจ้าทันใจวัดหล่ายพัฒนา ตำบลหล่ายพัฒนา อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา

กำหนดระยะอ้างอิง จากการใช้เทปวัดสนามเป็นตัวแปรควบคุม และเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับเป็นตัวแปรต้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap , Agisoft Metashape ในการประมวลข้อมูล วัดระยะจากซอฟต์แวร์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบแม่นยำหาความคลาดเคลื่อนก่อนนำมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และนำเสนอแบบจำลอง 3 มิติผ่าน Google Earth Pro ผลการวิจัยในครั้งนี้พบว่า เครื่องมือสำรวจที่สามารถระบุค่าพิกัดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ได้แก่ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ ตามลำดับ และสามารถนำแบบจำลอง 3 มิติ มานำเสนอผลงานผ่านรูปแบบของซอฟต์แวร์ Google Earth Pro

คำสำคัญ: เครื่องแสกนข้อมูล 3 มิติ (TLS), อากาศยานไร้คนขับ (UAV), แบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถาน (H-BIM)

Abstract

Antiques are important evidence that reflects the history, art, culture, and wisdom of each era. Since many antiques are old, they have deteriorated over time. This research aims to collect data for creating 3D models. The tools used are field tape measures, 3D scanners, and drones. The data obtained are used to check the accuracy of the distance from the field survey at Phra Chao Tan Jai, Wat Lai Phatthana, Lai Phatthana Subdistrict, Chiang Kham District, Phayao Province. The reference distance is set by using field tape measures as control variables and 3D scanners and drones as independent variables. Autodesk Recap and Agisoft Metashape software are used to process data, measure distances from the software, and compare the results for accuracy to find errors before creating a 3D model using Autodesk Revit software and presenting the 3D model via Google Earth Pro. The results of this research found that the survey tools that can accurately specify location coordinates are 3D scanners and drones, respectively. The 3D model can be presented via Google Earth Pro software

Keywords: 3D Data Acquisition (TLS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Heritage Building Information Modeling (H-BIM)

คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โบราณสถานมีความสำคัญอย่างมากซึ่งโบราณสถานเป็นสถานที่ที่มีอยู่มากมายหลายแห่งในประเทศไทย โดยถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ยืนยัน คุณค่าทางประวัติศาสตร์ สังคม และความเก่าแก่ของแหล่งชุมชนหรือสถานที่นั้นๆ ซึ่งถือเป็นมรดกทางกายภาพที่มีค่าทางจิตใจต่อผู้อยู่อาศัยในชุมชนนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงวิถีชีวิต คติความเชื่อของคนในท้องถิ่น และภูมิปัญญาในเชิงช่างของบรรพบุรุษรวมถึงเทคโนโลยีการก่อสร้างและทรัพยากรที่หาได้ในแต่ละยุคสมัย จากการสำรวจสิ่งปลูกสร้างที่เก่าแก่จะมีเอกลักษณ์และลักษณะทางศิลปะสถาปัตยกรรมที่โดดเด่น ซึ่งถือเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สามารถยืนยันคุณค่าของชุมชนดั้งเดิม เนื่องจากโบราณสถานเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีอายุเก่าแก่จึงมีสภาพที่เสื่อมโทรมตามกาลเวลายากต่อการดูแลรักษาให้ดำรงอยู่ ส่งผลให้มีจำนวนลดน้อยลงและถูกรื้อถอนหรือดัดแปลงจนสูญเสียบูรณภาพของสิ่งปลูกสร้างเดิม

ในปัจจุบันแนวคิดการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถาน(Heritage Building Information Modeling : H-BIM) เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเป็นงานประเภทอาคารอนุรักษ์นอกจากจะเป็นการสร้างแบบจำลองแล้วนั้นอีกทั้งสามารถนำมาวิเคราะห์รายละเอียดของตัวโบราณสถานได้อย่างแม่นยำอีกด้วย โดยที่ H-BIM จะต้องมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่สำรวจ ซึ่งจะเป็นส่วนขยายความสามารถของ BIM ที่เหมาะสำหรับอาคารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์และศิลปะ โดยใช้วิธีการจัดการและเก็บรวบรวมข้อมูลโครงสร้างทางประวัติศาสตร์โดยใช้วัตถุพาราเมตริก ที่สร้าง ขึ้นจากทั้งข้อมูลปัจจุบันและการวิจัยทางประวัติศาสตร์ เนื่องจาก BIM มีซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบการทำแบบ วิเคราะห์วัตถุต่างๆดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการใช้เทคโนโลยีข้อมูลโฟโตแกรมเมตรีร่วมกับเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ เพื่อรวบรวมข้อมูลโบราณสถานที่มีอายุประมาณ 50 ปี ซึ่งมีการสำรวจเพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง โดยใช้ซอฟต์แวร์และโปรแกรมประยุกต์ ดังต่อไปนี้ Autodesk Recap Pro, Google Earth Pro, DJI GO 4, PIX4Dcapture และ Autodesk Revit ในการจัดเก็บ วิเคราะห์ข้อมูล และการนำเสนอผลงานที่ได้จากการจำลอง โบราณสถานแบบ 3 มิติลงในแผนที่ที่เกิดจากภาพถ่ายดาวเทียม ทำให้สามารถเห็นแบบจำลอง 3 มิติในสถานที่นั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการรวบรวมข้อมูลในการสร้างแบบจำลองโบราณสถาน

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองโบราณสถานกับสถานที่จริง

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการนำเสนอแบบจำลองและถ่ายทอดข้อมูล ของโบราณสถาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สถานที่ พระเจ้าทันใจ วัดหล่ายพัฒนา ตำบลอ่างทอง อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา

1.3.2 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ ใช้เพื่อสร้างสำเนาข้อมูลในรูปแบบ 3 มิติ

1.3.3 อากาศยานไร้คนขับ ใช้บินสำรวจ สร้างสำเนาข้อมูลในรูปแบบ 3 มิติ

1.3.4 เทปวัดสนาม ใช้รังวัดตรวจสอบระยะจากการสำรวจภาคสนาม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แนวทางสร้างแบบจำลองโบราณสถาน (H-BIM) จากการศึกษาวิธีรวบรวมข้อมูล

1.4.2 ได้แนวทางในการวิเคราะห์แบบจำลองกับสถานที่จริงของโบราณสถาน

1.4.3 ได้ข้อมูลเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองกับสถานที่จริง เพื่อสนับสนุนการอนุรักษ์

1.4.4 ได้แนวทางการพัฒนาระบบฐานข้อมูลโบราณสถานอย่างเป็นระบบ

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พระเจ้าทันใจ หรือพระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ เป็นพระพุทธรูปที่มีพระพักตร์ (ใบหน้า) ลักษณะใบหน้ามีรูปทรงกลม หรือรูปทรงไข่ พระเนตร (ดวงตา) มีลักษณะหลบต่ำในท่ามองลงมาเล็กน้อย แสดงถึงความอ่อนโยนและความเมตตา พระโอษฐ์ (ปาก) มีลักษณะยิ้มน้อยๆ ซึ่งสื่อถึงว่าความสงบสุขและการต้อนรับผู้ที่มาเยือนมากราบไหว้ ในส่วนของพระเกตุมาลา (ส่วนบนศีรษะ) มีลักษณะเป็นยอดแหลมคล้ายกับดอกบัวตูม ทำให้สื่อถึงความรู้แจ้งและทรงปัญญา พระอิริยาบถ (ท่าทางของพระพุทธรูป) พระเจ้าทันใจจะอยู่ในท่านั่งสมาธิ (ปางมารวิชัย) โดยวางพระหัตถ์ขวาไว้บนพระเพลา (ตัก) และหงายฝ่าพระหัตถ์ซ้ายขึ้น เครื่องนุ่งห่ม (จีวรหรืออาภรณ์) มีลักษณะเรียบง่ายและไม่ประดับตกแต่งมากนัก ฐานพระพุทธรูป ฐานของพระเจ้าทันใจ มีลักษณะเป็นทรงรีล้อมรอบด้วยกรีบดอกบัว พระเจ้าทันใจทั้งองค์พระ มีลักษณะเป็นสีขาวมุกสง่างาม ที่นั่งประทับบนดอกบัวสีขาวมุก

โดยองค์พระมีขนาด สูง 13.90 เมตร หน้าตักกว้าง 9 เมตร ประดิษฐานอยู่ ณ บนยอดเขาภายในหมู่บ้าน บ้านหล่ายพัฒนา ตำบลหล่ายพัฒนา อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา เป็นองค์พระเจ้าทันใจที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ

2.1 เครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS)

เป็นการสแกนรวบรวมข้อมูลเชิงภาคพื้นดินในรูปแบบข้อมูล 3 มิติ ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองเสมือนจริง โดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุเป้าหมาย ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการรวบรวมข้อมูลวัตถุขนาดเล็กไปจนถึงสถานที่หรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ โดยหลักการทำงานของเครื่องมือคือการยิงแสงเลเซอร์ออกมาเมื่อเลเซอร์กระทบวัตถุก็จะสะท้อนกลับไปยังตัวกล้อง จากนั้นกล้องก็จะทำการคำนวณเวลาไปกลับของคลื่น โดยสัญญาณที่ส่งกลับมาจะถูกบันทึกในลักษณะของค่าพิกัด 3 มิติ

โดยพื้นฐาน ของวัตถุเมฆ (Point Cloud) เป็นรูปแบบอย่างง่ายของแบบจำลอง 3 มิติ การรวบรวมแต่ละจุดลงในพื้นที่ 3 มิติ แต่ละจุดประกอบไปด้วยการวัดหลายอย่างรวมถึงพิกัดตามแกน X,Y, และ Z และบางค่าเป็นข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ค่าสีซึ่งจัดเก็บในรูปแบบ RGB และค่าความสว่าง ซึ่งกำหนดความสว่างของจุดที่เป็นเมฆ จุดถูกสร้างขึ้นจากการสแกนวัตถุหรือสแกนโครงสร้าง โดยการใช้เครื่องมือสแกนเนอร์ (Laser Scanner) หรือไลดาร์ (LiDar) ซึ่งจะเลเซอร์จากเครื่องรับ เมื่อเลเซอร์ตกกระทบกับวัตถุจะสะท้อนกลับมายังเครื่องทำให้เกิดรูปร่าง

- ข้อกำหนด คือ ไม่สามารถทะลุผ่านผิววัตถุที่ตกกระทบ ดังนั้นการปฏิบัติงานจำเป็นที่จะต้องเคลื่อนย้ายตำแหน่งของเครื่องสแกน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์
- เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนของรูปแบบเรขาคณิตที่ถูกสร้างขึ้นและด้วยข้อจำกัดในเรื่องของเทคโนโลยีการสแกนข้อมูล 3 มิติ เพียงอย่างเดียวแล้วนั้น จึงไม่เพียงพอสำหรับการรวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุม ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้เครื่องมือและเทคนิคอื่นๆ เข้ามาเพื่อช่วยในการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS) รุ่น Faro Focus M

2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการอยู่บนเครื่อง เป็นอากาศยานที่ไร้คนขับหรือนักบินแต่สามารถควบคุมได้อากาศยานไร้คนขับมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไป ตามหลักแล้วอากาศยานไร้คนขับ คือ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ควบคุมจากระยะไกล ใช้การควบคุมอัตโนมัติซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกล และการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเองซึ่งต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนแล้วมีการติดตั้งไว้ในอากาศยาน

อาจกล่าวได้ว่า อากาศยานไร้คนขับ คือ เครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้ นักบินประจำการอยู่บนอากาศยาน อาจมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงทั้งกล้องถ่ายภาพในเวลากลางวัน (Electro Optical) และกล้องอินฟราเรด (Infrared Sensor) ที่สามารถบันทึกภาพถ่าย จากระยะไกลและส่งสัญญาณภาพถ่ายมายังจอแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สถานีภาคพื้นดินในเวลาที่ใกล้เวลาจริงมากที่สุด (Near Real Time: NRT) ซึ่งประเภทโดรนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ ได้แก่

- Quadcopter ยี่ห้อ DJI เป็นหนึ่งในโดรนที่มีความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะในการถ่ายภาพทางอากาศและถ่ายวิดีโอ ซึ่งโดรนลักษณะนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานหลายประเภท ลักษณะของโดรนมีใบพัด 4 พัด กล้องความละเอียดสูง และระบบนำทาง โดยหลักการทำงานโดรนจะถูกควบคุมผ่านทางรีโมทคอนโทรลหรือโปรแกรมประยุกต์ที่สามารถควบคุมระยะไกลได้โดยใช้
- คลื่นวิทยุหรือ สัญญาณอินเตอร์เน็ตเมื่อเริ่มบินใบพัดจะเริ่มหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างแรงยกและแรงหมุน ช่วยให้โดรนโดย ใบพัดสองใบจะหมุนตามเข็มนาฬิกาและอีกสองใบจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เพื่อลดแรงบิดของโดรนซึ่งจะช่วยให้โดรนมีสเถียรภาพในการบินและยังสามารถเคลื่อนที่ในทุกทิศทางได้อย่างง่ายดาย โดยการเปลี่ยนความเร็วของใบพัดแต่ละตัว ทำให้สามารถเลี้ยว, เคลื่อนที่ขึ้น-ลง, หรือหมุนรอบตัวเองได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อากาศยานไร้คนขับ (UAV) รุ่น DJI Phantom 4 Pro

2.1.2 เทปวัดสนาม (Measuring Tape)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระยะทางในงานสำรวจ โดยมีลักษณะเป็นสายวัดที่มีระยะ 5 เมตร ซึ่งสามรถม้วนเก็บได้มีหน่วยเป็นเมตรหรือฟุต วัสดุของเทปวัดสนามเป็นไฟเบอร์กลาส เพื่อให้เกิดความทนทานและป้องกันการฉีกขาดได้ ซึ่งเทปวัดสนามมีวิธีการใช้ที่ง่ายและรวดเร็วในการสำรวจภาคสนาม ดังรูปที่ 4

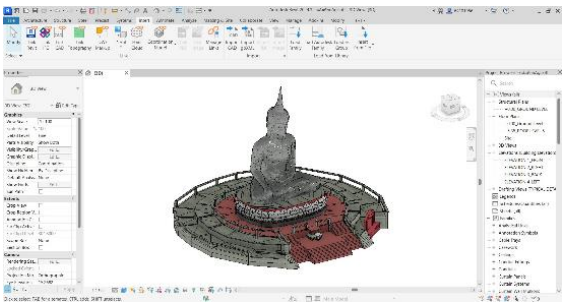


รูปที่ 4 เทปวัดสนาม (Measuring Tape)

2.2 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Autodesk Revit (Education)

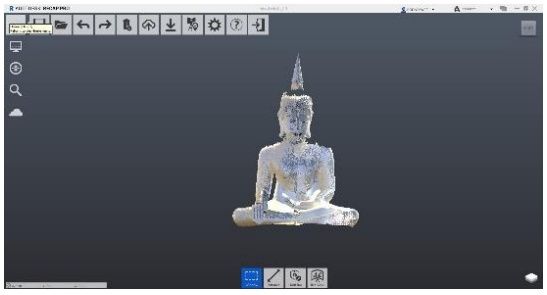
เป็นซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาเพื่อการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling หรือ BIM) โดย Autodesk Revit ใช้สำหรับการออกแบบทางสถาปัตยกรรม วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมระบบอาคาร (MEP) และการก่อสร้าง โดยหลักการทำงานในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจะสร้างจากข้อมูลจริงที่เกี่ยวกับโครงสร้าง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Revit (Education)

2.2.2 Autodesk Recap (Education)

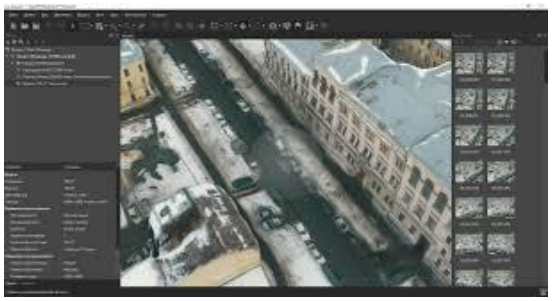
เป็นซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาเพื่อจัดการและประมวลผลข้อมูล 3 มิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการ สแกนเลเซอร์และภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีความละเอียดสูง ซอฟต์แวร์นี้มีฟีเจอร์ที่หลากหลายซึ่งช่วยในการทำงาน ในหลายด้าน อย่างเช่นการเก็บข้อมูลจากการสแกนเลเซอร์ โดยจะมีการรองรับการนำเข้าข้อมูลจาก LiDAR Scanner และ 3D Laser Scanner ซึ่งจะช่วยสร้างข้อมูลวัตถุเมฆ และการใช้ภาพถ่าย Autodesk Recap ยังสามารถนำเข้าภาพถ่ายจากกล้องต่างๆ เพื่อใช้ร่วมกับข้อมูลจากการสแกนเลเซอร์ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Recap (Education)

2.2.3 Agisoft Matshape (Education)

เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ 3 มิติ โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานสร้างแบบจำลอง 3 มิติ,ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์(GIS),และการอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรม โดยหลักการทำงานซอฟต์แวร์จะเริ่มด้วยการจัดตำแหน่งภาพ เพื่อนำมาสร้างวัตถุเมฆจุดหนาแน่น (Dense Cloud Generation) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลพิกเซลของภาพถ่าย หลังจากนั้นจะมีการสร้างตาข่ายขึ้นซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นผิวที่มีหลายเหลี่ยมเชื่อมต่อติดกัน แล้วทำการใส่พื้นผิวที่ได้จากภาพถ่ายต้นฉบับลงไปและสุดท้ายจึงทำการวิเคราะห์ส่งออกข้อมูล ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Agisoft Matashape (Education)

2.2.4 DJI GO 4

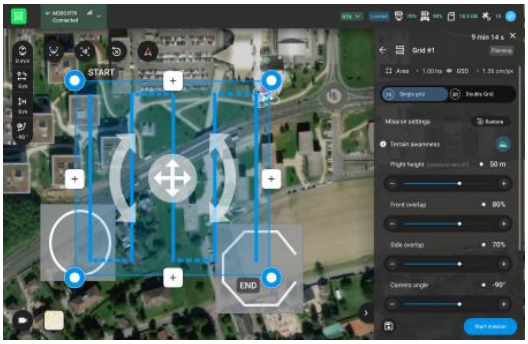
เป็นซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมและจัดการการบินของโดรน DJI โดยเฉพาะ มีฟังก์ชันที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายภาพทางอากาศและการบินอย่างปลอดภัย โดยหลักการทำงานจะมีการเชื่อมต่อโปรแกรมประยุกต์กับโดรนผ่าน สัญญาณอินเตอร์เน็ตหรือสายเชื่อมต่อข้อมูลเพื่อควบคุมการบินและตั้งค่าต่างๆ และนอกจากนี้ยังการแสดงผลของข้อมูล โหมดอัจฉริยะ การบันทึกและแก้ไขข้อมูล ความปลอดภัยในการบินโดยการตรวจจับสิ่งกีดขวางและเมื่อแบตเตอรี่ต่ำหรือสูญเสียสัญญาณจากรีโมท คำสั่ง RTH จะทำให้โดรนกลับไปยังจุดเริ่มต้นโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ DJI GO 4

2.2.5 PIX4Dcapture

เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพซึ่งได้มาจากการทำร่วมกับโดรนและอุปกรณ์มือถือ ด้วยการใช้ อัลกอริทึมที่ล้ำสมัยและเทคนิคการประมวลผลโฟโตแกรมเมตริกขั้นสูง โดยหลักการทำงานจะมีการวางแผนเส้นทางการบิน พื้นที่และการตั้งค่าต่างๆ แล้วยังสามารถเปิดโหมดการบินอัตโนมัติ เพื่อให้โดรนบินไปตามเส้นทางที่กำหนดแล้วนอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลจากการถ่ายภาพทางอากาศได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพสูง เพื่อส่งต่อไปยังการประมวลผลของข้อมูลต่อไป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ PIX4Dcapture

2.2.6 Google Earth Pro

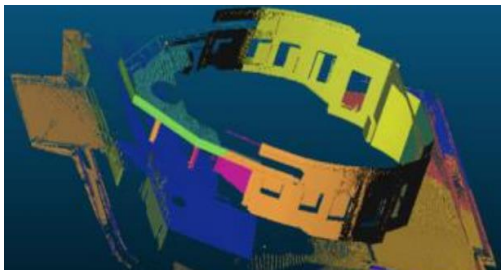
เป็นซอฟต์แวร์ที่มีพื้นฐานการรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายทางดาวเทียม และข้อมูลภูมิศาสตร์ (Geospatial data) มาประมวลผลเพื่อสร้างแผนที่แบบสามมิติของพื้นผิวโลก อีกทั้งยังสามารถสร้างโมเดล 3 มิติได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพและข้อมูลความสูงของพื้นที่ นอกจากนี้ข้อมูลที่แสดงบน Google Earth Pro มีการอัปเดตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่เป็นปัจจุบันและแม่นยำที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Google Earth Pro

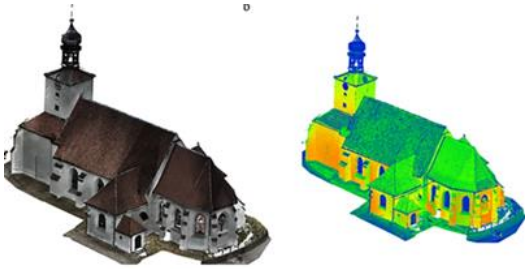
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohammed Bouziani et, All (2021) ได้ศึกษาการประเมินการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของอาคารและการดึงองค์ประกอบโครงสร้างจาก วัตถุเมฆที่ได้รับ โดยใช้เทคนิคการรับสองวิธี (โดรนและเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน) รวมถึงการประเมินประโยชน์ของการรวมเข้าด้วยกัน โดยใช้ Drone ยี่ห้อ DJI Phantom 3 ProFessional และกล้อง Sony EXMOR 1/2.3" MOS RGB และการสแกนด้วยเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ ได้ดำเนินการสถานีสแกน 9 สถานีโดยใช้เครื่องสแกนรุ่น FARO Focus S350 เพื่อให้เกิดการหลอมรวมของทั้งสองวัตถุเมฆ ที่ได้รับภาพจากโดรนและ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ ขั้นตอนนี้ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึม Iterative Nearest Point แล้วอัลกอริทึมตัวนี้ได้ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึม RANSAC ที่ดัดแปลงบน วัตถุเมฆที่ได้รับจากโดรนและ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ รวมถึงการรวม วัตถุเมฆเพื่อแยกองค์ประกอบโครงสร้างของอาคาร ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 งานวิจัยของ Mohammed Bouziani et, All (2021)

Marta Tarnowska, All (2023) ได้ศึกษาการผสมผสานระหว่างเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS) และ อากาศยานไร้คนขับ (UAV) สำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติและการประเมินความเสื่อมโทรมของ อาคารมรดกตามการวิเคราะห์แสง โดยการใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) และเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS) เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติของโบสถ์แบบจำลองข้อมูลอาคารในอดีต (H-BIM) ถูกสร้างขึ้นจากการใช้ Autodesk Revit โดยอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองที่สร้างขึ้นและคุณสมบัติการสะท้อนของลำแสงเลเซอร์สแกนและภาพสีแดง-เขียว-น้ำ เงิน (RGB) ดังในรูที่ 12



รูปที่ 12 งานวิจัยของ Marta Tarnowska, All (2023)

Przemysław Klapa and Pelagia Gawronek ได้ศึกษาการทำงานร่วมกันของข้อมูลภูมิสารสนเทศจาก เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับ สำหรับการสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคาร (H-BIM) โดยการเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับในการเก็บข้อมูลแล้วทำการส่งมาอยู่ในรูปแบบของ วัตถุเมฆ โดย วัตถุเมฆ ของเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ จะดำเนินการในซอฟต์แวร์ Leica Cyclone ในขณะที่การบวนการประมวณภาพอากาศยานไร้คนขับดำเนินการในซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape Professional แล้วนำข้อมูลต่างๆที่ได้มาทำการสร้างโมเดล โดยการใช้ Autodesk Revit ซึ่งจะมี ความละเอียด (LOD) ระดับของข้อมูล (LOI) ข้อมูลของเรขาคณิตของแบบจำลอง (LOG) ระดับความแม่นยำ (LOA) เป็นตัวกำหนด ดังในรูปที่ 13



รูปที่ 13 งานวิจัยของ Marta Tarnowska, All (2023)

3. ระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาความเป็นมาและทฤษฎีที่เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย “การใช้เทคโนโลยีข้อมูลโฟโตแกรมเมตรีร่วมกับเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ เพื่อเก็บข้อมูลโบราณสถาน” ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 สถานที่ตั้งวัดพระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ

3.2 สำรวจพื้นที่และวางแผนการทำงาน

สำรวจภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย บริเวณพระเจ้าทันใจ (พระเจ้าแก้วมณีโชติทันใจ) ซึ่งสถานที่นี้ถือเป็นมรดกทางกายภาพที่มีค่าทางจิตใจต่อผู้อยู่อาศัยในชุมชน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงวิถีชีวิต คติความเชื่อของคนในท้องถิ่น และภูมิปัญญาของชุมชนในหมู่บ้านหล่ายพัฒนา ตำบลหล่ายพัฒนา อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา โดยการรวบรวมข้อมูลในเวลาที่เหมาะสม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวางแผนการดำเนินงานต่อไป ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 สำรวจพื้นที่และวางแผนการทำงาน

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดย 2 ส่วนหลักคือ การรวบรวมข้อมูล ที่ได้จากการรังวัดด้วยเทปวัดสนาม เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการประมวลผลอีกส่วนคือการนำข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลของเครื่องมือมาทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และส่วนสุดท้ายคือ การนำแบบจำลอง 3 มิติที่ได้เข้าซอฟต์แวร์ Google Earth Pro เพื่อแสดงแบบจำลอง 3 มิติในแผนที่

3.3.1 การรวบรวมข้อมูลโดยใช้เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และการประมวลผล

การรวบรวมข้อมูลด้วยเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ รุ่น Faro Focus M70 โดยเริ่มจากการตั้งค่ากล้อง Manage : Project/Clusture >>Duplicate(ทำการคัดลอกสำเนา)>>File Base Name (ทำการตั้งชื่อ), Selected Profile >> Out door 20m .... >> Resolution (1/4 ตามมาตรฐาน) >> Quality (3x, 4x เครื่องเลเซอร์จะกลับมาสแกนจุดเดิมซ้ำตามจำนวนที่เลือก และจำนวนที่เลือกจะแปรผันตรงกับเวลาเช่นกัน) >> Scan With Color (เปิด) หลังจากนั้นเริ่มทำการสแกนสำรวจเพื่อรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจมาประมวลผล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap เพื่อส่งออกข้อมูลเป็นวัตถุเมฆ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเก็บข้อมูลเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS)

3.3.2 การรวบรวมข้อมูลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) และการประมวลผล

การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ รุ่น DJI Phantom 4 Pro โดยเริ่มจากการเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ DJI GO 4 ผ่านสัญญาณอินเตอร์เน็ต หรือสายเชื่อมต่อข้อมูล เพื่อควบคุมการบินและทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรมประยุกต์ PIX4Dcapture เพื่อทำการตั้งค่าต่างๆแล้วออกแบบเส้นทางการบินหลังจากนั้นเริ่มทำการบินสำรวจเพื่อรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจมาประมวลผล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Matashape เพื่อส่งออกข้อมูลเป็นวัตถุเมฆ ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การเก็บข้อมูลจากอากาศไร้คนขับ (UAV)

3.3.3 การวัดระยะจากเทปวัดสนาม

การใช้งานเทปวัดระยะเพื่อหาจุดอ้างอิงเริ่มต้นด้วยการกำหนดจุด เช่นระบุจุดเริ่มต้นและจุดปลายที่จะใช้ในการรวบรวมข้อมูล จากนั้นใช้เทปวัดระยะเพื่อวัดระยะห่างระหว่างจุดที่อ้างอิง ด้วยการขึงเทปให้ตึงพอดีมือเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น เมื่อวัดระยะทางเสร็จเรียบร้อย ให้บันทึกค่าที่ได้อย่างละเอียด

นำข้อมูลของระยะที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Agisoft Metashape และ Autodesk Recap ดังรูปที่ 18



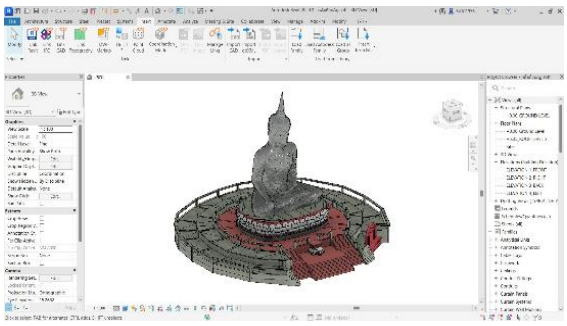
รูปที่ 18 การวัดระยะจากเทป

3.3.4 การนำมาเปรียบเทียบระยะ

นำระยะที่วัดได้จากซอฟแวร์ Autodesk Recap, Agisoft Metashape และการลงพื้นที่มาเปรียบเทียบระยะเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนและความแม่นยำจากข้อมูลที่ได้จาก ตารางที่ 1

3.3.5 การประยุกต์ใช้ข้อมูลร่วมโดยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

โดยการนำผลการประมวลที่ได้จากการส่งออกของข้อมูลที่เป็น Point Cloud จากซอฟต์แวร์ Autodesk Recap และ Agisoft Matashape มาประยุกต์ใช้ร่วมกันในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 Autodesk Revit

- *ประโยชน์ Autodesk Revit*

  ช่วยในเรื่องแบบจำลอง 3 มิติขององค์พระพุทธรูป ซึ่งสามารถทำให้ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายสำหรับการปรับปรุงบูรณะ อีกทั้งยังสามารถส่งต่อแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อให้ผู้ที่สนใจศึกษาได้เรียนรู้เชิงอนุรักษ์อีกด้วย

- *ประโยชน์ Agisoft Matashape*

  สามารถแสดงข้อมูลวัตถุเมฆ ในรูปแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อแสดงความเสียหาย เช่น รอยแตกร้าว การเสื่อมสภาพของวัสดุ หรือความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างชัดเจน

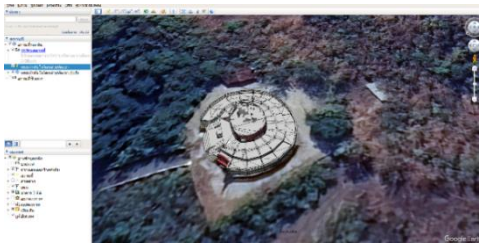
- *ประโยชน์ Autodesk Recap*

  ช่วยให้ได้ ข้อมูลที่แม่นยำ รวดเร็ว ลดข้อผิดพลาด และสามารถนำวัตถุเมฆ ที่ได้มาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่จะนำไปสู่การใช้ในด้านอนุรักษ์ ฟื้นฟู และศึกษาวิจัย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีนี้ช่วยลดผลกระทบต่อโบราณสถาน และยังสามารถผสานข้อมูลร่วมกับเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3.3.6 การนำเข้าแบบจำลอง 3 มิติในซอฟต์แวร์

Google Earth Pro

การนำแบบจำลอง 3 มิติจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit เข้าไปยังซอฟต์แวร์ Google Earth Pro โดยการเลือกสถานที่ตั้ง ดูค่าพิกัดค่า Google Earth Pro จากนั้นให้ทำการ ส่งออกไปยัง Autodesk Navisworks แล้วทำการตั้งค่าพิกัด และ ส่งออกไปยัง Autodesk Navisworks และส่งไปยัง Google Earth Pro เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นปรากฏใน Google Earth Pro ดังรูปที่ 20



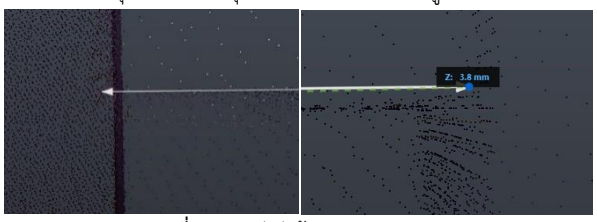
รูปที่ 20 Google Earth Pro

4. ผลการวิจัย

จากการศึกษาเก็บข้อมูลด้วยวิธีข้างต้นและการจำลองแบบโบราณสถาน ผลลัพธ์การศึกษาที่ได้ดังต่อไปนี้

จากการรวบรวมข้อมูลด้วยการรวบรวมข้อมูลเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับและเทปวัดสนามจำนวน 30 จุด ดังตางรางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งมีวิธีการวัดระยะ ดังต่อไปนี้

- การรังวัดระยะ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Recap ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 21



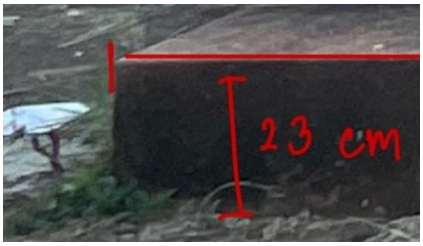
รูปที่ 21 การรังวัดด้วย Autodesk Recap

- การรังวัดระยะ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Matashape ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 20



รูปที่ 22 การรังวัดด้วย Agisoft Matashape

- การรังวัดระยะ โดยการใช้เทปวัดสนาม ที่วัดจากจุดนึ่งไปยังอีกจุดนึ่ง เพื่อให้ได้ระยะ ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 การรังวัดด้วย เทปวัดสนาม

ตารางที่ 1 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในแนวราบ

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	อากาศยานไร้คนขับ		
P1	0.23	0.224	0.006	2.609
P2	0.20	0.1972	0.003	1.400
P3	0.20	0.1970	0.003	1.500
P4	0.18	0.195	-0.015	-8.333
P5	0.19	0.190	0.000	0.000
P6	0.17	0.17	0.000	0.000
P7	5.30	5.300	0.000	0.000
P8	0.29	0.29	0.000	0.000
P9	0.29	0.2962	-0.006	-2.138
P10	0.29	0.2874	0.003	0.897
P11	0.30	0.2984	0.002	0.533
P12	0.30	0.3094	-0.009	-3.133
P13	1.00	1.003	-0.003	-0.300
P14	0.17	0.167	0.003	1.765
P15	0.18	0.182	-0.002	-1.111
P16	0.18	0.171	0.009	5.000
P17	0.18	0.183	-0.003	-1.667
P18	0.18	0.184	-0.004	-2.222
P19	0.20	0.198	0.002	1.000
P20	2.67	2.669	0.001	0.037
P21	0.21	0.206	0.004	1.905
P22	0.20	0.214	-0.014	-7.000
P23	0.20	0.198	0.002	1.000
P24	0.18	0.187	-0.007	-3.889
P25	0.18	0.177	0.003	1.667
P26	0.21	0.203	0.007	3.333
P27	1.47	1.46	0.010	0.680
P28	1.97	1.963	0.007	0.355
P29	0.26	0.2588	0.001	0.462
P30	0.26	0.259	0.001	0.385
Total	17.84	17.837	0.003	0.015
Average	0.5947	0.5946	0.0001	0.0005
Root Mean Squared Error			0.00047	0.00266

ตารางที่ 1 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในแนวดิ่ง

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ		
P1	13.90	13.29	0.610	4.388
P2	9.00	9.63	-0.630	-7.000
Total	22.90	22.920	-0.020	-2.612
Average	11.4500	11.4600	-0.0100	-1.3058
Root Mean Squared Error			0.01414	0.12351

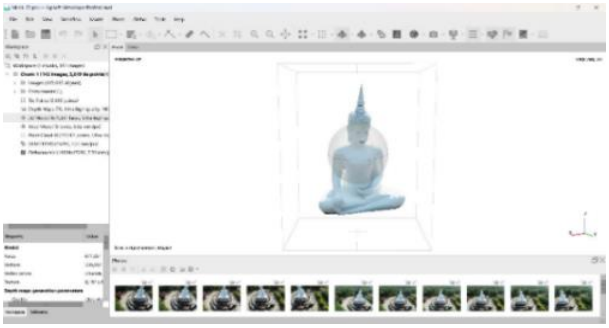
ตารางที่ 2 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS) ในแนวดิ่ง

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	อากาศยานไร้คนขับ		
P1	13.90	13.30	0.600	4.317
P2	9.00	9.25	-0.250	-2.778
Total	22.90	22.55	0.350	1.539
Average	11.4500	11.2750	0.1750	0.769
Root Mean Squared Error			0.24749	2.16146

ตารางที่ 2 การนำมาเปรียบเทียบระยะอ้างอิงที่วัดได้จริงกับระยะที่วัดได้จากเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ (TLS) ในแนวราบ

ระยะ	วัดด้วยวิธี (m.)		ความคลาดเคลื่อน	% ความคลาดเคลื่อน
	เทปวัดสนาม	เครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ		
P1	0.23	0.228	0.002	0.870
P2	0.20	0.197	0.003	1.500
P3	0.20	0.20	0.000	0.000
P4	0.18	0.191	-0.011	-6.111
P5	0.19	0.193	-0.003	-1.579
P6	0.17	0.185	-0.015	-8.824
P7	5.30	5.31	-0.010	-0.189
P8	0.29	0.287	0.003	1.034
P9	0.29	0.297	-0.007	-2.414
P10	0.29	0.287	0.003	1.034
P11	0.30	0.298	0.002	0.667
P12	0.30	0.3	0.000	0.000
P13	1.00	0.997	0.003	0.300
P14	0.17	0.168	0.002	1.176
P15	0.18	0.181	-0.001	-0.556
P16	0.18	0.178	0.002	1.111
P17	0.18	0.181	-0.001	-0.556
P18	0.18	0.18	0.000	0.000
P19	0.20	0.205	-0.005	-2.500
P20	2.67	2.64	0.030	1.124
P21	0.21	0.213	-0.003	-1.429
P22	0.20	0.199	0.001	0.500
P23	0.20	0.202	-0.002	-1.000
P24	0.18	0.18	0.000	0.000
P25	0.18	0.173	0.007	3.889
P26	0.21	0.206	0.004	1.905
P27	1.47	1.44	0.030	2.041
P28	1.97	2.000	-0.030	-1.523
P29	0.26	0.259	0.001	0.385
P30	0.26	0.261	-0.001	-0.385
Total	17.84	17.836	0.004	0.022
Average	0.5947	0.5945	0.0001	0.001
Root Mean Squared Error			0.00073	0.00409

การรวบรวมข้อมูลพื้นที่ของแบบจำลององค์พระพุทธรูปผลการประมวลที่ได้จากซอฟต์แวร์ Agisoft Matashape ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีพื้นที่ 671,851 ตารางเมตร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 22 Agisoft Matashape

5. วิเคราะห์ผลงานวิจัย

5.1 เทปวัดสนาม

การรังวัดจากการใช้เทปวัดสนามสามารถใช้เป็นระยะอ้างอิงที่ได้จริงและมีความแม่นยำในพื้นที่สูง ซึ่งข้อจำกัดของการใช้เทปวัดสนาม คือ เมื่อมีพื้นที่มีมากเกินไปอาจจะส่งผลทำให้การวัดระยะไม่ทั่วถึงข้อมูลที่ได้อาจจะได้รับไม่ครบถ้วน

5.2 เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ (TLS)

สามารถวัดระยะได้จากแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงผ่าน วัตถุเมฆ ซึ่งข้อจำกัดของเครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ คือ การรวบรวมข้อมูลในแนวดิ่ง อาจเก็บข้อมูลได้ไม่ครบถ้วน ถ้าหากสภาพพื้นที่มีแสงสว่างมากเกินความจำเป็น หรือแสงสว่างเข้าไม่ถึงจึงส่งผลทำให้เกิดเงา ข้อมูลที่ได้รับจะไม่แสดงถึง วัตถุเมฆ ณ บริเวณนั้น ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ควรได้รับขาดหาย หรือเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ราบ และสภาพอากาศที่เหมาะสม

5.3 อากาศยานไร้คนขับ (UAV)

เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งมุมกว้างและมุมสูง ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและมีความสะดวกสบายในการทำงานมาก แต่อากาศยานไร้คนขับยังมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูล คือ การเก็บข้อมูลจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับสัญญาณอินเตอร์เน็ตจนกว่าทำการเก็บข้อมูลสำเร็จ ไม่ควรขึ้นบินในขณะที่แบตเตอรี่ต่ำให้ทำการชาร์จให้เต็มก่อนทำการขึ้นบิน ควรหลีกเลี่ยงการบิน

ใกล้กับบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง และไม่ควรขึ้นบินในสภาพอากาศที่มีลมแรงหรือฝนตก

สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาวิเคราะห์การเปรียบเทียบวิธีการรวบรวมข้อมูล เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองซึ่งเปรียบเทียบการรวบรวมข้อมูลโดยการใช้เครื่องมือ 2 ชนิด คือ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ และอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้เครื่องมือเทปวัดสนามเป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิงเพื่อนำ 2 เครื่องมือข้างต้นมาเปรียบเทียบ โดยลักษณะแนวดิ่งและแนวราบ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติทั้งแนวดิ่งและแนวราบมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้อากาศยานไร้คนขับ ทั้งนี้สามารถดูได้จาก เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน (%RMSE) ค่าที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ในแนวราบมีค่าเท่ากับ 0.12281 แนวดิ่งมีค่าเท่ากับ 2.16146 และเครื่องเก็บข้อมูล 3 มิติ ในแนวราบมีความเท่ากับ 0.07983 แนวดิ่งมีค่าเท่ากับ 0.12351 ซึ่ง % RMSE มีค่ายิ่งต่ำเทียบเท่าใกล้เคียงเท่ากับ 0 แปลว่าโมเดลที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง

จึงสรุปได้ว่า เครื่องมือสำรวจที่มีความแม่นยำมากที่สุด ได้แก่ เครื่องสแกนข้อมูล 3 มิติ อากาศยานไร้คนขับ ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองจึงทำให้ทราบถึงพื้นที่ของส่วนที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองที่ได้มานำเสนอในรูปแบบ 3 มิติผ่านทาง Google Eart Pro เพื่อเป็นการอนุรักษ์ในเชิงการท่องเที่ยว

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อ.ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง ในการให้คำปรึกษาการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนได้ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อันเป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่เริ่มดำเนินการจนกระทั่งดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณผู้ใหญ่บ้าน นายทองคำ ศรีแพงมูล หมู่ที่ 3 บ้านหล่ายพัฒนา ที่ได้ช่วยประสานงานกับทางวัด ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ดีสำหรับกรณีการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้

อ้างอิง

[1] Mohammed Bouziani et, All (2021), “Evalution of 3D Building Model Using Terrestial Laser Scanning and Drone Photogrammetry, The International Archives of the Photogrammetry”, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-4/W4-2021 16th 3D GeoInfo Conference 2021, 11–14 October 2021, New York City, USA

[2] Marta Tarnowska, All (2023), “Combination of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry for 3D modelling and degradation assessment of heritage building based on a lighting analysis: case study—St. Adalbert Church in Gdansk, Poland”, Tysiac et al. Heritage Science, Received: 7 november 2022, Accepted: 1 March 2023, Published online: 15 March 2023

[3] Przemysław Klapa and Pelagia Gawronek, “Synergy of Geospatial Data from TLS and UAV for Heritage Building Information Modeling (HBIM)”, Remote Sens. 2023, 15, 128 Received: 16 November 2022 Accepted: 24 December 2022 Published online: 26 December 2022

[4] บทความ โดย นิสิตภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อินทาเนีย ฉบับที่ 4 ปี พ.ศ. 2563, “การใช้งานเครื่องมือเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (TLS) กับงานด้านการเกษตร”, ปีที่ 29 ฉบับที่ 4 ตุลาคม – ธันวาคม 2567

[5] Yahya Alshawabkeh, Ahmad Baik, Yehia Miky, “Integration of Laser Scanner and Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement”, ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 316, Received: 21 March 2021 Accepted: 2 May 2021 Published online: 8 May 2021

[6] Patricio Martínez-Carricondo, Fernando Carvajal-Ramírez, Lourdes Yero-Paneque and Francisco Agüera-Vega, “Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain)”, Martínez Carricondo et al. Herit Sci, Received: 10 June 2021, Accepted: 2 August 2021, Published online: 10 August 202

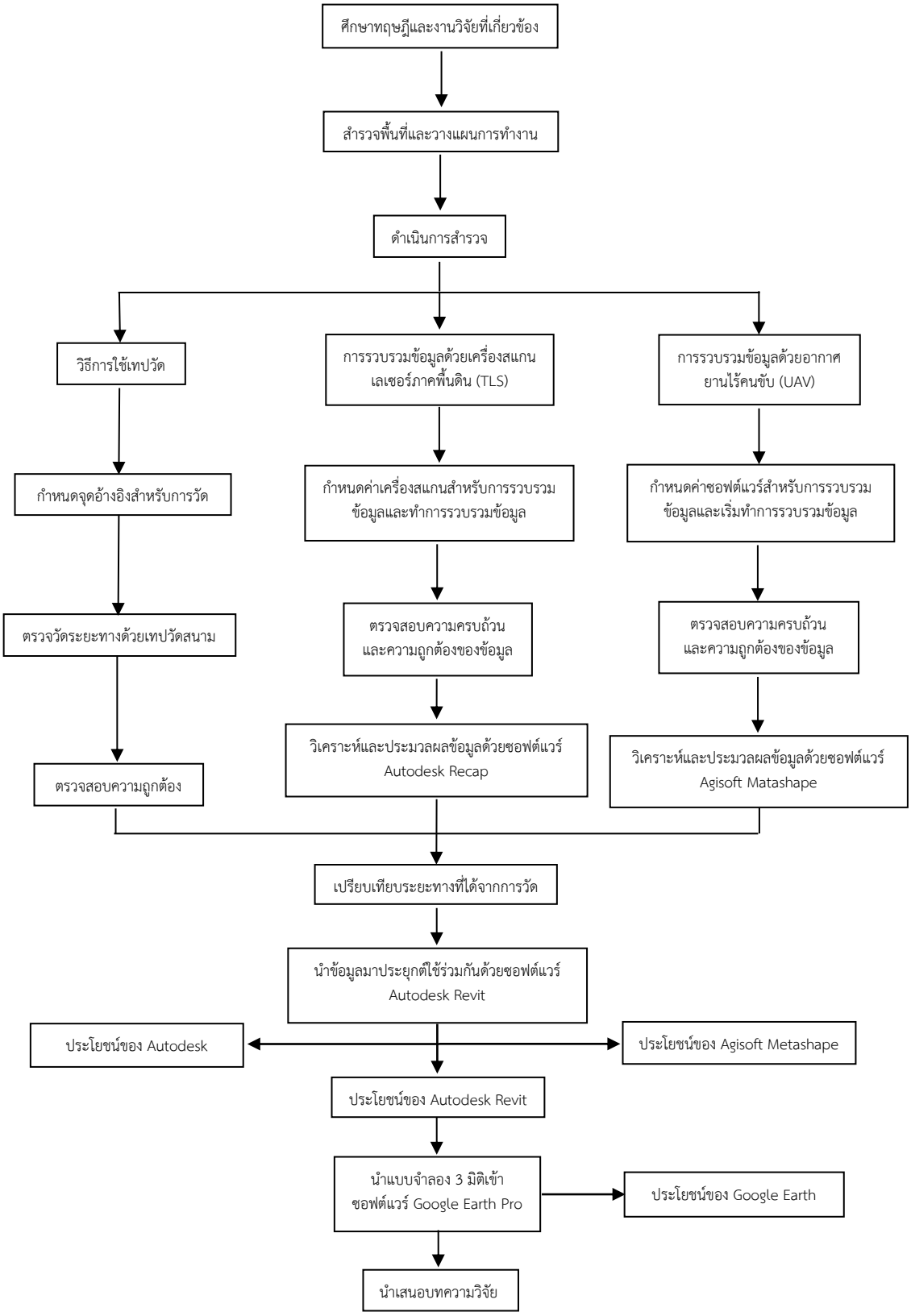
[7] Yahya Alshawabkeh and Ahmad Baik, “Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site”, Alshawabkeh and Baik Heritage Science, Received: 10 April 2023, Accepted: 10 July 2023, Published online: 19 July 2023

[8] Maria Alessandra Tini, Anna Forte Domenico Simone Roggio, Valentina Alena Girelli, Gabriele Bitelli, Alessandro Lambertini and LucaVittuari, “Scan-to-HBIM-to-VR: An Integrated Approach for the Documentation of an Industrial Archaeology Building”, Remote Sens. 2024, 16, 2859, Received: 5 June 2024, Recevied: 31 July 2024, Accepted: 2 August 2024, Published online: 5 August 2024

[9] Facundo José López, Pedro M. Lerones, José Llamas and Eduardo Zalama, “A ReviewofHeritage Building Information Modeling (H-BIM)”, Multimodal Technologies and Interact. 2018, 2, 21, Received: 28 March 2018, Accepted: 3 May 2018, Published online: 5 May 2018

ภาคผนวก

วิธีการดำเนินงานวิจัย



การศึกษาความเป็นไปได้เมืองสูงวัยสู่เมืองวัฒนธรรมโลก

International Silver Age Heaven Estate to World Culture City (ISHEtoWCC)

ปุญญพัฒน์ จงเจริญ[1] วัชรพล ศรีณรงค์[2] ณภัทร อุปะละ[3] และ อรยา อภิวงค์[4]

[1,2,3,4] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64103958@up.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (International Silver Age Heaven Estate: ISHE) เป็นโครงการที่มุ่งพัฒนาที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ซึ่งมีศักยภาพด้านทำเลที่ตั้งและค่าครองชีพที่ต่ำ โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเมืองที่รองรับผู้สูงอายุจากนานาประเทศ พร้อมสิ่งอำนวยความสะดวกครบครันและบริการทางการแพทย์ที่ได้มาตรฐาน การศึกษานี้วิเคราะห์อุปสงค์และอุปทานของตลาดผู้สูงอายุชาวต่างชาติ ศักยภาพทางเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อ GDP ของประเทศ รวมถึงการวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าการลงทุน

จากการศึกษาพบว่าโครงการมีศักยภาพที่จะเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการพำนักระยะยาว โดยการวิเคราะห์ทางการเงินแสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน โดยเฉพาะเมื่ออัตราการเข้าพักอยู่ที่ 75% และ 100% ซึ่งจะสร้างรายได้ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปีจากการใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือนของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (ISHE) เป็นโครงการที่ออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการที่อยู่อาศัยระยะยาวสำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตหลังเกษียณในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ซึ่งมีสภาพแวดล้อมและวัฒนธรรมที่เหมาะสม โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ และส่งเสริมให้ไทยเป็นจุดหมายปลายทางสำหรับผู้สูงอายุที่ต้องการใช้ชีวิตในต่างแดน

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ทางการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ โดยมีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับอัตราการเข้าพักที่ 50%, 75%, และ 100% และคำนวณผลตอบแทนทางการเงินผ่านเครื่องมือต่างๆ เช่น Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), และ Benefit-Cost Ratio (BCR) การวิเคราะห์ทางการเงินใช้ข้อมูลจากไฟล์เอกเซลที่ประกอบด้วยสมมติฐานเกี่ยวกับรายได้และค่าใช้จ่ายของโครงการ รวมถึงการคำนวณกระแสเงินสดสำหรับระยะเวลา 20 ปี

จากการวิเคราะห์ทางการเงินพบว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่ออัตราการเข้าพักอยู่ที่ 75% และ 100% โดยมีค่า NPV เป็นบวก และค่า BCR มากกว่า 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงการสามารถสร้างผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับต้นทุนการลงทุน นอกจากนี้ โครงการยังมีศักยภาพในการสร้างรายได้และกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านการใช้จ่ายของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

คำสำคัญ: เมืองสูงวัยนานาชาติ, ที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุ, การลงทุน, การท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ

Abstract

The "International Silver Age Heaven Estate" (ISHE) project is aimed at developing residential areas for foreign elderly individuals in Thailand, particularly in Phayao Province, which has potential in terms of location and low living costs. This project aims to establish a city that accommodates elderly individuals from various countries, offering comprehensive amenities and standardized medical services. This study analyzes the demand and supply of the foreign elderly housing market, economic potential, and impact on the country's GDP, along with financial analysis to assess investment feasibility.

Findings indicate that the project has the potential to become a hub for health tourism and long-term residency for foreign retirees. Financial analysis shows that the project is cost-effective, particularly when the occupancy rates reach 75% and 100%, generating an estimated annual revenue of approximately 3.9 billion baht from an average monthly expenditure of 65,000 baht per foreign retiree.

The "International Silver Age Heaven Estate" (ISHE) project is designed to meet the long-term housing needs of foreign retirees seeking post-retirement life in Thailand, especially in Phayao Province, which offers a suitable environment and cultural setting. The primary objectives of this project include stimulating Thailand's economy through foreign retirees, creating a model city for an international aging society, and promoting Thailand as a preferred destination for elderly expatriates.

This study employs financial analysis to evaluate the project's investment feasibility, utilizing assumptions on occupancy rates of 50%, 75%, and 100%, and financial metrics such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Benefit-Cost Ratio (BCR). The financial analysis relies on an Excel file containing revenue and expenditure assumptions, along with cash flow calculations over a 20-year period.

The financial analysis results indicate that the project is financially viable when occupancy rates reach 75% and 100%, with a positive NPV and a BCR greater than 1, demonstrating that the project can yield substantial returns compared to the investment cost. Additionally, the project holds potential to generate revenue and boost Thailand's economy through the spending of foreign retirees.

Keywords: International Senior City, Elderly Housing, Investment, Health Tourism

1. บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ที่มาและความสำคัญ โครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (IsHE) เกิดขึ้นจากแนวคิดการพัฒนาเมืองสำหรับผู้สูงอายุระดับนานาชาติ โดยเน้นให้เป็นสถานที่พำนักระยะยาวสำหรับชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตวัยเกษียณในประเทศไทย ซึ่งมีค่าครองชีพต่ำ และมีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยเฉพาะใน จังหวัดพะเยา ซึ่งมีศักยภาพด้านสภาพแวดล้อมและวัฒนธรรมที่เหมาะสม

โครงการนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อ แนวโน้มประชากรโลกที่เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ซึ่งส่งผลให้เกิดความต้องการที่อยู่อาศัยที่รองรับผู้สูงอายุระยะยาว โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญดังนี้

กระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ เมืองไทยไม่ได้ต้องการเป็นเพียง "เมืองสูงวัยชาวไทย" เท่านั้น แต่ต้องการดึงดูดชาวต่างชาติที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจให้เข้ามาใช้ชีวิตหลังเกษียณ คาดการณ์ว่า 5,000 คน ที่พำนักในโครงการนี้จะสร้างรายได้ ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปี จากการใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือน สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ พัฒนาเมืองพิเศษที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกครบครัน เช่น ศูนย์สุขภาพ สวนสาธารณะ และพื้นที่ทำกิจกรรมสำหรับผู้สูงอายุ ออกแบบที่อยู่อาศัยตามสถาปัตยกรรมของแต่ละชนชาติ เช่น ชุมชนเกาหลี ชุมชนญี่ปุ่น และชุมชนยุโรป เพิ่มขีดความสามารถของไทยในการแข่งขันระดับโลก ประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ชะลอตัวและไม่สามารถแข่งขันกับประเทศเพื่อนบ้านได้ การสร้างเมืองสูงวัยนานาชาติจะช่วยเพิ่ม GDP และทำให้ไทยเป็นจุดหมายปลายทางสำหรับผู้สูงอายุที่ต้องการใช้ชีวิตในต่างแดน ส่งเสริมการพัฒนาชุมชนและวัฒนธรรมระดับโลก นอกจากการเป็นที่พักอาศัย โครงการนี้ยังเน้นการผสมผสานวัฒนธรรมระหว่างประเทศผ่านกิจกรรมทางสังคมและประเพณีของแต่ละชนชาติ สร้างสังคมที่เปิดกว้างและเอื้อต่อการใช้ชีวิตร่วมกันของชาวต่างชาติและคนไทย - การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์และพัฒนาโครงการ "เมืองสูงวัยนานาชาติ" (International Silver Age Heaven Estate: IsHE) ซึ่งเป็นแนวคิดในการสร้างที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุระดับนานาชาติ โดยเฉพาะในจังหวัดพะเยา ประเทศไทย โครงการนี้มุ่งเน้นให้เป็นสถานที่พำนักระยะยาวสำหรับชาวต่างชาติที่ต้องการใช้ชีวิตวัยเกษียณในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ค่าครองชีพต่ำ และมีบริการที่ครบวงจร รวมถึงการแพทย์ที่ได้มาตรฐาน การศึกษาครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์อุปสงค์และอุปทานของตลาดผู้สูงอายุชาวต่างชาติ ศักยภาพทางเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อ GDP ของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้านการเงินเพื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน พบว่าโครงการมีศักยภาพที่จะเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการอยู่อาศัยของผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่ต้องการพำนักระยะยาว วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือการกระตุ้นเศรษฐกิจไทยผ่านกลุ่มผู้สูงอายุชาวต่างชาติ สร้างเมืองต้นแบบสำหรับสังคมสูงวัยระดับนานาชาติ และเพิ่มขีดความสามารถของไทยในการแข่งขันระดับโลก โดยการพัฒนาเมืองพิเศษที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกครบครัน ออกแบบให้เหมาะกับแต่ละชนชาติ เช่น ชุมชนเกาหลี ชุมชนญี่ปุ่น และชุมชนยุโรปการศึกษานี้ยังใช้หลักทฤษฎีด้านวิศวกรรม การออกแบบเมือง และเศรษฐศาสตร์ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ต้นทุน การลงทุน อัตราผลตอบแทน และระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้มั่นใจว่าโครงการสามารถดำเนินการได้อย่างยั่งยืนและเป็นประโยชน์ต่อทั้งเศรษฐกิจไทยและกลุ่มเป้าหมาย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 กระตุ้นเศรษฐกิจและเพิ่มเม็ดเงินหมุนเวียนในประเทศ คาดการณ์ว่าจะมีเงินหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจ ประมาณ 3,900 ล้านบาทต่อปี จากค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 65,000 บาทต่อเดือนต่อคน

1.2.2 เพิ่มโอกาสการลงทุนและพัฒนาอุตสาหกรรมอสังหาริมทรัพย์ กระตุ้นตลาดอสังหาริมทรัพย์และการก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดการจ้างงานในภาคแรงงานและธุรกิจที่เกี่ยวข้อง

1.2.3 ยกระดับไทยเป็นศูนย์กลางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการเกษียณอายุ ทำให้ประเทศไทยเป็น **Retirement Destination** สำหรับชาวต่างชาติ

1.2.4 กระจายรายได้และพัฒนาเศรษฐกิจระดับภูมิภาค เพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับชุมชนท้องถิ่น เช่น การค้าปลีก บริการทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมอาหาร

1.2.5 ส่งเสริมวัฒนธรรมและการแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศ การตั้งถิ่นฐานของชุมชนต่างชาติในไทยช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนวัฒนธรรมและความร่วมมือระหว่างประเทศ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ตารางที่ 1. สมมติฐานของการวิจัย

ต้นทุนโครงการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคาสุทธิ (บาท) (เอกชน)	ราคาสุทธิ (บาท) (รัฐบาล)
ค่าก่อสร้างบ้าน	6,700ตร.ม.	15,000	100,500,000	100,500,000
ค่า Landscape	250ตร.ม.	400	100,000	100,000
ค่าเซอร์เวย์พื้นที่	-	-	10,000	10,000
ค่าซัพพลาย	-	-	10,000	10,000
ค่าพื้นที่อเนกประสงค์	100 ตร.ม.	2,000	200,000	200,000
ค่าที่จอดรถ+ถนน	6000 ตร.ม.	150	900,000	900,000
ค่าดินขุดดินถม	16000 ตร.ม.	80	1,280,000	1,280,000
ค่าออกแบบและควบคุม	-	-	3,090,000	3,090,000
รวม	-	-	106,090,000	106,090,000

ตารางที่ 1.สมมติฐานต้นทุนของโครงการ ที่อัตราการเข้าพัก 75%เปรียบเทียบระหว่างเอกชนลงทุนกับรัฐบาลลงทุน

	อัตราการเข้าพัก		
	50%	75%	100%
เอกชน	✓	✓	✓
รัฐบาล	✓	✓	✓

ตารางที่ 2. แบ่งออกเป็น 2 Case คือ เอกชนลงทุนและรัฐบาลลงทุน ตามลำดับ โดยแต่ละอัตราการกู้มีอัตราการเข้าพักที่ 50% 75% และ100%

การใช้อัตราการเข้าพักที่ 50%, 75% และ 100% ในการวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการ ไม่ได้เป็นตัวเลขตายตัว แต่เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) เพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการเข้าพักที่แตกต่างกันต่อผลตอบแทนของโครงการ โดยทั่วไปจะใช้ 50%, 75%, 100% เป็นมาตรฐาน

-ในธุรกิจโรงแรม รีสอร์ท และ อสังหาริมทรัพย์ระยะยาว นิยมใช้กันในการวิเคราะห์จะช่วยให้เห็นภาพชัดเจนของสถานการณ์ 3 ระดับ (แย่-ปกติ-ดีที่สุด) โดยไม่ต้องมีค่าหลายระดับจนทำให้การวิเคราะห์ซับซ้อนเกินไป การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านการลงทุนของโครงการ จะวิเคราะห์ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV , Net present value) โดยใช้สมมติฐาน อัตราผลตอบแทนที่คาดหวังอยู่ที่7.33% เนื่องจากอัตราการเข้าพักที่75%ของเอกชนเป็น(กรณีปกติ)ผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)=1.003 แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน ดังนั้นจึงใช้ผลตอบแทนที่คาดหวัง7.33% ในการคำนวนเปรียบเทียบระหว่างเอกชนลงทุนและรัฐบาลลงทุน ที่อัตราการเข้าพัก50%(กรณีแย่ที่สุด), 75%(กรณีปกติ) และ100%(กรณีดีที่สุด) และหากค่าอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน(IRR, Initial rate of return) มากกว่า7.33% แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าในลงทุน หลังจากการประเมินการลงทุนอสังหาริมทรัพย์ เมื่อผ่านขั้นตอนการคำนวณต่าง ๆ แล้วผลที่ได้รับจะเป็นความคุ้มค่าต่อการลงทุน และสามารถนำตัวอย่างไปดัดแปลง เพื่อใช้ในงานอสังหาริมทรัพย์ด้านอื่น ๆ ได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ด้านระยะเวลาในการศึกษา เริ่มต้นศึกษาหาข้อมูลเดือนพฤษภาคม 2567 - เดือนพฤษจิกายน 2567

1.4.2 สมมติฐานอัตราส่วนการเข้าพักคือ 50% 75% 100% ตามลำดับ

1.4.3 คิดผลประกอบการเป็นระยะเวลา 20 ปี

1.4.4 อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (MLR+3) คือ 7.5%

1.4.5 อัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง คือ 7.33%

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ตอบสนองความต้องการของผู้สูงอายุชาวต่างชาติ

1.5.2 เกิดเป็นแหล่งศึกษาวัฒนธรรมในแต่ละประเทศ

1.5.3 สามารถเข้าใจเรื่องของกฎหมายที่ต้องใช้เมื่อต้องการสร้างอาคาร บ้าน โรงแรม หรืออะไรก็ตามที่เกี่ยวข้องในงานด้านอสังหาริมทรัพย์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ทฤษฎีและแนวคิดในการพัฒนาโครงการ"การประเมิณความคุ้มค่าในการลงทุนบ้านพักผู้สูงอายุ "(International Silver Age Heaven Estate - IsHE) มีหลายทฤษฎีที่สามารถนำมาใช้เป็นกรอบแนวคิดสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์โครงการในเชิงวิศวกรรม การออกแบบเมือง และการพัฒนาเศรษฐกิจ โดยสามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่หลักได้ดังนี้

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิศวกรรมและการออกแบบเมือง

2.1.1ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Design Theory)

Principles of Sustainable Infrastructure (ISI): แนวทางการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความยั่งยืน และ ลดผลกระทบต่อธรรมชาติ

Universal Design Theory (Ron Mace, 1985): แนวคิด ออกแบบเมืองที่เหมาะสำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ เช่น พื้นที่เข้าถึงได้ ง่าย ทางเดินกว้าง ไม่มีสิ่งกีดขวาง

2.1.2 ทฤษฎีระบบพลังงานและสิ่งแวดล้อม (Energy & Environmental Engineering Theories)

Green Building Concept (LEED & BREEAM): ระบบมาตรฐานการออกแบบอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน

Smart City Framework (ISO 37122:2019): การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการบริหารจัดการเมือง เช่น ระบบ Smart Grid และ IoT สำหรับเมืองอัจฉริยะ

2.1.3 ทฤษฎีระบบขนส่งและโลจิสติกส์เมือง (Urban Transportation & Logistics Theory)

Transit-Oriented Development (TOD) (Calthorpe, 1993): แนวคิดพัฒนาเมืองรอบระบบขนส่งสาธารณะ เพื่อให้ผู้สูงอายุสามารถเดินทางได้สะดวก

Walkability Theory (Jeff Speck, 2012): แนวคิดการออกแบบเมืองให้เดินได้สะดวก มีระบบทางเท้าที่ปลอดภัยสำหรับผู้สูงอายุ

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์และการลงทุนโครงการ

2.2.1 ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์เมือง (Urban Economics Theories)

Growth Pole Theory (Perroux, 1950): แนวคิดการพัฒนาเมืองให้เป็นศูนย์กลางการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดย "เมืองสูงวัยนานาชาติ" จะเป็นศูนย์กลางที่ดึงดูดการลงทุนด้านสุขภาพและการท่องเที่ยว

Aging Economy Theory (Bloom et al., 2011): ทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของประชากรสูงวัยต่อเศรษฐกิจ และแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มนี้

2.2.2 ทฤษฎีการลงทุนและความเป็นไปได้ของโครงการ (Project Investment & Feasibility Theories)

Net Present Value (NPV) & Internal Rate of Return (IRR) (Ross et al., 2010): ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงินของโครงการ

Cost-Benefit Analysis (CBA) (Mishan & Quah, 2007): เครื่องมือสำหรับการประเมินความคุ้มค่าของโครงการในระยะยาว

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับประชากรศาสตร์และพฤติกรรมผู้สูงอายุ

2.3.1 ทฤษฎีประชากรศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากร (Demographic Transition Theory)

Population Aging Theory (UN, 2019): ทฤษฎีที่อธิบายถึงแนวโน้ม

การเพิ่มขึ้นของประชากรสูงอายุทั่วโลก และผลกระทบต่อโครงสร้างเศรษฐกิจและสังคม

2.3.2 ทฤษฎีคุณภาพชีวิตผู้สูงอายุ (Quality of Life & Aging Theories)

ประชากร (Demographic Transition Theory)

Active Aging Framework (WHO, 2002): แนวคิดที่สนับสนุนให้ผู้สูงอายุมีคุณภาพชีวิตที่ดี มีส่วนร่วมในกิจกรรมทางสังคม และเข้าถึงบริการสุขภาพ

Triple Constraint Model (PMBOK Guide, PMI): แนวคิดเกี่ยวกับข้อจำกัดของโครงการในด้านงบประมาณ เวลา และขอบเขตงาน

2.4 เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เศรษฐศาสตร์ หมายถึง การศึกษาถึงวิธีการนำเอาทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้อย่างประหยัด หรือยังมีประสิทธิภาพเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม หมายถึง การนำเอาเศรษฐศาสตร์ประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรม เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ กับงานด้านวิศวกรรมอย่างประหยัด หรือใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.1 การวิเคราะห์การตัดสินใจในโครงการต่างๆด้วยเศรษฐศาสตร์

การศึกษาว่าโครงการได้น่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจำเป็นต้องทราบขั้นตอนการวิเคราะห์รูปแบบของปัญหาค้าที่เป็นเครื่องวัดในการตัดสินใจ และแหล่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้ 7 ข้อดังนี้

2.4.1.1 กำหนดรูปแบบของปัญหา โดยจะต้องศึกษาข้อมูลขั้นต้นก่อนว่าอะไรเป็นสิ่งที่กำหนดให้เป็นปัญหา อะไรเป็นผลลัพธ์ และอะไรเป็นสิ่งที่ต้องตัดสินใจ เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการเข้าใจตรงกัน

2.4.1.2 สร้างบรรทัดฐานในการประมาณค่าที่ใช้วัด การวิเคราะห์ทางเลือกหลาย ๆ ทาง นั้นจะต้องสร้างเกณฑ์ในการวัด เช่น จะใช้ค่าใช้จ่าย กำไร และความสูญเสียเป็นเกณฑ์ในการวัดเป็นต้น

2.4.1.3 สร้างทางเลือกหลาย ๆ ทางเลือก และไม่ควรด่วนสรุปก่อนที่จะมีการตัดสินใจอย่างรัดกุม

2.2.1.4 ทำการประเมินผลลัพธ์ของแต่ละทางเลือก โดยประเมินเป็นค่าใช้จ่าย ผลกำไรที่ได้รายได้อรรถประโยชน์ (Utility) เป็นต้น แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเศรษฐศาสตร์

2.4.1.5 เลือกทางเลือกที่ชอบมากกว่าทั้งเรื่องอื่น ถ้าในกรณีที่ได้ผลลัพธ์ของ 2 โครงการ เท่ากันก็ต้องทำ ข้อที่ 2.2.1.7 ต่อไป

2.4.1.6 การวิเคราะห์ความไวเพื่อดูผลกระทบของโครงการว่าเป็นอย่างไร ถ้าค่าที่ประมาณไว้เปลี่ยนแปลงไป เช่น อัตราดอกเบี้ย รายได้เป็นแปลง เป็นต้น

2.4.1.7 ตัดสินใจลงทุน โดยมีการแสดงเหตุผลสนับสนุนการลงทุนด้วย

2.4.2 รูปแบบของปัญหาที่ใช้ตัดสินใจมี 2 แบบ แต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

2.4.2.1 การตัดสินใจภายใต้ความแน่นอน (Certainty) เป็นรูปแบบของปัญหาที่เกิดขึ้นได้แน่นอนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ถือว่าสมบูรณ์ แน่นอน ความคลาดเคลื่อนจากค่าต่าง ๆ ที่ประมาณไว้ถือว่าน้อยมาก และ ไม่มีความเสี่ยงเกิดขึ้นดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาแบบนี้จึงตรงไปตรงมา

2.4.2.2 การตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอน (Uncertainty) รูปแบบของปัญหามีข้อมูลไม่ครบต่อการวิเคราะห์ หรือไม่สามารถกำหนดค่าความน่าจะเป็นได้ บางครั้งไม่ทราบว่าจะเกิดเหตุการณ์ใดบ้าง การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า 2 แบบแรก

2.4.3 แหล่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

2.4.3.1 ข้อมูลฝ่ายการตลาดเพื่อพยากรณ์ปริมาณการขายและกำหนดเป็นรายได้ต่อเดือน หรือต่อปี เป็นต้น

2.4.3.2 ข้อมูลจากฝ่ายวิศวกรรม เป็นการศึกษาด้านการผลิตเชลล์ข้างต้น ความสามารถในการผลิต เครื่องมือเครื่องใช้ในการผลิต วัตถุดิบในการผลิต เป็นต้น ในบางครั้งต้องทำโครงการนำร่อง (Pilot project) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านวิศวกรรมก่อน นอกจากนี้ยังต้องศึกษาด้านสาธารณูปโภค การขจัดของเสียที่เกิดขึ้นเป็นต้น

2.4.3.4 ข้อมูลด้านการเงิน ได้แก่ แหล่งลงทุน ต้นทุนการผลิต อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ค่าภาษี เป็นต้น

2.4.3.5 ข้อมูลจากฝ่ายบริหารโดยกำหนดอัตราผลตอบแทนที่สนใจต่ำสุด ข้อมูลจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นต้น

การวิเคราะห์และการตัดสินใจลงทุน

รูปแบบการวิเคราะห์ด้านการเงินมี 2 วิธี

วิธีที่ 1 : วิธีวัดมูลค่าการลงทุนแบบดั้งเดิม (Traditional measures of investment worth)

(1) Payback period (ระยะเวลาคืนทุน)

(2) Rate of return (อัตราผลตอบแทน) or IRR (Interest rate of return)

วิธีที่ 2 : วิธีวัดมูลค่าการลงทุนในรูปแบบค่าเงินปัจจุบัน

(1) NPV (PV), FV

(2) BCR

การคำนวณแบบดั้งเดิม

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับในแต่ละปี}}$$

(สมการที่ 1)

$$\text{อัตราผลการตอบแทนทางบัญชี} = \frac{\text{กำไรสุทธิหลังหักค่าเสื่อมราคาเฉลี่ยรายปี}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับในแต่ละปี}}$$

(สมการที่ 2)

ต้นทุนเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted averrage cost capital, WACC)

WACC = WeKe + WdKd (1-Tax)

เมื่อ We = สัดส่วนเงินลงทุนจากผู้ประกอบการ
Ke = ต้นทุนเงินทุนของผู้ประกอบการ
Wd = สัดส่วนเงินลงทุนจากการกู้ยืม
Kd = ต้นทุนเงินทุนจากการกู้ยืมเงิน
Tax = อัตราภาษีเงินได้นิติบุคคล

การคำนวณหามูลค่าปัจจุบัน (NPV) โครงการโรงแรม

$$\text{NPV} = \frac{B_1 - C_1}{1+\text{WACC}^1} + \frac{B_2 - C_2}{1+\text{WACC}^2} + \ldots\ldots + \frac{B_n - C_n}{1+\text{WACC}^n}$$

(สมการที่ 3)

NPV = (+) แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน
NPV = 0 แสดงว่าโครงการยังมีความน่าสนใจจะลงทุน
NPV = (-) แสดงว่าโครงการอาจไม่มีความน่าสนใจจะลงทุน

โดย NPV = มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิที่เพิ่มขึ้นตลอดอายุโครงการ
B_t = มูลค่าของผลได้ที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t
C_t = มูลค่าของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t
r = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
t = ปีของโครงการ คือ ปีที่ 1, 2, 3,..., n
n = อายุของโครงการ

การคำนวณหาผลตอบแทนภายใน (IRR) โครงการโรงแรม

$$IRR = \frac{B_1-C_1}{(1+r)^1} + \frac{B_2-C_2}{(1+r)^2} + ... + \frac{B_n-C_n}{(1+r)^n}$$

(สมการที่ 4)

โดย IRR = อัตราผลตอบแทนภายในการลงทุน

B_t = มูลค่าของผลได้ที่เพิ่มขึ้นในปี ที่ t

C_t = มูลค่าของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในปีที่ t

r = อัตราดอกเบี้ย

t = ปีของโครงการคือปีที่ 1, 2, 3,..., n

n = อายุของโครงการ

การคำนวณหาอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) โครงการ

$$BCR = \frac{\frac{B_1}{1+W\ \ 1}}{\frac{C_1}{1+WACC^1}} + \frac{\frac{B_2}{1+WACC^2}}{\frac{C_2}{1+W\ \ 2}} + ... + \frac{\frac{B_n}{1+WAC\ \ n}}{\frac{C_n}{1+WAC\ \ n}}$$

(สมการที่ 5)

BCR = +1 แสดงว่าโครงการมีความน่าสนใจจะลงทุน

BCR = 1 แสดงว่าโครงการยังมีความน่าสนใจจะลงทุน

BCR = -1 แสดงว่าโครงการไม่มีความน่าสนใจจะลงทุน

โดย B_t = รายได้/ผลประโยชน์จากโครงการในปีที่ t

C_t = ค่าใช้จ่ายหรือเงินลงทุนของโครงการในปีที่ t

r = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม

N = อายุโครงการ (Project life)

t = ปีของโครงการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

(NPV กับ B/C สอดรับกันถ้าเป็น NPV = 0 แล้ว B/C จะมีค่าเท่ากับ 1)

$$\text{ราคาหุ้นตลาด} = \frac{\text{มูลค่าโครงการ}}{\text{จำนวนหุ้น}}$$

(สมการที่ 6)

โดยที่ มูลค่าโครงการ = เงินลงทุน (ทุนจดทะเบียน) + NPV

1) หาโดยกำหนดราคาหุ้นจดทะเบียน (PAR)

จำนวนหุ้น = เงินลงทุน (ทุนจดทะเบียน) / ราคา PAR

2) โดยกำหนดจำนวนหุ้นไว้แน่นอน

ราคาหุ้น(จดทะเบียน)= เงินลงทุน(ทุนจดทะเบียน) / จำนวนหุ้น

ส่วนล้ำมูลค่าหุ้น = ราคาหุ้น(ตลาด) – ราคาหุ้น (จดทะเบียน)

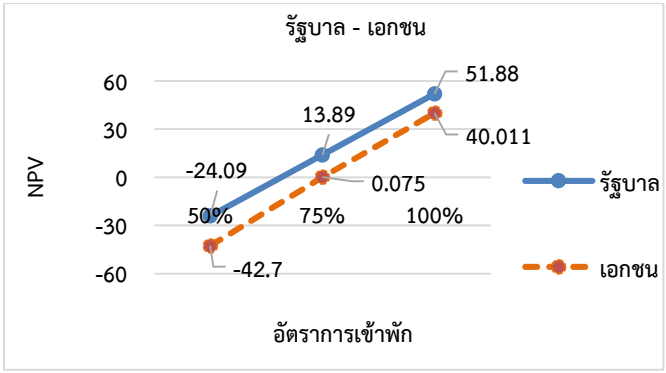
3. การคำนวณงานวิจัย

สมมติฐานของการวิจัย ค่าเช่าบ้านพัก 99 ห้อง , ค่าเช่าบ้านพัก 15,000 บาท/หลัง/เดือน, ราคาที่ดินโครงการ 240,000 บาท/ปี (หากเอกชนเป็นคนลงทุน), ค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 103,000,000 บาท, โฆษณา 0%, ค่าใบขออนุญาต และค่าใช้จ่ายพิเศษ 0%, ออกแบบ และคุมงาน 3%

ตารางที่ 1. สรุปผลตอบแทนที่คาดหวัง (NPV)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล(ล้านบาท)	เอกชน(ล้านบาท)
50%	-24.098	-42.705
75%	13.893	0.075
100%	51.885	40.011

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

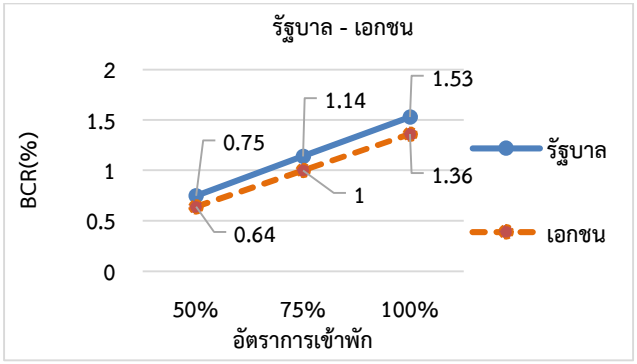


รูปที่ 1. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนที่คาดหวัง (NPV) ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 2. สรุปผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	0.76	0.64
75%	1.15	1.003
100%	1.53	1.366

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

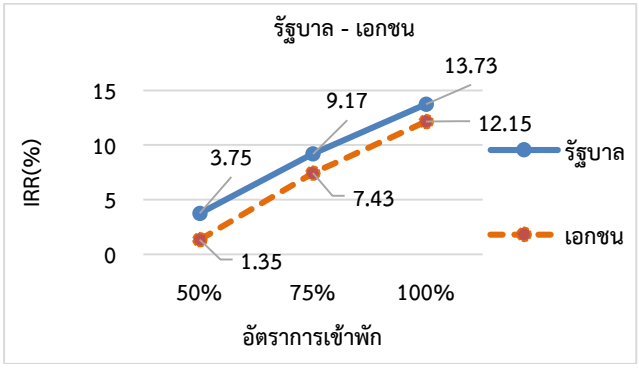


รูปที่ 2. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)
การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 3. สรุปผลตอบแทนภายใน (IRR)

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	3.75	1.35
75%	9.18	7.43
100%	13.74	12.15

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]

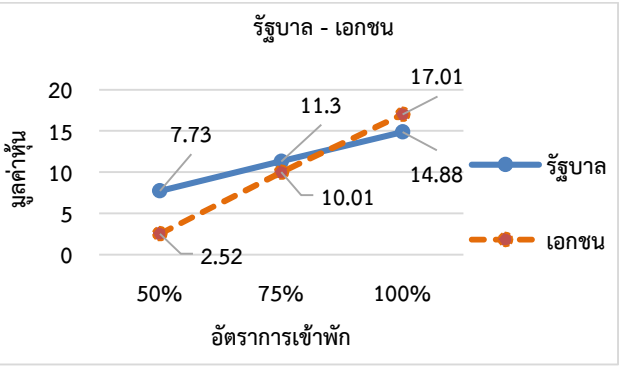


รูปที่ 3. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนภายใน (IRR)
อัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 4. สรุปมูลค่าหุ้น

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	7.73	2.52
75%	11.31	10.01
100%	14.89	17.01

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240เดือน)]

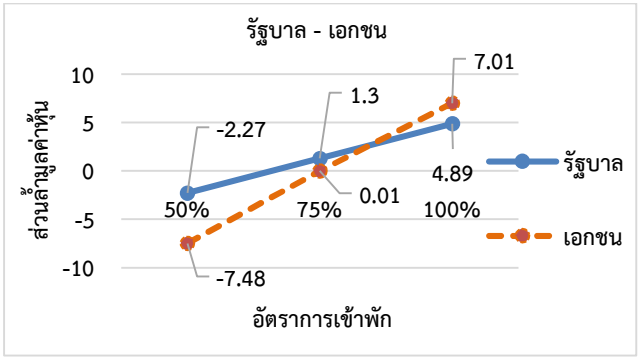


รูปที่ 4. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนมูลค่าหุ้น
ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางที่ 5. สรุปส่วนล้ำมูลค่าหุ้น

อัตราการเข้าพัก	รัฐบาล	เอกชน
50%	-2.27	-7.48
75%	1.31	0.01
100%	4.89	7.01

กรณีเฉพาะ เอกชน [ดอกเบี้ยจ่าย MLR 7.5% , รวมเงินกู้โครงการทั้งหมด 51.5 ล้านบาท (กู้ที่ 50 % ของค่าก่อสร้าง และตกแต่ง 106.09 ล้านบาท) เงินลงทุนโครงการ 57,101,250 บาท , ระยะเวลาในการคิด CF = 20 ปี (240 เดือน)]



รูปที่ 5. กราฟเปรียบเทียบผลตอบแทนส่วนล้ำมูลค่าหุ้น ที่การอัตราการเข้าพัก 50% , 75% , 100%

ตารางสรุปผลจาก MARR = 7.33%

รายการ		กรณีแย่ที่สุด	กรณีปกติ	กรณีดีที่สุด
อัตราการเข้าพัก		50%	75%	100%
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	รัฐบาล	-24,098,068	13,893,548	51,885,164
	เอกชน	-42,705,601	75,621	40,011,754
ระยะเวลาคืนทุน	รัฐบาล	ไม่คืนทุน	12ปี7เดือน	10ปี3เดือน
	เอกชน	ไม่คืนทุน	15ปี8เดือน	12ปี
สรุปผล	รัฐบาล	ไม่คุ้มต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน
	เอกชน	ไม่คุ้มต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน	คุ้มค่าต่อการลงทุน

สรุป จากตารางที่ 1 ,2 ,3 ที่อัตราการกู้ที่ 50% 75% และ100% ที่อัตราการเข้าพัก 50% พบว่า ค่า NPV ติดลบ ค่า BCR น้อยกว่า 1 และค่า IRR มีค่าน้อยกว่าอัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง (15%) จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ที่อัตราการเข้าพัก 75% และ100% พบว่า ค่า NPV เป็นบวก ค่า BCR มากกว่า 1 และค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่คาดหวัง (15%) จึงคุ้มค่าต่อการลงทุน

4.สรุปความเป็นไปได้ของโครงการ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในด้านต่างๆของโครงการ โดยโครงการศึกษามีลักษณะ เป็นรูปแบบ Retirement Housing สำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติที่มีกลุ่มเป็นหมายหลักเป็นผู้สูงอายุ ชาวต่างชาติแบบพำนักระยะยาว (Long-stay) โดยจากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน และการลงทุนพบว่า โครงการศึกษานั้นมีความน่าสนใจในการลงทุนเนื่องจากมีอัตราผลตอบแทนที่น่า พอใจเมื่อเทียบกับมูลค่าของต้นทุนรวมถึงโครงการศึกษามี มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่มากกว่า 0 และยังมีผลตอบแทนที่สามารถสร้างกำไรได้ในอนาคต โดยที่ผู้ที่จะลงทุนในรูปแบบของโครงการศึกษานั้นควร มีความเชี่ยวชาญและบริหารจัดการโครงการอย่างรอบครอบและรัดกุม รวมถึงการ กำหนดราคาขายและต้นทุนการประกอบกิจการให้เหมาะสม เพื่อให้โครงการนั้นประสบความสำเร็จอย่างราบรื่น มั่นคง และยั่งยืน

5. ข้อเสนอแนะ

- การหาทำเลที่ตั้งมีผลต่ออัตราการเข้าพัก ผู้ลงทุนควรศึกษาเกี่ยวกับการหาทำเลที่ตั้งก่อนที่จะทำการก่อสร้าง
- ถ้ามีอัตราการเข้าพักต่ำกว่า 50% คือทำเลที่ทำให้โรงแรมนั้นไม่มีความน่าสนใจในการลงทุน

6.เอกสารอ้างอิง

เกษมศรี ปูชนียวงศ์. (2558). การตระหนักรู้และพฤติกรรมการออมเพื่อเตรียมตัวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ของกลุ่มบุคคลช่วงอายุระหว่าง 25 – 35 ปี.(ปริญญานิพนธ์เศรษฐศาสตร์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ฉัตรชัย วีระเมธีกุล. (2560). แนวทางการพัฒนาที่อยู่อาศัย สำหรับผู้สูงอายุในอนาคต ศึกษาเฉพาะ กรณีที่อยู่อาศัยแบบสร้างสรรค์ของภาคธุรกิจเอกชน. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร, กรุงเทพฯ.

ภราดร ตรรกพฤฒิพันธุ์. (2558). การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาที่พักอาศัย สำหรับผู้สูงอายุ ชาวต่างชาติที่เกษียณอายุ และนักท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ ในจังหวัดเชียงราย. (ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กรมการกงสุล. (2560). วีซ่าเกษียณอายุ 1 ปี Non-Immigrant "O-A". ค้นหาจาก www.consular.go.th

ศูนย์ข้อมูลข่าวสารอาเซียน กรมประชาสัมพันธ์. (2560). Medical Hub ยกระดับไทยสู่ศูนย์กลางสุขภาพโลก. ค้นหาจาก http://www.aseanthai.net/sub_convert.php?nid=7631

ศูนย์วิจัยธนาคารกสิกรไทย. (2561). ธุรกิจดูแลผู้สูงอายุในไทย. ค้นหาจาก https://kasikornbank.com/international-business/th/Thailand/IndustryBusiness/Documents/201811_Thailand_Elderly_ TH.pdf

Mild Home Elderly Care Resort : https://www.thaielder.com/nursinghome/view/514/mild_home_elderly_care_resort

Carrera. (2010), Lunt. (2010), Sigh. (2013). Health Tourism: Conceptual Framework and Insights from the Case of a Spanish Mature Destination.

DESA, U. (2019). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2019: Highlights.

Huguet, J. W., & Chamratrithirong, A. (2014). Thailand migration report 2014: United Nations Thematic Working Group on Migration in Thailand Bangkok.

Wu, S. & Green, A. (2010). Projection of Chronic Illness Prevalence and Cost Inflation. RAND Corporation.

Articles

Connell, J. (2013). Contemporary medical tourism: Conceptualisation, culture and commodification. Tourism management, 34, 1-13.

Shirley, A. (2019). The Wealth Report 2019: The Global Perspective on Prime Property and Wealth (Vol. 13): Knight Frank

Lee, S. C., Barker, S., & Kandampully, J. (2003). Technology, service quality, and customer loyalty in hotels: Australian managerial perspectives. Managing Service Quality: An International Journal.

Padilla-Meléndez, A., & Del-Águila-Obra, A.-R. (2016). Health Tourism: Conceptual Framework and Insights from the case of a Spanish mature destination. Tourism & Management Studies, 12(1), 86-96.

Yu, J. Y., & Ko, T. G. (2012). A cross-cultural study of perceptions of medical tourism among Chinese, Japanese and Korean tourists in Korea. Tourism management, 33(1), 80-88.

Porter, M. E. (1989). How competitive forces shape strategy. In Readings in strategic management (pp. 133-143): Springer.

Fritsch, T. (2007). A strategic analysis of US development opportunities for spectrum seniors housing. Faculty of Business Administration-Simon Fraser University,

Bart Van den Mooter. (2017, 2 November). Medical Tourism in Asia-Pacific Growing

Rapidly. Retrieved from http://www.brinknews.com/medical-tourism-in-asiapacific-growing-rapidly/

Worldometer. (2019). Current World Population. Retrieved from https://www.worldometers.info/world-population/

การศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวกับการลงทุนอสังหาริมทรัพย์แนวราบ กรณีศึกษา พื้นที่จังหวัดพะเยา
Possibilities regarding horizontal real estate investment, Case study in Phayao Province

ปพิชญา แหนคำ[1,] อนุชา สอนใจ[2]

[1,2] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail address: 64101877@up.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนพัฒนาอสังหาริมทรัพย์โครงการศูนย์สุขภาพในพื้นที่จังหวัดพะเยา มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพและความเหมาะสมในการพัฒนาโครงการ โดยเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยทางเศรษฐกิจ สังคม และสุขภาพของประชากร รวมถึงการประเมินผลตอบแทนทางการเงิน และความเสี่ยงจากการลงทุน ศูนย์สุขภาพแห่งนี้มุ่งเน้นบริการเพื่อผู้สูงอายุและประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง โดยมีการวางแผนให้บริการด้านการดูแลสุขภาพเชิงป้องกัน การฟื้นฟูสมรรถภาพ และการส่งเสริมคุณภาพชีวิต การศึกษาได้ใช้วิธีการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม การสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ผลการศึกษาพบว่าจังหวัดพะเยามีความต้องการสูงในการพัฒนาบริการด้านสุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ อีกทั้งมีศักยภาพทางด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการลงทุนในโครงการนี้ ด้านการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินพบว่า โครงการมีผลตอบแทนที่น่าพอใจในระยะยาว หากมีการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพและการสนับสนุนจากภาครัฐ จึงสรุปได้ว่า การลงทุนพัฒนาโครงการศูนย์สุขภาพในพื้นที่จังหวัดพะเยามีความเป็นไปได้สูง ทั้งในด้านการตอบสนองต่อความต้องการของประชาชนและความคุ้มค่าทางการลงทุน

Abstract

Possibilities regarding horizontal real estate investment, Case study in Phayao Province aims to assess the potential and suitability of the project. The study focuses on analyzing economic, social, and health factors of the population, as well as evaluating financial returns and investment risks. The health center is designed to provide services for the elderly and residents in nearby areas, with plans to offer preventive care, rehabilitation, and programs to promote quality of life The research employed data collection methods such as surveys, expert interviews, and both

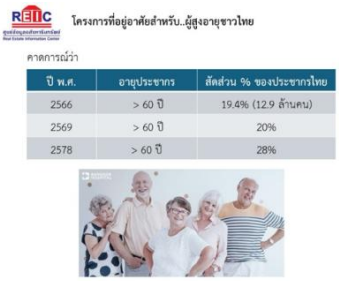
quantitative and qualitative data analysis. The findings indicate a high demand for elderly health services in Phayao Province, and the area shows great potential due to its natural resources and environmental suitability for this investment. Financial feasibility analysis reveals that

the project promises long-term returns if effectively managed and supported by government initiatives In conclusion, investing in the development of a health center in Phayao Province is highly feasible, both in terms of meeting public needs and ensuring financial viability.

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

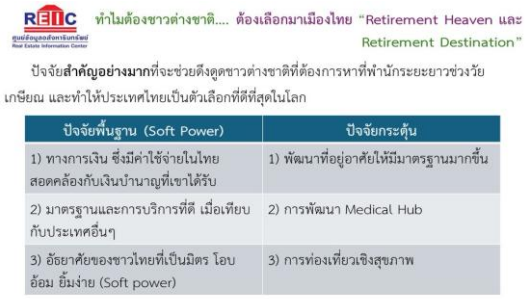
จากผลการสำรวจโครงการศูนย์สุขภาพ (Wellness Center) สำหรับผู้สูงอายุทั่วประเทศไทยในปี พ.ศ 2566 พบว่าโครงการที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุมีการขยายตัวขึ้นอย่างมาก ในช่วง 5-6 ปีที่ผ่านมา คาดการณ์ว่า ประชากรที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป มีจำนวนถึง 19.4% (12.9 ล้านคน) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สัดส่วน % ของประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทย

ของประชากรในประเทศไทย ซึ่งที่อยู่อาศัยที่พัฒนาขึ้นกระจุกตัวในบางพื้นที่ ยังไม่กระจายตัวไปครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถมีที่อยู่อาศัยรองรับกลุ่มผู้สูงอายุได้อย่างทั่วถึง และภาพรวมยังมีจำนวนไม่เพียงพอ เมื่อเทียบกับความต้องการในปัจจุบันที่อยู่อาศัยสำหรับผู้สูงอายุยังคงมุ่งเน้นรองรับผู้สูงอายุชาวไทยเป็นสำคัญ ประมาณ 99.1 % ส่วนการรองรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติยังมีน้อย คาดการณ์ว่าในอนาคต ปี พ.ศ 2566-2578 ประชากรที่อายุมากกว่า 60 ปี จะเพิ่มขึ้นเป็น 28% ของประชากรในประเทศไทย อีกทั้งโครงการที่มีการพัฒนาขึ้นส่วนใหญ่ เป็นการรองรับกลุ่มคนที่มีฐานะปานกลางค่อนข้างดีและ ฐานะดีขึ้นไป ทำให้กลุ่มผู้สูงอายุที่มีฐานะไม่ดีนักยังคงขาดแคลนอย่างมาก เนื่องจากเศรษฐกิจของประเทศไทยโตต่ำ ไทยจึงไม่สามารถแข่งขันกับประเทศเพื่อนบ้านได้ โดยอ้างอิงจาก ดร.นิเวศน์ ที่มองว่าปัญหาของเศรษฐกิจไทยอาจจะไม่ใช่ปัญหาชั่วคราว แต่เป็นปัญหาถาวรที่เกิดจากโครงสร้างที่ได้ยากเมื่อเวลาผ่านไป สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไป

อย่างช้า ๆในขณะที่เราไม่ได้ตระหนักและ ไม่ได้ปรับโครงสร้างตามที่ควรจะเป็น ผลคือ เรากำลังอยู่ในสภาวะที่ไม่เอื้ออำนวยให้เศรษฐกิจเติบโตต่อไปได้ ซึ่งก็ส่งผลให้เศรษฐกิจเติบโตไปได้ยากและ ก็จะเป็นแบบนั้นไปยาวนาน ไทยจึงต้องการเม็ดเงินใหม่ เข้าประเทศเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจที่ต่อเนื่องและ ยั่งยืน แต่โครงสร้างที่เป็นอยู่นั้นค่อนข้างล้าสมัย ไม่สามารถปรับเปลี่ยนไปได้รวดเร็วพอโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบเราไม่สามารถสนองต่อเจตจำนงเสรีของประชาชนที่แท้จริงได้อย่างเพียงพอ ในขณะที่คู่แข่งซึ่งก็คือ ประเทศเพื่อนบ้านในอาเซียนที่เคยเป็นรองไทยในอุตสาหกรรมรุ่นเก่า ขณะนี้กลับนำไทยในอุตสาหกรรมใหม่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2


REIC ทำไมต้องชาวต่างชาติ.... ต้องเลือกมาเมืองไทย "Retirement Heaven และ Retirement Destination"

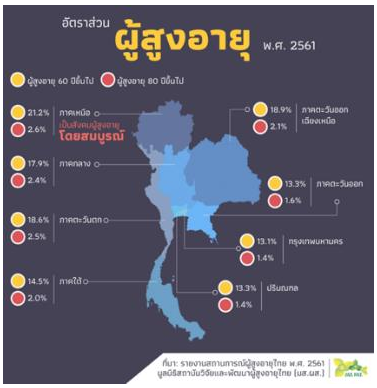
ปัจจัย**สำคัญอย่างมาก**ที่จะช่วยดึงดูดชาวต่างชาติที่ต้องการหาที่พำนักระยะยาวช่วงวัยเกษียณ และทำให้ประเทศไทยเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในโลก

ปัจจัยพื้นฐาน (Soft Power)	ปัจจัยกระตุ้น
1) ทางการเงิน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในไทยสอดคล้องกับเงินบำนาญที่เขาได้รับ	1) พัฒนาที่อยู่อาศัยให้มีมาตรฐานมากขึ้น
2) มาตรฐานและการบริการที่ดี เมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ	2) การพัฒนา Medical Hub
3) อัธยาศัยของชาวไทยที่เป็นมิตร โอบอ้อม ยิ้มง่าย (Soft power)	3) การท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ

รูปที่ 2 นิคมอุตสาหกรรม “ เมืองสูงวัยนานาชาติ”

ดังนั้นโครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุชาวต่างชาติ จึงปัจจัยสำคัญอย่างมากที่จะช่วยดึงดูดชาวต่างชาติที่ต้องการหาที่พักอาศัยระยะยาวช่วงวัยเกษียณและ ทำให้ประเทศไทยเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในโลก ด้วยเหตุผลอัธยาศัยของชาวไทยที่เป็นมิตร โอบอ้อมยิ้มง่าย (Soft Power) และ การบริการดี เมื่อเทียบกับประเทศอื่น ๆ การเงิน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สอดคล้องกับเงินบำนาญที่เขาได้รับ เพราะสังคมเข้าสู่วัยผู้สูงอายุ และเราต้องการเม็ดเงินใหม่ เข้าสู่ประเทศอย่างต่อเนื่องเลยจำเป็นต้องให้สิทธิพิเศษกับชาวต่างชาติเพื่อส่งเสริมการลงทุน ผู้จัดทำจึงได้สนใจเรื่องที่กำลังส่งผลอย่างรุนแรงและ ชัดเจนขึ้นเรื่อย ๆ ก็คือ เรื่องของประชาชนที่แก่ตัวลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่คนเกิดใหม่น้อยลงอย่างรวดเร็วยิ่งกว่า โครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุจึงตอบโจทย์กับนิคมอุตสาหกรรมที่จะนำไปแข่งขันกับประเทศเพื่อนบ้าน และ ยังสามารถสร้างเม็ดเงินโดยการให้สิทธิพิเศษกับชาวต่างชาติเข้ามาพักอาศัยแบบถาวร

ผู้วิจัยต้องการศึกษาความเป็นไปได้ของการพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ ประเภทศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุในเขตอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา เพื่อส่งเสริมธุรกิจในพื้นที่ให้เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจสูงสุด อีกทั้งยังเป็นการสร้างโอกาศและสร้างรายได้ให้ชุมชนโดยใช้แนวคิดทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาด (Marketing Mix) ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์สิ่งที่ส่งผลกระทบและเป็นอุปสรรคต่อธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ รวมถึงการวางแผนพัฒนาธุรกิจ เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของประชากรและนักลงทุนในอนาคต จากข้อมูลดังกล่าว ผู้จัดได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนารูปแบบเฉพาะของโครงการศูนย์สุขภาพและ หาทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมกับการพัฒนาที่อยู่อาศัยประเภทนี้ โดยได้ทำแบบสอบถามข้อมูลจาก กลุ่มผู้สูงอายุส่วนใหญ่และ ประชากรวัยกลางคนที่เข้าข่ายผู้สูงอายุ ที่อยู่ในเขตพื้นที่จังหวัดพะเยา โดยการลงพื้นที่สำรวจและ ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการเก็บบันทึกข้อมูล เพื่อนำมาเป็นแนวทางการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุน โครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ ในเขตพื้นที่จังหวัดพะเยาและ ศูนย์อบรมเกี่ยวกับวิธีการดูแลสุขภาพ ให้ความรู้แก่ผู้สูงอายุ รวมถึงนำข้อมูลที่ศึกษาได้มาเป็นรากฐานในการวิเคราะห์และ คาดการณ์ในการพัฒนาโครงการในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราส่วนผู้สูงอายุ พ.ศ 2561

1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

1.2.1 เพื่อนำทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาดมาปรับใช้ในธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในจังหวัดพะเยา

1.2.2 เพื่อเข้าใจบริบทเศรษฐกิจและสังคมที่มีผลต่อการพัฒนาโครงการ

1.2.3 เพื่อส่งเสริมการพัฒนาศูนย์สุขภาพที่เป็นประโยชน์ต่อชุมชนและเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชนในจังหวัดพะเยา

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.3.1 **สถานที่**

- ในอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา

1.3.2 **เครื่องมือ**

-ทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาด (Marking Mix) ,4PS

- มาตรวัด เจตคติ ลิเคิร์ท (Likert rating scale)

1.3.3 **วิเคราะห์ข้อมูล**

-โปรแกรม Microsoft Excel

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ประชาชนในพื้นที่จะสามารถเข้าถึงบริการสุขภาพที่มีคุณภาพและหลากหลายได้ง่ายขึ้น

1.4.2 สามารถนำข้อมูลที่ศึกษาได้มาวิเคราะห์และคาดการณ์ถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาโครงการศูนย์สุขภาพ

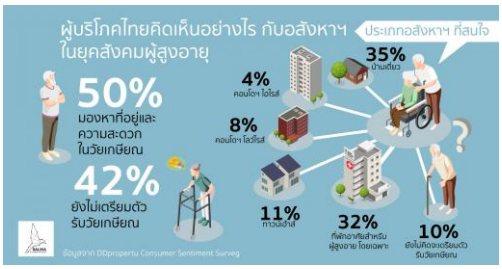
1.4.3 ทราบความเป็นไปได้ในการพัฒนาโครงการ รูปแบบโครงการที่เหมาะสม กฎหมายที่เกี่ยวข้อง และข้อจำกัดต่าง ๆที่มีผลต่อการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ในจังหวัดพะเยา

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเป็นไปได้เพื่อพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ประเภทศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุในจังหวัดพะเยา มีองค์ความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ

การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ เป็นการวิเคราะห์เพื่อประเมินว่าการดำเนินโครงการนั้นมีความคุ้มค่าและเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดและโอกาสในการดำเนินโครงการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาปัจจัยหลายด้านที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ โดยเริ่มศึกษาจาก *ความต้องการของตลาด* ซึ่งในปัจจุบัน สังคมผู้สูงอายุกำลังเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว การเพิ่มขึ้นของประชากรสูงอายุทำให้เกิดความต้องการบริการสุขภาพ ความต้องการเหล่านี้สร้างโอกาสให้โครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุเป็นที่ต้องการอย่างมากในตลาด โดยเฉพาะในชุมชนที่มีสัดส่วนผู้สูงอายุสูง หรือในเมืองใหญ่ที่ครอบครัวหลายครัวเรือนมีความสามารถทางการเงินที่จะจ่ายค่าบริการสุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การมองหาที่อยู่ในวัยเกษียณ

ความเป็นไปได้ทางการเงิน โครงการต้องได้รับการประเมินในด้านต้นทุนตั้งแต่การก่อสร้าง การจัดหาอุปกรณ์ การจ้างบุคลากรทางการแพทย์ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานระยะยาว นอกจากนี้ยังต้องคำนวณรายได้ที่คาดหวังจากการให้บริการต่าง ๆ เช่น การดูแลสุขภาพขั้นพื้นฐาน การดูแลระยะยาว หรือการจัดโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพและ ระยะเวลาคืนทุนถือเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงิน ในด้านเทคโนโลยีและทรัพยากร การสร้างศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีความยืดหยุ่น เครื่องมือฟื้นฟูสมรรถภาพที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับผู้สูงอายุและ ระบบบันทึกข้อมูลสุขภาพที่มีความปลอดภัย การพิจารณาความพร้อมของเทคโนโลยีเหล่านี้จะช่วยให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการหาบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางเพื่อดูแลผู้สูงอายุ ในการประเมินปัจจัยทางกฎหมายและข้อบังคับ เป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินโครงการ เนื่องจากศูนย์สุขภาพต้องปฏิบัติตามกฎหมายด้านสุขภาพ การขออนุญาตและรับรองมาตรฐานจากหน่วยงานรัฐเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อให้ศูนย์สุขภาพสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้องตามกฎหมายและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้บริการ นอกจากนั้นความเป็นไปได้ของโครงการยังขึ้นอยู่กับ การจัดการความเสี่ยง ที่อาจเกิดขึ้น เช่น ความไม่แน่นอนทางเศรษฐกิจ ความเสี่ยงทางกฎหมาย หรือความท้าทายในการจัดหาบุคลากร การเตรียมแผนรับมือกับความเสี่ยงเหล่านี้จะช่วยให้โครงการสามารถปรับตัวและตอบสนองต่อปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2.2 ทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาด (Marketing Mix)

กลยุทธ์ 4Ps (Marketing Mix) ส่วนประสมทางการตลาดเป็นแนวคิดเครื่องมือทางการตลาดที่นำมาใช้ร่วมกันเพื่อให้บรรลุเป้าหมายทางการตลาดหรือเพิ่มมูลค่าให้โครงการ ศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ

2.2.1 ผลิตภัณฑ์ (Product) คือ ตัวสินค้าหรือโครงการ บวกกับความพอใจและผลประโยชน์ที่ผู้บริโภคได้รับจากการเลือกซื้อสินค้าที่ผู้บริหารต้องผลิตขึ้นมาเพื่อสอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย

2.2.2 ราคา (Price) คือ การกำหนดราคาที่เหมาะสมให้กับสินค้าที่จะนำไปเสนอขายเพื่อต้องการกำไร จำเป็นต้องมีกลยุทธ์เป็นเครื่องมือในการแข่งขันในตลาด เช่น ส่วนลดหรือโปรโมชั่น

2.2.3. ช่องทางการจำหน่าย (Place) คือ ป้ายโฆษณาและแพรตฟอร์มบนสื่อออนไลน์ ที่โปรโมทนำข้อมูลตัวสินค้าไปสู่ลูกค้า

2.2.4. การส่งเสริมการตลาด (Promotion) คือ การบอกให้ลูกค้าทราบว่ามีสินค้าจำหน่ายในตลาดและพยายามชักชวนให้ลูกค้าซื้อ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 4Ps Marketing Mix
ที่มา : https://byjus.com/commerce/marketing-mix/

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บริษัท ศุภาลัย จำกัด (มหาชน) ได้พัฒนาโครงการ ศุภวัฒนาลัย (Supalai Wellness Valley) หมู่บ้านสำหรับ “สังคมผู้สูงวัย 50+” โดยโครงการนี้เกิดจากแนวคิดของ คุณประทีป ตั้งมติธรรม ประธานกรรมการ บมจ. ศุภาลัย เพื่อตอบรับสังคมผู้สูงวัยในประเทศไทย เพื่อสร้างต้นแบบของการใช้ชีวิตของสังคมผู้สูงวัยยุคใหม่ที่มีการอยู่ร่วมกันอย่างสร้างสรรค์สังคม โดยเริ่มต้นยังไม่ได้มองถึงผลทางธุรกิจ โครงการศุภวัฒนาลัย ใช้สิ่งอำนวยความสะดวกที่มีดั้งเดิมในรีสอร์ท ได้แก่ ร้านอาหาร พื้นที่ออกกำลังกาย สวน และสปา รวมทั้งเพิ่มบริการพิเศษสำหรับผู้สูงอายุ ได้แก่ มีพยาบาลดูแลรักษาความปลอดภัย สิ่งอำนวยความสะดวก การออกแบบที่อยู่อาศัยเพื่อผู้สูงวัย เช่น ประตูห้องนอนและห้องน้ำบานเลื่อนมีราวจับ

แพทย์หรือพยาบาลประจำรองรับเหตุฉุกเฉินพร้อมนำส่งโรงพยาบาล มีกิจกรรมสันทนาการ มีการเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีติดตามตัวคอยเรียกได้ตลอด 24ชม ในโครงการมีบ้านพักรวม 144 ยูนิต มูลค่ารวมกว่า 200 ล้านบาท เบื้องต้นจะแบ่งการก่อสร้างเป็น 4 เฟส โดยเฟสแรก 65 ยูนิต พร้อมเข้าอยู่ในปี พ.ศ. 2563 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 “ศุภวัฒนาลัย” (Supalai Wellness Valley)

บริษัท พฤกษา เรียลเอสเตท จำกัด (มหาชน) หันมาจับธุรกิจสุขภาพ เปิดตัวโรงพยาบาลวิมุต ซึ่งเริ่มก่อสร้างช่วงปลายปี 2560 ด้วยงบประมาณ 5,000 ล้านบาท และเปิดให้บริการในเดือนพฤษภาคม 2564 โดยเป็นก้าวแรกของพฤกษาในการทำธุรกิจสุขภาพรับเมกะเทรนด์สุขภาพ และสังคมผู้สูงวัย เป็นแหล่งรายได้ประจำใหม่ (Recurring Income) ในพอร์ตของบริษัทที่แต่เดิมเป็นธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ 100% โดยมีแนวคิดว่าธุรกิจโรงพยาบาลจะเพิ่มมูลค่าให้โครงการที่อยู่อาศัย ด้วยบริการ Nursing Home และโครงการ ViMUT Health Center ที่โครงการ Pruksa Avenue ในย่านบางนา-วงแหวน ซึ่งขณะนี้อยู่ระหว่างการก่อสร้าง โดยใช้งบลงทุนรวม 150 ล้านบาท เพื่อพัฒนาเป็นศูนย์สุขภาพ ที่ครอบคลุมบริการที่หลากหลาย อาทิ คลินิก ศูนย์กายภาพ ศูนย์ดูแลและบริบาลผู้สูงอายุ รวมถึงบริการดูแลสุขภาพถึงบ้าน (Home Health Care) ซึ่งคาดว่าจะเปิดให้บริการในปลายปี 2565 และตั้งเป้าเติบโตราว 15-20% ในปีถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 “โรงพยาบาลวิมุต”

บริษัท เอ็น.ซี.เฮ้าส์ซิ่ง จำกัด (มหาชน) ผู้เชี่ยวชาญในด้านอสังหาริมทรัพย์ ร่วมกับ เดอะ แคร์ แอนด์ เฮลธ์ กรุ๊ป ที่มีประสบการณ์ด้านการฝึกอบรมบุคลากรทางด้านสุขภาพที่มีคุณภาพและมาตรฐาน พัฒนาโครงการ “ศิริอรุณแคร์” ศูนย์ฟื้นฟูสุขภาพและการดูแลผู้สูงอายุ ด้วยงบลงทุน 100 ล้านบาท โดยมี 2 สาขาในกรุงเทพฯและ 1 สาขาในอุบลราชธานี โดยให้บริการดูแลผู้อยู่ในระยะพักฟื้นและผู้สูงอายุ เน้นให้บริการด้านสุขภาพแบบองค์รวมทั้งด้านร่างกายและจิตใจ โดยการวางแผนการดูแลให้เหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการ และสถานะสุขภาพเฉพาะราย ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงการ "ศิริอรุณแคร์"

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวกับการลงทุนอสังหาริมทรัพย์แนวราบ ประเภทศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ ทำการศึกษาเขตพื้นที่จังหวัดพะเยา มีวัตถุประสงค์ในการนำทฤษฎี Marketing Mix,4PS มาปรับใช้ในธุรกิจอสังหาริมทรัพย์

โดยการวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดของกระบวนการศึกษา และวิธีการดำเนินการตามขั้นตอนนี้

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ในรูปแบบ Marketing mix,4PS

3.1.1 *Marketing mix,4PS*

ประกอบด้วย 4PS สำหรับธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ซึ่งเป็นธุรกิจประเภทบริการ เช่นกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ (Product) ราคา (Price) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Place) การส่งเสริมการตลาด (Promotion) ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดเป็นสิ่งที่ลูกค้าต้องการได้รับการตอบสนองอย่างสมบูรณ์แบบในมุมมองของลูกค้า

3.1.2 ขอบเขตประชากร ประชากรในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย บุคคลที่มีอายุตั้งแต่ 25 ปี ขึ้นไป จำนวน 200 คนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา

3.2 ทำการเลือกพื้นที่ที่ต้องการศึกษาข้อมูล

ทำการพื้นที่ที่มีผู้สูงอายุ ในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา เพื่อศึกษารายละเอียดข้อมูลต่างๆของโครงการศูนย์สุขภาพสำหรับหรับผู้สูงอายุ

3.3 ลงพื้นที่สัมภาษณ์และเก็บข้อมูลโครงการ

บุคคลที่มีอายุ 25 ปี ขึ้นไป ในอำเภอเมืองพะเยา

3.3.1.เครื่องมือที่ใช้ในการประเมิณ

ประกอบด้วยข้อมูลเชิงปริมาณ ข้อมูลเชิงคุณภาพและเอกสารแผนปฏิบัติการดูแลผู้สูงอายุ แบบสรุปผล การประเมินอำเภอต้นแบบการดูแลผู้สูงอายุ สำหรับข้อมูลเชิงปริมาณใช้แบบสอบถาม

ซึ่งผู้ประเมินสร้างจากการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

- ข้อมูลลักษณะส่วนบุคคล
- ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยส่วนประสมการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจ
- ข้อมูลเกี่ยวกับการตัดสินใจใช้บริการ
- ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

3.4 รวบรวมข้อมูล ทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาด

ประกอบไปด้วย ผลิตภัณฑ์ ราคา ช่องทางการจัดจำหน่าย การส่งเสริมการตลาด

3.5 รวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายนอก

โดยมีปัจจัยด้านต่าง ๆดังนี้ ด้านการเมือง ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม ด้านเทคโนโลยี ด้านกฎหมาย ด้านสภาพแวดล้อม

3.6 สร้างแบบสอบถาม

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจัดทำแบบสอบถามประชากรในพื้นที่ของกลุ่มเป้าหมาย

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธี มาตรวัด เจตคติ ลิเคิร์ท (Likert rating scale)

ลิเคิร์ท นิยาม เจตคติตามนิยามของเทอร์สโตน (Thurstone) ที่กำหนด เจตคติให้มีเพียงองค์ประกอบด้วย คือ ความรู้สึกหรืออารมณ์หรือความคิดที่มีต่อสิ่งหนึ่ง ดังนั้น การสร้างเครื่องมือของลิเคิร์ท จึงมุ่งถามตรง ๆ ลงไปที่ "ความรู้สึก" หรือ "ความคิด"ซึ่งเป็นข้อคำตอบออกจากใจของผู้ถูกถาม โดยถามทำนองว่า ท่านเห็นด้วยกับสิ่งที่กำหนดในระดับใด วิธีวัดความพึงพอใจหรือความเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามด้วย Likert Scale คือการให้ผู้ตอบแบบสอบถามเลือกแสดงความคิดเห็น จากระดับความถึงพอใจหรือระดับความเห็นด้วย 5 ระดับ ต่อแบบสอบถามในแต่ละข้อ ระดับความเห็นด้วยทั้ง 5 ระดับ ของ Likert Scale คือ ระดับความพึงพอใจที่จะมีตั้งแต่พอใจหรือเห็นด้วยที่สุด (Favorable) ไปจนถึงไม่พอใจหรือไม่เห็นด้วยที่สุด (Unfavorable) ดังนี้

4.50 – 5.00 อยู่ในระดับ มากที่สุด

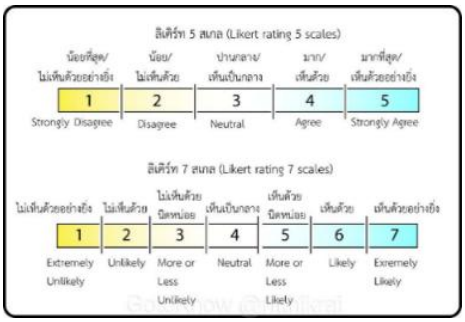
3.50 – 4.49 อยู่ในระดับ มาก

2.50 – 3.49 อยู่ในระดับ ปานกลาง

1.50 – 2.49 อยู่ในระดับ น้อย

0.00 – 1.49 อยู่ในระดับ น้อยที่สุด

ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 มาตราวัดของ ลิเคิร์ท

3.8 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

นำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมและลงพื้นที่สัมภาษณ์ มาวิเคราะห์และสรุปผลดำเนินงาน ขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.8.1 วิเคราะห์ทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาด

การวิเคราะห์ทฤษฎีส่วนผสมทางการตลาดโดยใช้เครื่องมือ Marketing mix,4PS นำข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สัมภาษณ์ มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษาความเป็นไปได้เพื่อพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์แนวราบ ประเภทศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุที่อยู่อาศัยใน จ.พะเยา ได้ทำการศึกษาหาข้อมูลโดยลงพื้นที่ อ.พะเยา และการทำแบบสอบถามจากประชากรที่อาศัยอยู่ในจังหวัดพะเยา

หลังจากผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลสามารถนำเสนอผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

4.1 ข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่

4.1.1 โครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ

Marketing mix

- ผลิตภัณฑ์ : ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว , ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น , ศูนย์สุขภาพแบบคอนโดมิเนียม

- ราคา : ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว ราคาเริ่มต้น 5,000 – 30,000 บาท/เดือน , ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้นราคาเริ่มต้น 10,000 – 40,000 บาท/เดือน , ศูนย์สุขภาพแบบคอนโดมิเนียม ราคาเริ่มต้น 1,800,000 – 4,000,000 บาท/เดือน

- ช่องทางการจัดจำหน่าย : Facebook,ป้ายโฆษณา,Line, Website

- การส่งเสริมการตลาด : มีโปรโมชัน 7 รายการ

4.2 ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลแบบสอบถาม ทั้งหมดจำนวณ 200 คน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ลงสำรวจข้อมูลในพื้นที่ อ.เมืองพะเยา

4.2.1 ข้อมูลทั่วไป

เพศ : ชาย จำนวน 78 คน หญิง จำนวน 122 คน

อายุ : 25-35 ปี จำนวน 109 คน 36-45 ปี จำนวน 48 คน 46-55 ปี จำนวน 27 คน อายุ 60 ปีขึ้นไป จำนวน 18 คน

อาชีพ : ข้าราชการ จำนวน 42 คน ,พนักงานรัฐวิสาหกิจ จำนวน 21 คน ,ประกอบอาชีพธุรกิจส่วนตัว จำนวน 56 คน ,ครู เอกชน จำนวน 21คน ,ว่างงาน/พ่อบ้าน/แม่บ้าน/เกษียณอายุ จำนวน 18 คน ,ประกอบอาชีพค้าขาย จำนวน 42 คน

สถานที่พักปัจจุบัน : อาศัยในพื้นที่ จ.พะเยา จำนวน 153 คน ไม่ได้อาศัยในพื้นที่ จ.พะเยา จำนวน 47 คน

4.2.2 สำรวจลักษณะที่อยู่อาศัย

ตารางที่ 1 ลักษณะที่อยู่อาศัย

ลักษณะที่อยู่อาศัย	จำนวน/คน	ร้อยละ
ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว 	79	39.5
ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น 	91	45.5
ศูนย์สุขภาพแบบคอนโดมิเนียม 	43	21.5
ต้องการ ห้องเดี่ยว 	59	29.5
ต้องการ ห้องรวม แยก ชาย/หญิง 2 เตียง 	83	41.5
ต้องการ ห้องรวม แยก ชาย/หญิง 10 ตียง 	98	49

ตารางที่ 2 ราคา (4ps,Price)

ราคาบ้านที่ต้องการ	จำนวน/คน	ร้อยละ
ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว (ห้องเดี่ยว) 5,000- 15,000บาท/เดือน	89	44.5
ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว (ห้องรวม 2 เตียง) 10,000 - 16,000บาท/เดือน	46	23
ศูนย์สุขภาพแบบชั้นเดียว (ห้องรวม 10 เตียง) 16,000 - 30,000บาท/เดือน	15	7.5
ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น (ห้องเดี่ยว) 10,000 - 15,000บาท/เดือน	62	31
ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น (ห้องรวม 2 เตียง) 16,000 - 20,000บาท/เดือน	17	8.5
ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น (ห้องรวม 10 เตียง) 23,000 - 40,000บาท/เดือน	93	46.5
ศูนย์สุขภาพแบบตอนโด 1,800,000 - 4,100,000 บาท สิทธิอยู่อาศัยตลอดชีพ	20	10

ตารางที่ 3 จุดประสงค์การซื้อ/เข้าอยู่

จุดประสงค์การซื้อ	จำนวน/คน	ร้อยละ
ต้องการผู้ดูแลอย่างใกล้ชิดเป็นพิเศษตลอด 24 ชม.	94	47
เพื่อความสะดวกสบาย	54	27
ไม่มีญาติพี่น้องดูแล	33	16.5

ตารางที่ 4 ลักษณะและฟังก์ชั่น (4ps,Promotion)

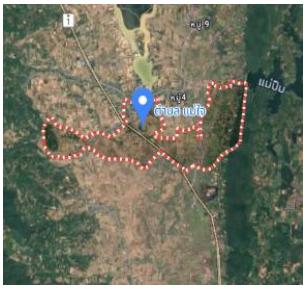
ลักษณะและฟังก์ชั่น	จำนวน/คน	ร้อยละ
ระบบรักษาความปลอดภัย 24 ชม.	178	89
มีบุคลากรทางการแพทย์ประจำศูนย์	177	88.5
มีห้องน้ำภายในตัวอาคาร/ห้องน้ำมีราวจับที่มั่นคง	178	89
สวิตช์ไฟอยู่ในตำแหน่งที่ผู้สูงอายุใช้งานได้สะดวก	178	89
มีปุ่มฉุกเฉินติดตามจุดต่าง ๆ ที่มักจะเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ	176	88

ตารางที่ 5 สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการส่วนกลาง

สิ่งอำนวยความสะดวกและบริการส่วนกลาง	จำนวน/คน	ร้อยละ
มีลานกว้างให้ใช้ทำกิจกรรม	176	88
มีที่จอดรถสำหรับผู้พิการ และคนชรา	177	88.5
มีลิฟต์ที่ผู้พิการ และคนชราใช้ได้ และสามารถสามารถควบคุมได้เอง	176	88
มีป้ายแสดงสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการหรือทุพพลภาพ และคนชรา	176	88
รายงานในไลน์อย่างละเอียด และสม่ำเสมอ	176	88
มีเฟอร์นิเจอร์ที่สะดวกต่อการใช้งาน (เตียง,โต๊ะข้างเตียง,ตู้เสื้อผ้า)	175	87.5
มีเครื่องใช้ไฟฟ้าครบครัน (ทีวี,เครื่องทำน้ำอุ่น,แอร์,พัดลม)	176	88
Free WiFi	149	74.5
มีกล้องวงจรปิด CCTV	175	87.5
มีเครื่องบริหารร่างกาย	176	88

4.2.3 สำรวจความสนใจทำเลที่ตั้ง

ตารางที่ 6 สถานที่ตั้ง (4ps,Place)

สถานที่ตั้ง	จำนวน/คน	ร้อยละ
อ.เมืองพะเยา ต.ท่าวังทอง จ.พะเยา 	93	46.5
อ.เชียงคำ ต.เวียง จ.พะเยา 	75	37.5
อ.แม่ใจ ต.แม่ใจ จ.พะเยา 	85	42.5

4.2.4 โปรโมชั่นพิเศษ

ตารางที่ 7 โปรโมชั่น (4ps,Promotion)

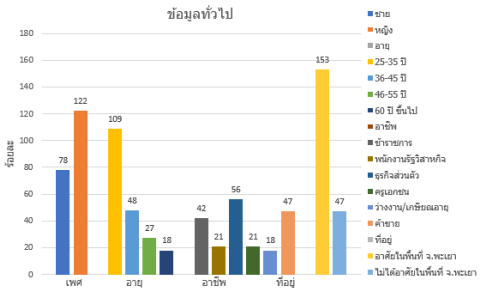
โปรโมชั่น	จำนวน/คน	ร้อยละ
ฟรีพบแพทย์อายุรกรรม	178	89
ฟรีอาหาร และอาหารว่างครบ 3 มื้อ	177	88.5
ฟรีโปรแกรมกายภาพบำบัด	160	80
มีระบบรักษาความปลอดภัยด้วย CCTV	172	86
มีเจ้าหน้าที่บริบาลดูแล 24 ชม.	157	78.5
ซื้อโปรแกรมตรวจสุขภาพในราคาพิเศษ	151	75.5
มีบริการจัดรถส่งที่พัก	175	87.5
ส่วนลดค่ายา เวชภัณฑ์ 10%	179	89.5
ส่วนลดค่าห้อง 20%	178	89
มีบริการเช่า-ยืม รถเข็น,ไม้ค้ำยัน	177	88.5

5.สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายที่จะหาแนวทางในการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ ประเภทศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุในจังหวัดพะเยา โดยได้ทำการลงพื้นที่หาข้อมูลจาก การทำแบบสอบถามข้อมูลความต้องการจองประชากรที่มีอายุ 25 ปีขึ้นไป ในเขตพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา หลังจากผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว สามารถนำเสนอผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ทำแบบสอบถาม

แบ่งออกเป็น เพศชาย 78 คน เพศหญิง 122 คน อยู่ในช่วงอายุตั้งแต่ 25 ปีขึ้นไป มีการประกอบอาชีพข้าราชการ พนักงานรัฐวิสาหกิจ ธุรกิจส่วนตัว ครูเอกชน ว่างงาน/เกษียณอายุ และประกอบอาชีพค้าขาย เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ข้อมูลทั่วไป

5.2 ข้อมูล Marketing mix ที่ได้จากการสรุปแบบสอบถาม

ความต้องการของประชากรสำหรับศูนย์สุขภาพประกอบด้วยศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น เป็นห้องรวม แยก ชาย/หญิง 10เตียง ที่มีราคา 23,000 - 40,000บาท/เดือนพร้อมสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ลานกิจกรรม, โรงจอดรถสำหรับผู้พิการ, ลิฟต์, และระบบความปลอดภัยด้วย CCTV จุดประสงค์หลักคือการดูแลผู้สูงอายุอย่างใกล้ชิดตลอด 24 ชม. และ โปรโมชั่นที่มีผลโหวตมากที่สุดรวม7 รายการ พร้อมฟังก์ชันพิเศษ เช่น ระบบความปลอดภัย 24 ชม., บุคลากรทางการแพทย์ประจำศูนย์, ห้องน้ำมีราวจับและปุ่มฉุกเฉิน, สวิตช์ไฟใช้งานง่าย, และปุ่มฉุกเฉินในจุดเสี่ยง ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ศูนย์สุขภาพแบบ 2 ชั้น ห้องรวม แยก ชาย/หญิง 10 เตียง

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุในจังหวัดพะเยานั้นมีข้อเสนอแนะดังนี้

1.สามารถทำการสำรวจข้อมูลงานวิจัยในจังหวัดอื่นเพื่อให้ได้ผลที่แตกต่างกันออกไป แล้วนำผลการวิจัยมาเปรียบเทียบพิจารณาถึงความแตกต่าง เพื่อให้เกิดการพัฒนาปรับปรุงแนวทางของโครงการศูนย์สุขภาพสำหรับผู้สูงอายุให้ดียิ่งขึ้น

2.สามารถนำข้อมูลงานวิจัยนี้ไปเป็นตัวอย่างในการพัฒนาการวางแผนรองรับผลกระทบที่เกิดขึ้นในช่วงก่อนเริ่มโครงการ กำลังดำเนินสร้างโครงการ และหลังโครงการเสร็จสมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอย ให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือและตรวจทานข้อบกพร่องต่าง ๆ ทำให้การค้นคว้านี้ มีรายละเอียดที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอบคุณ เงินทุนสนับสนุนในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอบคุณ ประชากรในพื้นที่อ.เมืองพะเยา จ.พะเยา ที่ให้ข้อมูลซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อน ๆสาขาวิศวกรรมโยธา ที่ส่งเสริมสนับสนุนและคอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังใจที่ดีเสมอมา

บรรณานุกรม

[1] ไพจิตต์ ลักษณวงศ์. (2561). ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด (4Ps) ที่มีอิทธิพลต่อการต่อการตัดสินใจซื้อบ้านของโครงการบ้านจัดสรรในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชาบริหารธุรกิจ คณะบริการธุรกิจ.มหาวิทยาลัยรามคำแหง จังหวัดสงขลา

[2] นงนุช ฐานเจริญ (2557). การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาที่อยู่อาศัยแนวราบในเขตลาดพร้าวในลักษณะ site looking for use มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี

[3] วไลพร ธนารักษ์สกุล. (2554). การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการลงทุนในธุรกิจบ้านจัดสรรในเขตเทศบาลเมืองศรีสะเกษ. สารนิพนธ์ ศ.ม.(เศรษฐศาสตร์การจัดการ).กรุงเทพมหานคร.บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ

[4] สันติ วงษ์สูง. (2565). การศึกษารูปแบบการลงทุนพัฒนาอสังหาริมทรัพย์เพื่อการพักอาศัย กรณีศึกษาจังหวัดนครศรีธรรมราช.สาขาวิชา การจัดการอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานระบบประปาของธุรกิจก่อสร้างขนาดเล็ก

Application of building information modeling to plumbing system management for developed small construction business

ปิยนันท์ สุธรรม[1] อรณิชา คชสีห์[2] ภัทรานิษฐ์ ไหมเหลี่ยม[3],* และ ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง[4]

[1] นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[2]อาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
** E-mail address : 64103824@up.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information - Modeling, BIM) เป็นเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทอย่างมากในวงการก่อสร้างของประเทศไทย เริ่มต้นตั้งแต่การออกแบบไปจนถึงการใช้งานสิ่งก่อสร้าง ธุรกิจก่อสร้างหลายรายได้เริ่มนำ BIM มาปรับปรุงกระบวนการทำงานของตนเองให้ มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี BIM กับธุรกิจก่อสร้างโดยใช้บ้านคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 หลัง ขนาด 120 ตารางเมตร และ 145 ตารางเมตร เป็นกรณีศึกษา การศึกษานี้จะนำ BIM ไปใช้กับขั้นตอนการตรวจสอบความสามารถในการก่อสร้าง ของแบบก่อสร้าง และการประมาณราคาก่อสร้าง ของแบบบ้านคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 หลัง ขนาด 120 ตารางเมตรและ 145 ตารางเมตร ซึ่งจะนำเทคโนโลยี BIM มาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในรูปแบบการประมาณราคาเพื่อที่นำมาศึกษาปริมาณวัสดุงานระบบปะปาในการก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากโปรแกรมทำให้งานวิจัยนี้มีความแม่นยำมากขึ้นในส่วนของการคำนวนซึ่งได้ใกล้เคียงกับการก่อสร้างจริง จากการศึกษาสรุปได้ว่า BIM สามารถลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน ลดระยะเวลาในการทำงาน และต้นทุนของปริมาณวัสดุระบบประปา แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ BIM ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะช่วยในขั้นตอนการประมาณราคาให้เกิดความสะดวกสบาย ความแม่นยำ และประหยัดทั้งต้นทุนค่าก่อสร้างได้ในจำนวนมาก

คำสำคัญ: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร,บ้านคอนกรีตเสริมเหล็ก, การประมาณราคาก่อสร้าง

Abstract

Nowadays, BuildingInformation Modeling (BIM) is a technology that plays a significant role in the construction industry of Thailand, starting from the design to the use of buildings. Many construction businesses have started to use BIM to improve their work processes to be more efficient. Therefore, this research aims to study the feasibility of applying BIM technology to the construction business using two reinforced concrete houses, each measuring 120 square meters and 145 square meters, as a case study. This study will apply BIM to the process of checking the constructability of the construction model and estimating the construction cost of two reinforced concrete houses, each measuring 120 sq.m. and 145 sq.m. which will apply BIM technology to the construction work in the form of cost estimation in order to study the amount of water supply materials in various types of construction because the program makes this research more accurate in the calculation part, which is closer to the actual construction. The study concluded that BIM can reduce the complicated work process, reduce the work time, and reduce the cost of the amount of water supply materials, demonstrating the potential of BIM in the application. To help in the cost estimation process to be convenient, accurate, and save a lot of construction costs.

Keyword: Building Information Modeling (BIM), reinforced concrete houses, estimating the construction cost

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารพักอาศัยจะต้องมีการประมาณราคาวัสดุงานระบบประปา ซึ่งการประมาณราคาวัสดุแบบเดิมมีความล่าช้า สาเหตุเกิดจากขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน ต้องกลับมาทวนข้อมูลที่ประมาณราคาให้มีความแม่นยำ และจากการให้ข้อมูลของลูกค้าที่ไม่ชัดเจนแก่ผู้ออกแบบ

ทำให้แบบที่ได้มาไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนแบบ ทำให้ต้องประมาณหลายครั้ง

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling ; (BIM)) เป็นกระบวนการทำงานที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานสถาปัตยกรรมและการก่อสร้างที่เริ่มตั้งแต่การออกแบบอาคารจนถึงการก่อสร้าง โดยการสร้างแบบจำลองของอาคารที่เกิดจากการเชื่อมโยงข้อมูลต่างๆ ทั้งในรูปแบบ 2 มิติ 3 มิติ เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่จะสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการก่อสร้าง รวมถึงสามารถถอดปริมาณวัสดุได้อย่างแม่นยำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในส่วนต่างๆของการออกแบบ ระบบก็จะปรับเปลี่ยนและบันทึกให้เป็นข้อมูลล่าสุดรวมถึงคำนวณให้โดยอัตโนมัติ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา การเปรียบเทียบการคำนวณปริมาณวัสดุงานระบบประปาสำหรับอาคารพักอาศัยด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อแก้ไขปัญหาที่ซ้ำซ้อนของระบบการทำงานแบบเดิม และเพิ่มความสะดวกให้แก่ วิศวกรผู้ออกแบบ ผู้รับเหมา และผู้ที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้าง สามารถทำงานในส่วนของการประมาณราคาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการประมาณราคาวัสดุงานระบบประปา

1.2.2 เพื่อลดระยะเวลาในการทำแบบก่อสร้างและประมาณราคาวัสดุงานระบบประปาโดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการแก้ไขขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อน โดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการประมาณราคาวัสดุงานระบบประปา

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

ขอบเขตด้านโปรแกรม

- Autodesk revit 2024 (Student license)
- Microsoft Excel

ขอบเขตด้านแบบ

- บ้าน ค.ส.ล. จำนวน 2 หลัง ขนาด 120 ตารางเมตร และขนาด 145 ตารางเมตรตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการประมาณราคาวัสดุงานระบบประปา

1.4.2 ทำให้ทราบระยะเวลาในการทำแบบก่อสร้างและการประมาณราคาจากการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร(BIM)

1.4.3 ทำให้ทราบแนวทางการแก้ไขขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนของการประมาณราคาวัสดุงานระบบประปาจากการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานระบบประปาของธุรกิจก่อสร้างขนาดเล็ก ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling เป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปีคริตศักราชที่1970 ซึ่งเป็นการเขียนแบบในลักษณะรูปทรง 3 มิติ โดยองค์ประกอบทุกส่วนของอาคารล้วนมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับขั้นตอนด้านการวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองอาคาร ในรูปของขบวนการกระจายและเชื่อมโยงข้อมูล เพื่อช่วยในการลดข้อผิดพลาดของการทำแบบก่อสร้าง และเพื่อนำไปใช้ประกอบการบริหารโครงการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากต้องมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงสูง โดยเฉพาะการพัฒนาประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ จึงทำให้ไม่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมก่อสร้าง มีเพียงอุตสาหกรรมการผลิตและอากาศยานทางอวกาศเท่านั้นที่ได้เล็งเห็นถึงประโยชน์จากแนวคิดดังกล่าว (Eastman, 2008, 26-27) [1]

ในช่วงปี ค.ศ. 1980 ระบบการทำงานในรูปแบบ Object-based parametric modeling ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการออกแบบ ซึ่งแนวทางการทำงานใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของรูปทรงสามมิติในการออกแบบ โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวมีส่วนที่ผู้ออกแบบต้องกำหนดขึ้นเองและส่วนที่เป็นค่าคงที่ ทำให้มีแนวทางออกแบบอยู่ 2 แนวทางได้แก่ การออกแบบโดยกำหนดกลุ่มวัตถุที่มีข้อกำหนดและความสัมพันธ์ตามที่ผู้ออกแบบกำหนด โดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับระยะมุมมองและข้อกำหนดเกี่ยวกับชิ้นส่วนที่ต่อเนื่องหรือซ้อนทับกัน ชิ้นส่วนที่ขนานกัน และชิ้นส่วนที่มีระยะห่างจากชิ้นส่วนอื่น ในขณะที่แนวทางที่สองเป็นการออกแบบเปลี่ยนแปลงข้อมูลพารามิเตอร์ได้ตามความต้องการ โดยระบบจะมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยหลักการทางการออกแบบและข้อกำหนดที่กำหนดไว้ ซึ่งระบบจะแจ้งเตือนเมื่อข้อมูลไม่ถูกต้องตามหลักการและข้อกำหนด ซึ่งการออกแบบดังกล่าวแตกต่างจากการออกแบบด้วยระบบ 3D CAD เนื่องจากการเปลี่ยนแลงข้อมูลพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ CAD ต้องทำการเปลี่ยนแปลงข้อมูลพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนเองในทุกมุมมองที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กัน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงข้อมูลพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ Object-based parametric modeling ข้อมูลของทุกๆองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องจะสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยอัตโนมัติ (Eastman, 2008, 29-30) [2]

ในช่วงปี ค.ศ. 1987 หลักการทำงานแบบ Object-based product model และ Object-basedparametric modeling ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกันและเรียกรูปแบบการทำงานแบบใหม่นี้ว่า BuildingInformation Modeling โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการบริหารจัดการข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์มีความง่ายขึ้นและสนับสนุนการทำงานร่วมกันในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์การประยุกต์ใช้แบบจำลองข้อมูลอาคารครั้งแรก เป็นการนำเสนอแบบจำลองอาคารเสมือนจริงของซอฟต์แวร์

ArchiCAD นอกจากนี้เมื่อปี ค.ศ. 1990 การใช้ระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อแบ่งปันข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์มีมากขึ้นทำ ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแลกเปลี่ยนข้อมูลการออกแบบ CAD จากการใช้แผนดิสก์ เป็นการใช้อินเทอร์เน็ตด้วย FTP เว็บเพ็จ และอีเมล์เพิ่มมากขึ้น แนวความคิดเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ออกแบบและผู้ว่าจ้างด้วยข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์จึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของแนวความคิดการบริหารจัดการข้อมูลก่อสร้างในรูปแบบของ web-based (Autodesk, 2002, 2) [3]

2.2 หลักการทำงานแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

หลักในทำงานของ Building Information Modeling คือ กระบวนการในการสร้างแบบจำลองของอาคารที่เกิดจากการเชื่อมโยงข้อมูลต่างๆ ภายในโครงการเข้าด้วยกัน ในรูปแบบของ 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่จะสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการก่อสร้าง เรื่องของงานระบบน้ำ ระบบไฟ ผังพื้น การตรวจสอบทิศทางของแสงที่ตกกระทบอาคาร รูปด้าน รูปตัด ทัศนียภาพโดยรอบตัวอาคาร รวมถึงยังสามารถถอดปริมาณวัสดุได้อย่างแม่นยำ [4] เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของการออกแบบ ระบบก็จะปรับเปลี่ยนและบันทึกให้เป็นข้อมูลล่าสุด รวมถึงคำนวณทุกอย่างมาให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ทำให้ BIM โดดเด่นและอยู่เหนือกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกันคือ I หรือ Information ที่เป็นการบันทึกรายละเอียดและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดของตัวอาคารที่ออกแบบอยู่ จึงทำให้เราสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นไปวิเคราะห์ต่อได้ เช่น การสร้างแบบจำลอง Simulation หรือทำ Facility management ต่างๆ และ BIM Cycle คือ การทำงานที่สามารถส่งผ่านจากฐานข้อมูล Information ภายในวัตถุไปยังการทำงานประเภทอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นภายใน Software เดียว หรือส่งต่อไปยัง Software อื่นๆ ที่เป็นการทำงานระบบ BIM ซึ่งกระบวนการสามารถทำงานผ่านไฟล์กลางที่เรารู้จักกันดีในชื่อของ IFC File ได้เหมือนกันโดยแสดงดัง รูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการทำงานด้วยระบบ BIM
ที่มา : https://www.applicadthai.com

2.3 การประมาณราคาด้วย BIM

การคำนวณปริมาณงานด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถเข้ามามีส่วนช่วยในการคำนวณ ปริมาณงานทั้งหมดของอาคารได้เป็นอย่างดี เนื่องจากแบบจำลอง สารสนเทศอาคารประกอบไปด้วยรูปทรง 3 มิติ และข้อมูลคุณสมบัติ ตัวแปร ต่างๆ เช่น พื้นที่ ปริมาตร เส้นรอบรูป ความยาว จำนวน ฯลฯ ซึ่งสามารถ รายงานผลออกมาในรูปของตารางรายการ (Schedule) ในรูปแบบต่างๆ ได้ แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถให้ข้อมูลด้านปริมาณที่แม่นยำ เช่น พื้นที่หรือปริมาตร อย่างไรก็ตามสำหรับการประมาณราคาอย่างละเอียด มักมีปัญหากับข้อมูลที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุเนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดลง ไปในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในการคำนวณปริมาณวัสดุโดยใช้ แบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้น สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

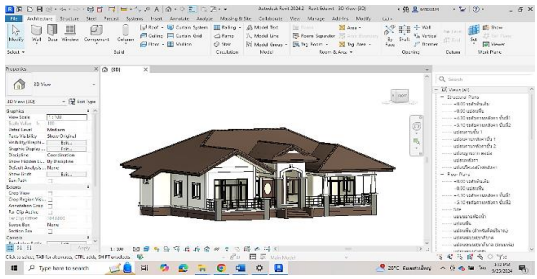
2.3.1 ส่งออกข้อมูลปริมาณงานจากโปรแกรมแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ไปยังโปรแกรมสำหรับการประมาณราคา ในรูปแบบของตารางที่สามารถ นำไปใช้ต่อในโปรแกรมอื่นๆ ที่ใช้ในการประมาณราคา เช่น MS Excel

2.3.2 เชื่อมต่อข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารกับโปรแกรมสำหรับการ ประมาณราคาโดยตรงผ่านเครื่องมือเสริมที่ทำให้ผู้ประมาณราคาสามารถ เชื่อมข้อมูลและราคาของชิ้นต่างๆ เข้ากับชิ้นส่วนในแบบจำลองอาคาร สารสนเทศอาคาร เช่น ค่าแรง ค่าอุปกรณ์ ค่าวัสดุ ฯลฯ

2.3.3 ใช้โปรแกรมสำหรับคำนวณปริมาณงานและประมาณราคาโดยเฉพาะ เป็นการใช้โปรแกรมโดยเฉพาะที่สามารถนำเข้าแบบจำลองสารสนเทศ อาคารมายังโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณปริมาณงานและประมาณราคา โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบจำลองอาคารที่จำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลใหม่ โดยโปรแกรมจะสามารถตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลและแสดงผลแจ้งเตือนออกมาได้

2.4 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับ BIM

เป็นซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของงานด้านอาคาร โดยเฉพาะ ในลักษณะของ CAD โดยใช้หลักการสร้างระบบจำลองสารสนเทศอาคารหรือการสร้างรูปแบบจำลองข้อมูลของอาคาร (Building Information Modeling) แทนการเขียนแบบ โดยใช้เครื่องมือตัวแปรผันเปลี่ยนสัมพันธ์ (Parametric Change Engine) โดยสิ่งที่จะได้ติดตามมาคือแบบก่อสร้าง รายการประกอบแบบต่างๆ ภาพทัศนียภาพ และถอดแบบวัสดุก่อสร้าง รูปแบบของการใช้งานจะเป็น 3 มิติ ดังแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฤทธิ์ทยุต ก้อนทองและคณะ (2565) [5].การศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่สามในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักแพทย์ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุจังหวัดเชียงรายงานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์การนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร มาใช้ในโครงการก่อสร้างที่พักแพทย์ ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุ จังหวัดเชียงราย และเปรียบเทียบ ระหว่างการทำงานด้วยระบบเดิมคือการเขียนแบบสองมิติ (2D CAD) กับการทำงานด้วยระบบจำลองอาคารสารสนเทศ (BIM) ใน 3 ด้าน ของกระบวนการทำงาน BIM ได้แก่ เวลา ต้นทุน และการสื่อสาร พบว่า การทำแบบก่อสร้างด้วยระบบแบบจำลองอาคาร สารสนเทศมิติที่สามของโครงการก่อสร้างที่พักแพทย์ ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุ จังหวัดเชียงราย ช่วยให้เวลาในการทำแบบเสร็จเร็วขึ้นร้อยละ 46 ต้นทุนในการก่อสร้างลดลงเนื่องจากการตรวจพบข้อขัดแย้งในระบบต่างๆ ก่อนการก่อสร้างจริง และทำให้การสื่อสารเกี่ยวกับโครงการก่อสร้างทั้งหมดเป็นไปอย่างราบรื่น เนื่องจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง มีความเข้าใจแบบก่อสร้างตรงกัน

ฤทธิ์ทยุต ก้อนทองและคณะ (2563) [6].การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานเหล็กเสริมคอนกรีตของธุรกิจบ้านจัดสรรงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีBIMกับธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ขนาด SME โดยใช้โครงการบ้านจัดสรรแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่เป็นกรณีศึกษา การศึกษานี้จะนำ BIM ไปใช้กับขั้นตอนการตรวจสอบความสามารถในการก่อสร้างได้ของแบบก่อสร้าง และการประมาณราคาก่อสร้าง ของแบบบ้านจัดสรร 1 ประเภท คือ บ้านขนาดพื้นที่ใช้สอยน้อยกว่า 200 ตารางเมตร ซึ่งจะนำเทคโนโลยี BIM มาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในรูปแบบงานวิธีตัดเหล็กเสริม เพื่อที่จะนำมาศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในการใช้เหล็กในการก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากโปรแกรมทำให้งานวิจัยนี้มีความแม่นยำมากขึ้นในส่วนของการคำนวณซึ่งได้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงจากการศึกษาสรุปได้ว่า BIM สามารถลดขั้นตอนและการสูญเสียเหล็กเส้นด้านต้นทุนในการดำเนินงานในขั้นตอนเหล่านี้ได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ BIM ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะช่วยในขั้นตอนการตัดเหล็กเส้นให้เกิดอัตราสูญเสียที่น้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดทั้งต้นทุนค่าก่อสร้างได้ในจำนวนมากและช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

เมธาสิทธิ์ จันทร์พิทักษ์ และ ธนิต ธงทอง (2554) [7]. ได้ศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเชิงพารามิเตอร์เพื่อการถอดปริมาณวัสดุผนังอิฐก่อ โดยแนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยใช้การออกแบบเชิง พารามิเตอร์ เพื่อถอดปริมาณและสร้างข้อมูลรายละเอียดการก่อชิ้นส่วนอิฐ ในผนังอิฐก่อ โดยการใช้โปรแกรม Dynamo ผ่านซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ในการสร้างชุดคำสั่งเพื่อคำนวณตำแหน่งความยาว และปริมาณของ ชิ้นอิฐก่อ ผลการทดสอบระบบพบว่าใช้เวลาในการถอดปริมาณน้อยและ สามารถให้แสดงผลในรูปแบบสามมิติได้ ซึ่งช่วยเสริมในการมองเห็นรายละเอียดตำแหน่งและความยาวของอิฐก่อได้ สามารถนำข้อมูลของอิฐแต่ ละชิ้นไปคำนวณสร้างรายการตัดอิฐเพื่อนำไปวางแผนการก่อสร้างต่อไป

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

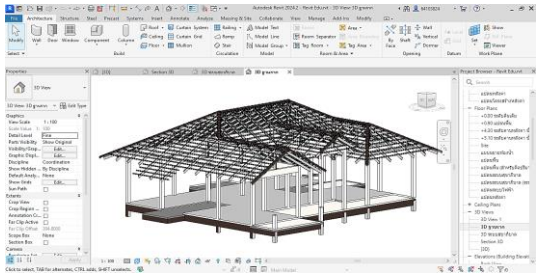
งานวิจัยในครั้งนี้ผู้จัดทำได้แบ่งการวิจัยออกเป็นสองวิธี คือวิธีที่หนึ่งการถอดปริมาณงานระบบประปาจากระบบเดิม และวิธีที่สองการถอดปริมาณงานระบบประปาด้วยระบบ BIM ก่อนที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากสองวิธีมาทำการเปรียบเทียบในส่วนของข้อมูล ปริมาณ ความแม่นยำ เวลาที่ใช้ทำการถอดปริมาณ ขีดจำกัดความสามารถของโปรแกรม เพื่อใช้เป็นการตัดสินใจนำผลการศึกษาไปทดลองในการต่อไปแสดงดังรูปที่ 3.5

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เช่น การประมาณราคา ทฤษฎีของ Building Information Modeling การประมาณราคาด้วย BIM ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และศึกษาเทคนิคการใช้โปรแกรม Microsoft Excel

3.2 ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit

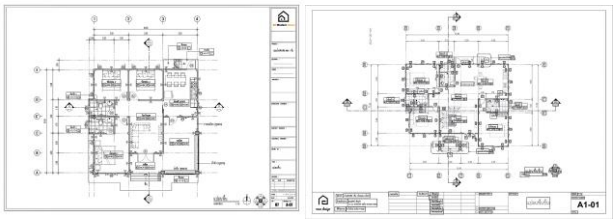
ผู้วิจัยได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit 2024 ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถสร้างแบบจำลองได้ทั้งในส่วนของงานสถาปัตยกรรม งานโครงสร้าง งานระบบ และยังสามารถได้ปริมาณวัสดุจากโปรแกรมดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 : แบบจำลองโครงสร้างบ้านพักอาศัยจาก
ซอฟต์แวร์ Autodesk Revit 2024

3.3 คัดเลือกแบบบ้านพักอาศัยชั้นเดียว

ผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านพักอาศัยชั้นเดียวจำนวน 2 หลัง ขนาด 120 ตารางเมตร และ 145 ตารางเมตรดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 : แบบบ้านพักอาศัยชั้นเดียว

3.4 การถอดปริมาณราคา

ผู้วิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

3.4.1 การถอดปริมาณวัสดุในระบบเดิม

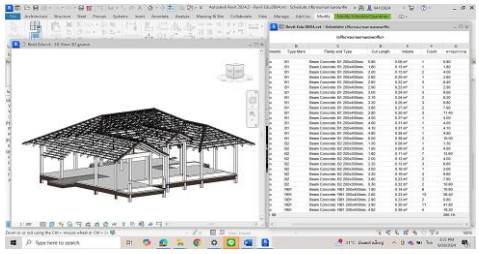
การถอดปริมาณวัสดุในระบบเดิมจะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบโครงสร้างและทำการถอดปริมาณวัสดุแบบละเอียดด้วยการถอดแบบมือ หรือ การปฏิบัติงานจริง เมื่อได้ปริมาณวัสดุนำมาสรุปผลลงโปรแกรม Microsoft Excel ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 : แสดงการถอดปริมาณวัสดุ
ที่มา : https://www.kasikornbank.com/th

3.4.2 การถอดปริมาณวัสดุในระบบ (BIM)

การถอดปริมาณวัสดุในระบบ (BIM) จะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบโครงสร้างและทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปริมาณวัสดุโดย*ซอฟต์แวร์* Autodesk Revit 2024 ดังรูปที่ 6



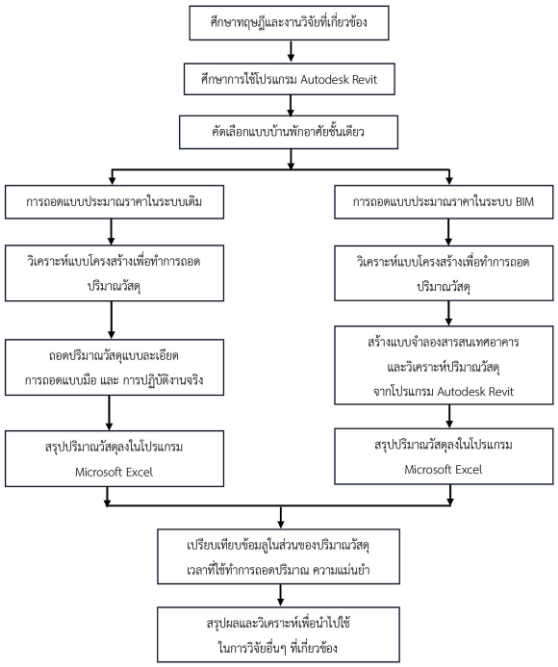
รูปที่ 6 : แสดงการถอดปริมาณวัสดุจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit 2024

3.5 เปรียบเทียบข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการถอดปริมาณวัสดุจากระบบเดิมเป็นการสร้างแบบโดยเป็นรูปแบบ 2 มิติ และจากระบบ (BIM) เป็นการสร้างแบบโดยเป็นรูปแบบทั้ง 2 มิติ 3 มิติ มาเปรียบเทียบข้อมูลในส่วนของปริมาณวัสดุงานระบบประปา จะได้ผลต่างในด้านเวลาที่ใช้ทำการถอดปริมาณ ความแม่นยำของปริมาณวัสดุ

3.6 สรุปผลและวิเคราะห์ผล

นำข้อมูลระบบเดิมมาเปรียบเทียบกับข้อมูลระบบ BIM ในส่วนของระยะเวลา ความสะดวกสบาย ความแม่นยำ และการแก้ไข



รูปที่ 7 : แสดงขั้นตอนการทำวิจัย รูปแบบ Flow chart

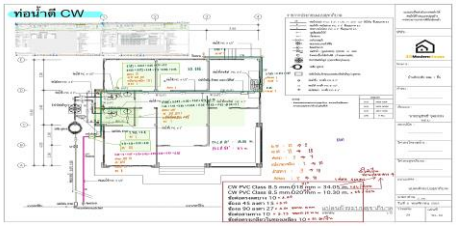
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาการถอดปริมาณวัสดุระบบประปาประกอบด้วย ระบบท่อน้ำดี ระบบท่อน้ำเสีย และระบบท่อโสโครก ระบบเดิมและระบบ BIM มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 บ้านพักอาศัยหลังที่ 1

4.1.1 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุระบบประปา ในระบบเดิม

เป็นการถอดปริมาณโดยใช้แบบแปลนขออนุญาตก่อสร้าง ดังรูปที่ 8 อ้างอิงการถอดปริมาณ:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2554)



รูปที่ 8 : แบบแปลนขออนุญาตก่อสร้าง

โดยการนำข้อมูลที่ถอดปริมาณไปรวบรวมค่าโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยทำงานโดยราคาที่นำมาคิดปริมาณอ้างอิงจาก กรมบัญชีกลาง ปี 2567 [8] ได้ผลว่า

1 ระบบท่อน้ำดี

ท่อ PVC ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 9 ท่อน คิดเป็นราคา 414 บาท ท่อ PVC ขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ท่อน คิดเป็นราคา 165 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด18 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น คิดเป็นราคา 45 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 15 ชิ้น คิดเป็นราคา 77 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 27 ชิ้น คิดเป็นราคา 113 บาท ข้อต่อสามทาง ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 12 ชิ้น คิดเป็นราคา 69 บาท และ ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น คิดเป็นราคา 312 บาท แสดงผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน้าจอแสดงผลโปรแกรม Microsoft Excel

ลำดับ	รายการ	ปริมาณวัสดุแบบเดิม (ถอดมือ)	ราคาต่อ 1 หน่วย (บาท)	ราคาทั้งหมดแบบเดิม (บาท)
1	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ϕ18 mm (ท่อน)	9	46.00	414
2	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ϕ20 mm (ท่อน)	3	55.00	165
3	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ϕ18 mm (ชิ้น)	10	4.45	45
5	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ18 mm (ชิ้น)	15	5.15	77
6	DIN15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ18 mm (ชิ้น)	27	4.20	113
7	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ϕ18 mm (ชิ้น)	12	5.75	69
8	DIN15226-PVC Class 13.5_13_BRASS FAUCET SOCKET (ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง) ขนาด ϕ18 mm (ชิ้น)	10	31.20	312

2 ระบบท่อน้ำเสีย

ท่อ PVC ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 8 ท่อน คิดเป็นราคา 1240 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น คิดเป็นราคา 18 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น คิดเป็นราคา 41 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 14 ชิ้น คิดเป็นราคา 59 บาท และ ข้อต่อสามทาง ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น คิดเป็นราคา 23 บาท แสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 หน้าจอแสดงผลโปรแกรม Microsoft Excel

ลำดับ	รายการ	ปริมาณวัสดุแบบเดิม	ราคาต่อ 1 หน่วย (บาท)	ราคาทั้งหมดแบบเดิม (บาท)
9	W PVC Class 8.5 mm ขนาด ϕ55 mm (ท่อน)	8	155.00	1240
10	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ϕ55 mm (ชิ้น)	4	4.45	18
11	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ55 mm (ชิ้น)	8	5.15	41
12	DIN15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ55 mm (ชิ้น)	14	4.20	59
13	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ϕ55 mm (ชิ้น)	4	5.75	23

3 ระบบท่อโสโครก

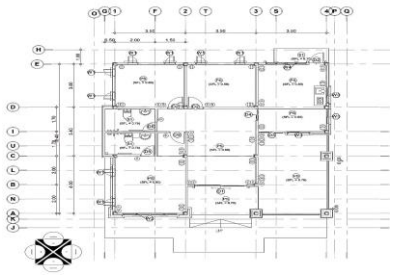
ท่อ PVC ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 ท่อน คิดเป็นราคา 2750 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น คิดเป็นราคา 219 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชิ้น คิดเป็นราคา 2448 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น คิดเป็นราคา 2232 บาท และ ข้อต่อสามทาง ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น คิดเป็นราคา 768 บาท แสดงผลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 หน้าจอแสดงผลโปรแกรม Microsoft Excel

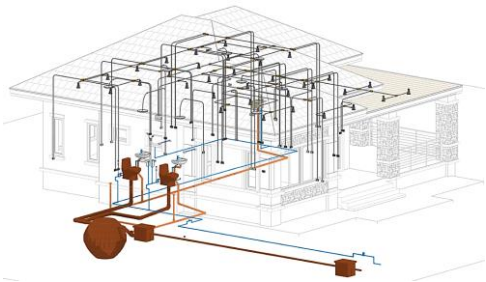
ลำดับ	รายการ	ปริมาณวัสดุแบบเดิม	ราคาต่อ 1 หน่วย (บาท)	ราคาทั้งหมดแบบเดิม (บาท)
14	S PVC Class 8.5 mm ขนาด ϕ100 mm (ท่อน)	5	550.00	2750
15	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ϕ100 mm (ชิ้น)	2	109.50	219
16	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ100 mm (ชิ้น)	6	408.00	2448
17	DIN15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ϕ100 mm (ชิ้น)	8	279.00	2232
18	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ϕ100 mm (ชิ้น)	4	192.00	768

4.1.2 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุระบบประปา ในระบบ BIM

เป็นวิธีการสร้างแบบในส่วนของโครงสร้างด้วย*ซอฟต์แวร์* Autodesk Revit โดยทำการสร้างแบบแปลนของบ้านพักอาศัยและนำส่งข้อมูลต่างๆเข้าไปในโปรแกรมสำเร็จรูปทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น ระยะ ขนาด ลักษณะ เป็นต้นแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติในรูปที่ 9 และแสดงในรูปแบบ 3 มิติแสดงผลในรูปที่ 10



รูปที่ 9 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 2 มิติ



รูปที่ 10 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 3 มิติ

และจากนั้นทำการประมวลผลข้อมูลปริมาณวัสดุระบบประปา แสดงในรูปที่ 11

<ปริมาณท่อ(สุขาภิบาล)>

A	B	C	D	E	F	G
System Abbrevi	Type	Size	Total Length	จำนวนท่อน	ราคา/หน่วย	ราคาทั้งหมด
CW	PVC Class 8.5 mm	ø18 mm	33.97	8	46	391
CW	PVC Class 8.5 mm	ø20 mm	9.50	2	55	131
S	PVC Class 8.5 mm	ø100 mm	10.32	5	550	2750
W	PVC Class 8.5 mm	ø55 mm	25.39	7	155	1049

<ปริมาณท่อ(สุขาภิบาล) Fitting>

A	B	C	D	E	F
System Abbre	Family and Type	Size	จำนวน/ชิ้น	ราคา/หน่วย[	ราคาทั้งหมด
CW	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อลดขนาน): Stand	ø20 mm-ø18 mm	8	4.45	36
CW	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้อต่อ 45&90 บาง): Standard	<varies>	12	5.15	62
CW	DIN15226-PVC Class 13.5_01_SOCKET (ข้อต่อตรง): Standard	ø18 mm-ø18 mm	5	3.48	17
CW	DIN15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้อต่อ 45&90): Standard	ø18 mm-ø18 mm	25	4.20	105
CW	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard	ø18 mm-ø18 mm-ø18 mm	9	5.75	52
CW	DIN15226-PVC Class 13.5_13_BRASS FAUCET SOCKET (ข้อต่อทองเหลืองเกลียวในนอก	<varies>	7	31.2	218
S	DIN15226-PVC Class 8.5_05_TEE-Wye Undefine (สามทาง/ไม่ระบุแน่ชัด): Standard	ø100 mm-ø100 mm-ø100	1	192	192
S	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อลดขนาน): Stand	ø100 mm-ø55 mm	1	109.5	110
S	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้อต่อ 45&90 บาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm	2	408	816
S	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้อต่อ 45&90 บาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm	5	279	1395
S	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm-ø100	1	192	192
W	DIN15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อลดขนาน): Stand	ø55 mm-ø50 mm	2	4.45	9
W	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้อต่อ 45&90 บาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm	4	5.15	21
W	DIN15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้อต่อ 45&90 บาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm	10	4.20	42
W	DIN15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm-ø55 mm	4	5.75	23

รูปที่ 11 : ซอฟต์แวร์ประมวลผลปริมาณวัสดุระบบประปา

พบว่าการถอดปริมาณโดยใช้ระบบ BIM ได้นำข้อมูลที่ถอดปริมาณโดยราคาที่นำมาคิดปริมาณอ้างอิงจากกรมบัญชีกลาง ปี 2567 [8] ได้ผลว่า

1 ระบบท่อน้ำดี

ท่อ PVC ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ท่อน คิดเป็นราคา 391 บาท ท่อ PVC ขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 2 ท่อน คิดเป็นราคา 131 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด18 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น คิดเป็นราคา 36 บาท ข้องอตรง ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น คิดเป็นราคา 17 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 12 ชิ้น คิดเป็นราคา 62 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 25 ชิ้น คิดเป็นราคา 105 บาท ข้อต่อสามทาง ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 9 ชิ้น คิดเป็นราคา 52 บาท และ ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชิ้น คิดเป็นราคา 218 บาท

2 ระบบท่อน้ำเสีย

ท่อ PVC ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 7 ท่อน คิดเป็นราคา 1049 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น คิดเป็นราคา 9 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น คิดเป็นราคา 21 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น คิดเป็นราคา 42 บาท และ ข้อต่อสามทาง ขนาด 55 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น คิดเป็นราคา 23 บาท

3 ระบบท่อโสโครก

ท่อ PVC ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 ท่อน คิดเป็นราคา 2750 บาท ข้อต่อลดบาง ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น คิดเป็นราคา 110 บาท ข้องอ 45 องศา ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น คิดเป็นราคา 816 บาท ข้องอ 90 องศา ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น คิดเป็นราคา 1395 บาท และ ข้อต่อสามทาง ขนาด 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น คิดเป็นราคา 384 บาท

4.2 บ้านพักอาศัยหลังที่ 2

4.2.1 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุระบบประปา ในระบบเดิม

เป็นการถอดปริมาณโดยใช้รายการคำนวณราคาก่อสร้าง (BOQ) ดังรูปที่ 12

	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ราคาวัสดุ		ราคาค่าแรง		ราคารวม
				ราคา/หน่วย	รวม	ราคา/หน่วย	รวม	(บาท)
	รวมราคางาน ระบบไฟฟ้าภายในบ้าน				53,380.00		16,100.00	69,480.00
	งานระบบประปาและสุขาภิบาล							
	งานระบบบ่อดัก	1.00	งาน	18,000.00	18,000.00	6,000.00	6,000.00	24,000.00
	งานระบบบ่อเกรอะ	1.00	งาน	19,200.00	19,200.00	6,000.00	6,000.00	25,200.00
	ถังบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูป	1.00	ถัง	6,500.00	6,500.00	2,000.00	2,000.00	8,500.00
	ท่อวาล์ว	3.00	ชุด	250.00	750.00	500.00	1,500.00	2,250.00
	ถังเก็บน้ำสำเร็จรูป	1.00	ชุด	5,500.00	5,500.00	1,000.00	1,000.00	6,500.00
	ปั๊มน้ำ	1.00	ชุด	6,500.00	6,500.00	1,000.00	1,000.00	7,500.00
	มิเตอร์น้ำประปา	1.00	ชุด	550.00	550.00	200.00	200.00	750.00
	รวมราคางาน ระบบประปาและสุขาภิบาล				57,000.00		17,700.00	74,700.00

รูปที่ 12 : รายการคำนวณราคาก่อสร้าง (BOQ)

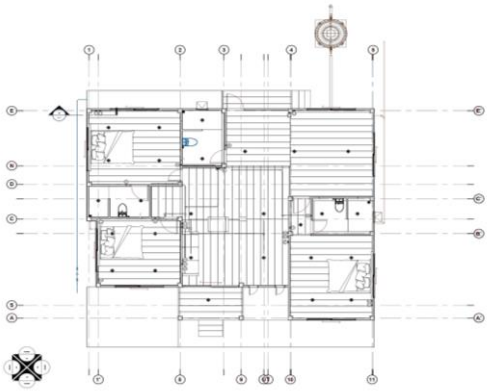
โดยการนำข้อมูลที่ถอดปริมาณไปรวบรวมค่าโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยทำงานโดยราคาที่นำมาคิดปริมาณอ้างอิงจากกรมบัญชีกลาง ปี 2567 [8] ได้ผลว่า ปริมาณงานระบบประปา และสุขาภิบาล ที่ได้จาก BOQ เป็นราคาค่าวัสดุทั้งหมด คิดเป็นราคา 18000 บาท แสดงผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 หน้าจอแสดงผลโปรแกรม Microsoft Excel

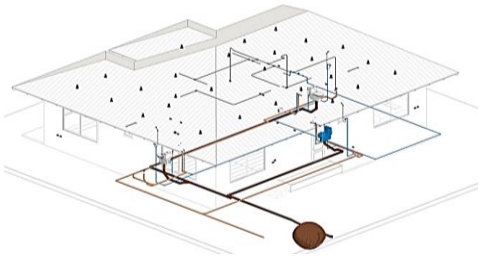
ลำดับ	รายการ	ราคาวัสดุ	
		ราคา/หน่วย	รวม
1	ปริมาณงานระบบประปา และ สุขาภิบาล ที่ได้จาก BOQ	18000	18000

4..2.2 ส่วนของการถอดปริมาณวัสดุระบบประปา ในระบบ BIM

เป็นวิธีการสร้างแบบในส่วนของโครงสร้างด้วย*ซอฟต์แวร์* Autodesk Revit โดยทำการสร้างแบบแปลนของบ้านพักอาศัยและนำส่งข้อมูลต่างๆเข้าไปในโปรแกรมสำเร็จรูปทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น ระยะ ขนาด ลักษณะ เป็นต้นแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติในรูปที่ 13 และแสดงในรูปแบบ 3 มิติแสดงผลในรูปที่ 14



รูปที่ 13 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revitแสดงเป็นรูปแบบ 2 มิติ



รูปที่ 14 : แบบแปลนบ้านพักอาศัยที่ใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit แสดงเป็นรูปแบบ 3 มิติ

และจากนั้นทำการประมวลผลข้อมูลปริมาณวัสดุระบบประปา แสดงในรูปที่ 15

<ปริมาณท่อ (สุขาภิบาล)>

A	B	C	D	E	F	G
System Abbreviation	Type	Size	Length	จำนวนท่อน	ราคา/หน่วย	ราคาทั้งหมด
CW	PVC Class 13.5 mm	ø18 mm	20.79	6	46	276
CW	PVC Class 13.5 mm	ø20 mm	30.18	6	55	330
S	PVC Class 8.5 mm	ø100 mm	33.04	9	550	4950
W	PVC Class 8.5 mm	ø55 mm	48.51	12	155	1860

<ปริมาณท่อ (สุขาภิบาล) Fitting>

A	B	C	D	E	F
ระบบ	Family and Type	Size	จำนวนชิ้น	ราคาต่อหน่วย	ราคาทั้งหมด
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_02_REDUCING SOCKET (ข้อต่อตรงลด): Standard	ø20 mm-ø18 mm	1	4.45	5
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_02_REDUCING SOCKET (ข้อต่อตรงลด): Standard	ø20 mm-ø18 mm	6	4.45	27
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 45&90): Standard	ø18 mm-ø18 mm	4	5.15	21
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 45&90): Standard	ø18 mm-ø18 mm	16	4.20	76
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard	ø18 mm-ø18 mm-ø18	2	5.75	12
CW	DIV15226-PVC Class 13.5_13_BRASS FAUCET SOCKET (ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง)	ø21 mm-ø18 mm	9	31.20	281
S	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45&90 บาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm	10	408	4080
S	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45&90 บาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm	5	279	1395
S	DIV15226-PVC Class 8.5_07_Y DR (สามทางบาง): Standard	ø100 mm-ø100 mm-ø	2	192	384
W	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45&90 บาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm	16	5.15	83
W	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45&90 บาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm	13	4.20	55
W	DIV15226-PVC Class 8.5_07_Y DR (สามทางบาง): Standard	ø55 mm-ø55 mm-ø55	5	5.75	29

รูปที่ 15 : ซอฟต์แวร์ประมวลผลปริมาณวัสดุระบบประปา

พบว่าการถอดปริมาณโดยใช้ระบบ BIM ได้นำข้อมูลที่ถอดปริมาณโดยราคาที่นำมาคิดปริมาณอ้างอิงจากกรมบัญชีกลาง ปี 2567 [8] ได้ผลว่าปริมาณงานระบบประปา และ สุขาภิบาล ที่ได้จากระบบ BIM เป็นราคาค่าวัสดุทั้งหมด คิดเป็นราคา 13864 บาท

4.3 การนำข้อมูลที่ถอดปริมาณจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit มาใช้ในการก่อสร้างจริง

การนำข้อมูลที่ถอดปริมาณจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit มาใช้ในการก่อสร้างจริง พบว่าการถอดปริมาณโดยใช้โปรแกรมสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากช่วยให้การคำนวณปริมาณวัสดุมีความแม่นยำ ลดความผิดพลาดในการประมาณการ และช่วยให้สามารถวางแผนงานก่อสร้างได้อย่างเป็นระบบแสดงดังรูปที่ 16



(ก) (ข)

รูปที่ 16 : (ก) แสดงรูป 3 มิติจากซอฟต์แวร์ Autodesk Revit
(ข) แสดงรูปที่ทำการก่อสร้างจริง

5. วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยการถอดปริมาณวัสดุประปาเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารพักอาศัยได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบในส่วนของการประมาณ ความแม่นยำ เวลา ความสะดวกสบาย พบว่าในส่วนของกระบวนการประมาณวัสดุประปา การถอดปริมาณที่ใช้ระบบสารสนเทศของอาคารสามารถทำได้รวดเร็วกว่า และไม่ต้องใช้โปรแกรมเสริมอื่นๆ มาช่วยในกระบวนการคำนวณ เพราะว่าซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Autodesk Revit สามารถวิเคราะห์และแสดงผลให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวนั้น ผู้วิจัยได้ทำการแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 5-8 ไว้ดังนี้

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุทั้ง 2 แบบ (กรณีถอดแบบละเอียด)

ลำดับ	รายการ	ปริมาณวัสดุระบบเดิม	ปริมาณวัสดุระบบ BIM	ผลต่าง	เปอร์เซ็นต์ต่าง
1	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ø18 mm (ท่อน)	9	8	1	11
2	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ø20 mm (ท่อน)	3	2	1	33
3	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	10	8	2	20
4	DIV15226-PVC Class 13.5_01_SOCKET (ข้อต่อตรง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	7	5	2	29
5	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	15	12	3	20
6	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	27	25	2	7
7	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	12	9	3	25
8	DIV15226-PVC Class 13.5_13_BRASS FAUCET SOCKET (ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง) ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	10	7	3	30
9	W PVC Class 8.5 mm ขนาด ø55 mm (ท่อน)	8	7	1	13
10	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	4	2	2	50
11	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	8	4	4	50
12	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	14	10	4	29
13	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	4	4	0	0
14	S PVC Class 8.5 mm ขนาด ø100 mm (ท่อน)	5	5	0	0
15	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	2	1	1	50
16	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	6	2	4	67
17	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	8	5	3	38
18	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	4	2	2	50

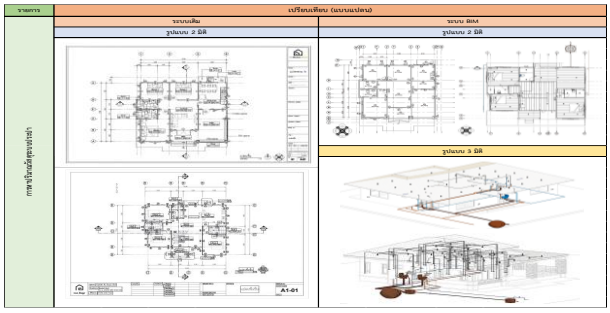
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบราคาวัสดุทั้ง 2 แบบ (กรณีถอดแบบละเอียด)

ลำดับ	รายการ	ราคาต่อ 1 หน่วย (บาท)	ราคาทั้งหมดแบบเดิม (บาท)	ราคาทั้งหมดแบบใหม่ (บาท)
1	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ø18 mm (ท่อน)	46	414	368
2	CW PVC Class 8.5 mm ขนาด ø20 mm (ท่อน)	55	165	110
3	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	4.45	45	36
4	DIV15226-PVC Class 13.5_01_SOCKET (ข้อต่อตรง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	3.48	24	17
5	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	5.15	77	62
6	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	4.20	113	105
7	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	5.75	69	52
8	DIV15226-PVC Class 13.5_13_BRASS FAUCET SOCKET (ข้อต่อตรงเกลียวในทองเหลือง) ขนาด ø18 mm (ชิ้น)	31.2	312	218
9	W PVC Class 8.5 mm ขนาด ø55 mm (ท่อน)	155	1240	1085
10	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	4.45	18	9
11	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	5.15	41	21
12	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	4.20	59	42
13	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø55 mm (ชิ้น)	5.75	23	23
14	S PVC Class 8.5 mm ขนาด ø100 mm (ท่อน)	550	2750	2750
15	DIV15226-PVC Class 8.5_02_REDUCING SOCKET DR (ข้อต่อตรงลดบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	109.5	219	110
16	DIV15226-PVC Class 8.5_04_ELBOW 45&90 DR (ข้องอ 45 องศาบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	408	2448	816
17	DIV15226-PVC Class 13.5_03_ELBOW 45& 90 (ข้องอ 90 องศาบาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	279	2232	1395
18	DIV15226-PVC Class 13.5_06_TEE (ข้อต่อสามทาง): Standard ขนาด ø100 mm (ชิ้น)	192	768	384
		รวม	11017	7602
		ผลต่าง	3415	

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบราคาวัสดุทั้ง 2 แบบ (กรณีถอดแบบเหมา)

ลำดับ	รายการ	ราคาวัสดุ	
		ราคา/หน่วย	รวม
1	ปริมาณงานระบบประปา และ สุขาภิบาล ที่ได้จาก BOQ	18000	18000
2	ปริมาณงานระบบประปา และ สุขาภิบาล ที่ได้จาก Revit	13864	13864
		ผลต่าง	4136

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบการทำงานทั้ง 2 ระบบ



ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบการทำงานทั้ง 2 ระบบ (ต่อ)

รายการ	เปรียบเทียบ (ระยะเวลา)	
การคำนวณปริมาณวัสดุงานประปา	ระบบเดิม	ระบบ BIM
	ใช้เวลาในการทำงาน 2 วัน โดยการคำนวณปริมาณวัสดุระบบประปาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยในการทำและตรวจสอบซึ่งใช้เวลานานในการนับทีท	ใช้เวลาในการทำงาน 3 ชั่วโมง ซึ่งได้จากการทำแบบจำลองของอาคารทั้งหมดในฐานข้อมูลกลาง ทำให้สามารถประมวลผลได้ในทันที
	เปรียบเทียบ (ความสะดวกสบาย)	
	ระบบเดิม	ระบบ BIM
	มีการใช้รูปแบบและสูตรคำนวณของโปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยในการคิดปริมาณวัสดุระบบประปาแต่การคิดปริมาณนั้นจะต้องรอแบบทำเสร็จจากกระบวนการการออกแบบก่อนจึงสามารถเริ่มการทำงานได้	มีรูปแบบการแสดงผลโดยการดึงข้อมูลของอาคารที่ทำการสร้างออกมาทำให้ได้ปริมาณรวดเร็ว
	เปรียบเทียบ (ความแม่นยำ)	
	ระบบเดิม	ระบบ BIM
	ส่วนของแบบต้องเขียนขึ้นมาจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ในการนำมาออกปริมาณ จึงอาจเกิดข้อผิดพลาดได้จากแบบที่ไม่ชัดเจน	มีการสร้างแบบจำลองก่อนการก่อสร้างซึ่งทำให้ทราบปริมาณก่อนตั้งแต่งานออกแบบ
	เปรียบเทียบ (การแก้ไข)	
	ระบบเดิม	ระบบ BIM
	การแก้ไขต้องแก้ไขทั้งในแบบก่อสร้างและการออกปริมาณภาคาในโปรแกรม ทำนักงานจึงจำเป็นต้องใช้เวลาพอสมควร	ถ้ามีการแก้ไขข้อมูลในส่วนแบบ ข้อมูลกลางจะถูกทำการแก้ไขตามไปด้วยโดยอัตโนมัติ

6. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการเปรียบเทียบการคำนวณปริมาณวัสดุงานระบบประปาสำหรับอาคารพักอาศัยด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร สรุปผลได้ดังนี้

6.1 การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถทำได้ดีกว่าระบบเดิมทั้งเรื่องของแบบแปลนก่อสร้าง เวลา ความสะดวกสบาย ความแม่นยำ การแก้ไข สามารถนำไปใช้ต่อยอดในส่วนอื่นไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการวางแผนงาน และสามารถแสดงผลขั้นตอนเป็นรูป 3 มิติของอาคาร ซึ่งทำให้เข้าใจง่าย ขั้นตอนการทำงานไม่ซ้ำซ้อน และเป็นไปตามที่ก่อสร้างจริง

6.2 ระยะเวลา

BIM ช่วยให้ระยะเวลาในการทำแบบก่อสร้างและการประมาณวัสดุงานระบบประปารวดเร็วกว่าการใช้ระบบเดิม เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองได้ทั้ง 2 มิติ 3 มิติ อีกทั้งยังสามารถประมาณราคา แก้ไข และประมวลผลข้อมูลได้โดยทันที โดยไม่ต้องใช้โปรแกรมเสริมมารวบรวมข้อมูล

6.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาที่ซ้ำซ้อน

BIM ช่วยลดความยุ่งยากในกระบวนการทำงาน โดยช่วยให้การถอดปริมาณวัสดุเป็นระบบมากขึ้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเป็นกระบวนการทำงานที่มีความเป็นอัตโนมัติ ลดเวลาที่ใช้ในการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณวัสดุ ทั้งยังช่วยให้สามารถ ตรวจสอบและอัปเดตข้อมูลได้แบบอัตโนมัติ สามารถปรับแผนงานและควบคุมงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ BIM ยังช่วยลดความซ้ำซ้อนในการทำงานและเพิ่มความสะดวกในการประสานงานระหว่างวิศวกร ผู้ออกแบบ และผู้รับเหมา เนื่องจากสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับแบบแปลน ปริมาณวัสดุ และราคาได้อย่างรวดเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาและควบคุมดูแลโครงงานอย่างใกล้ชิด ทั้งยังเป็นผู้ให้คำแนะนำในขั้นตอนการทำโครงงาน และนำเสนอแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณแบบแปลนบ้านจากเจ้าของบ้าน ค.ส.ล ขนาด 120 ตารางเมตร และ 145 ตารางเมตรสำหรับกรณีศึกษาในการทำโครงงานในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อทุกๆท่านที่ได้กล่าวนามข้างต้นและทุกๆท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ซึ่งมีส่วนให้โครงงานเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

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 modeling 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 modeling to the bottom line, pp. 29-30

[3] Autodesk Inc. (2002). Building Information Modelling Autodesk Building industry solution. USA.

[4] บริษัท วี อาร์ ดิจิตอล จำกัด. (2010). Building Information Modelling Autodesk. from https://www.vrdigital.co.th.

[5] ฤทธิ์ทยุต ก้อนทองและคณะ. (2565). “การศึกษาเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศมิติที่สามในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักแพทย์ศูนย์ส่งเสริมสุขภาพและฟื้นฟูผู้สูงอายุจังหวัดเชียงราย”.วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่33 ฉบับที่ 4.

[6] ก้อนทอง ฤ., และคณะ. (2020). “การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการบริหารจัดการงานเหล็กเสริมคอนกรีตของธุรกิจบ้านจัดสรร”. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 25, CEM02.

[7] จันทร์พิทักษ์, ւ., & ธงทอง, ธ. (2022). “การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเชิงพารามิเตอร์เพื่อการถอดปริมาณวัสดุผนังอิฐก่อ”. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, 27, BIM10–1.

[8] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูถัมภ์. (2554) มาตรฐานการคิดปริมาณงานของวิศกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชาชูปถัมภ์.

การศึกษาความเป็นได้ในการใช้แบบจำลองทางวิศวกรรมโยธาเพื่อใช้ในงานก่อสร้างฝายชะลอน้ำกรมชลประทาน มหาวิทยาลัยพะเยา

Feasibility Study on the Application of Civil Information Modeling (CIM) in the Construction of Check Dams by the Royal Irrigation Department. University of Phayao

วัชรากร ข่ายสุวรรณ์[1*] วิราชินี สมงอน[1] ศุมารินทร์ อินทนนท์[1] และ อภิชาติ บัวกล้า[2]

[1]นิสิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย จ.พะเยา
[2]อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย จ.พะเยา
*Corresponding author; E-mail addres: 64102205@up.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยี Civil Information Modeling (CIM) มาใช้ในการก่อสร้าง เพื่อแก้ไขปัญหาแบบงานที่ซับซ้อนในก่อสร้างที่มักเกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างของกรมชลประทานโดยการศึกษาในโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยจะกา แบบฝายน้ำล้น อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรม Autodesk Revit 2024 , Autodesk Infraworks และ Autodesk AutoCAD ในการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดในรูปแบบจำลองแบบดั่งเดิมและมิติที่ 3 เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความผิดพลาดในการทำงานก่อสร้าง อีกทั้งเทคโนโลยี CIM ยังช่วยให้จำลองสภาพแวดล้อมของโครงการให้ละเอียดขึ้น ทำให้สามารถคาดการณ์ปัญหาและควบคุมระยะเวลาก่อสร้างได้ดีขึ้น อีกทั้งช่วยปรับปรุงการสื่อสารระหว่างผู้เกี่ยวข้อง ลดความคลาดเคลื่อนในการถ่ายทอดข้อมูล และปรับเปลี่ยนแบบก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เน้นถึงความสำคัญของการปรับปรุงการสื่อสารระหว่างผู้เกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้าง เพื่อให้ทุกฝ่ายมีความเข้าใจที่ชัดเจนในแบบก่อสร้างเดียวกัน

คำสำคัญ: *แบบจำลองสารสนเทศงานวิศวกรรมโยธา, แบบจำลองมิติที่ 3, อาคารระบายน้ำล้น*

Abstract

Currently, Civil Information Modeling (CIM) technology is being utilized in construction to address complex design issues commonly encountered in projects under the Royal Irrigation Department. This study focuses on the Huai Chaka Reservoir project, specifically the spillway structure, in Li District, Lamphun Province. In this study, Autodesk Revit 2024, Autodesk InfraWorks, and Autodesk AutoCAD were applied to integrate all data into both traditional and 3D models, enhancing accuracy and minimizing construction errors. Additionally, CIM technology enables a more detailed simulation of the project environment, allowing for better issue forecasting and construction timeline management. Furthermore, CIM improves communication among stakeholders by reducing discrepancies in information exchange, enabling quick modifications to construction designs, and ultimately enhancing construction efficiency. The study emphasizes the importance of improving communication among project stakeholders to ensure a shared and precise understanding of the construction design.

Keyword: *Civil Information Modeling (CIM), Modeling 3D, Spillway Building*

1. ที่มาและความสำคัญ

กรมชลประทานมีงานก่อสร้างในระบบของงานเขื่อนทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ซึ่งในงานก่อสร้างปัญหาที่เกิดจากแบบและงานที่ซับซ้อนในโครงการก่อสร้างเขื่อนชลประทานทำให้ส่งผลกระทบต่อการประสานงานระหว่างวิศวกรและผู้รับเหมา อีกทั้งยังส่งผลต่อความคืบหน้าของโครงการโดยรวมด้วย เมื่อแบบไม่ชัดเจนหรือมีความซับซ้อนสูง การตีความและการปฏิบัติตามแบบจึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งส่งผลให้เกิดความเข้าใจผิดระหว่างผู้มีส่วนร่วมในโครงการ เช่น วิศวกร ผู้รับเหมา และคนงานก่อสร้าง นอกจากนี้ยังอาจนำไปสู่ความผิดพลาดในขั้นตอนการก่อสร้าง การใช้ทรัพยากรที่ไม่เหมาะสม หรือการเปลี่ยนแปลงแบบแผนงานในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้เกิดความล่าช้าและค่าใช้จ่ายที่บานปลาย

แบบจำลองทางวิศวกรรมโยธา (Civil Information Modeling: CIM) คือคือกระบวนการสร้าง แบบจำลองสารสนเทศสำหรับ

โครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา โดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการรวบรวม วิเคราะห์ และจัดการข้อมูลตลอดวงจรชีวิตของโครงการ เช่น ถนน สะพาน ระบบระบายน้ำ และโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ CIM ช่วยให้การออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษามีความแม่นยำยิ่งขึ้น ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการโครงการ โดยมักผสานกับข้อมูลภูมิสารสนเทศ (GIS) เพื่อจำลองผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากแบบในโครงการก่อสร้างเขื่อนชลประทาน จึงจัดทำวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แบบจำลองทางวิศวกรรมโยธาเพื่อใช้ในงานก่อสร้างฝายชะลอน้ำกรมชลประทาน เพื่อแก้ปัญหาและปรับปรุงการดูแบบงานที่ซับซ้อนจากแบบดั่งเดิม ที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากแบบจำลองมิติที่ 3 ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงการก่อสร้างตามเวลาจริงและช่วงเวลาในอนาคต ให้ทีมงานสามารถเห็นภาพรวมของโครงการทั้งหมด รวมถึงระยะเวลาการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน ทำให้สามารถจัดการทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การสั่งซื้อวัสดุ การจัดกำลังคน และการวางแผนการใช้เครื่องจักร การก่อสร้างมักมีหลายฝ่ายที่ต้องทำงานร่วมกัน เช่น สถาปนิก วิศวกร และผู้รับเหมา ช่วยให้ทุกฝ่ายสามารถเห็นภาพรวมและตารางเวลาเดียวกัน ช่วยลดความขัดแย้งและปัญหาการสื่อสาร

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทราบแนวทางการใช้ CIM ในงานก่อสร้างฝายน้ำล้น

1.2.2 เพื่อทราบถึงผลกระทบในการใช้ CIM ในงานก่อสร้างฝายน้ำล้น

1.2.3 เพื่อทราบถึงแนวทางการพัฒนาและการปรับใช้ CIM ในงานก่อสร้างฝายน้ำล้น

1.3 ขอบเขตพื้นที่

1.3.1 พื้นที่เขตเมืองขนาดเล็กในจังหวัดลำพูน

1.3.2 โปรแกรม (Software)

- Autodesk Revit 2024 (Student License)
- Autodesk Infraworks (Student License)
- Autodesk AutoCAD (Student License)

1.4 ประโยชน์งานวิจัย

1.4.1 ได้นำขั้นตอนเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคารแบบมิติที่ 3 มาใช้ในงานก่อสร้าง

1.4.2 ได้วิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากแบบที่ซับซ้อน

1.4.3 ได้นำผลการศึกษาไปปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในการออกแบบจำลอง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การก่อสร้างเขื่อนขนาดเล็ก

เขื่อนเป็นสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่สำหรับกั้นทางน้ำ เพื่อใช้ในการเก็บกักน้ำและ ป้องกันอุทกภัย รวมถึงผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนบนของเขื่อนจะประกอบไปด้วยส่วนที่เรียกว่าทางน้ำล้นสำหรับให้น้ำที่สูงกว่าระดับที่ต้องการไหลผ่านมาที่ฝั่งปลายน้ำ มากกว่าครึ่งหนึ่งของแม่น้ำสายหลักทั่วโลกจะมีเขื่อนกั้นไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในทางใดทางหนึ่ง

2.1.2 ชนิดของเขื่อน ชนิดของเขื่อนแบ่งตามวัสดุก่อสร้างจะมี 2 ชนิด คือ เขื่อนคอนกรีต (Concrete Dam) และเขื่อนดินถม (Embankment Dam)

- เขื่อนคอนกรีตคือเขื่อนที่สร้างด้วยคอนกรีตแบบกั้นแรงดันของน้ำด้วย น้ำหนัก
- เขื่อนดินถมคือเขื่อนที่ก่อสร้างจากวัสดุที่เป็นดินและหิน นำมาบดอัดเป็นตัวเขื่อน มีฐานแผ่ออกไปมีส่วนสันแคบลง เมื่อพิจารณารูปตัดจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างจะใช้วัสดุธรรมชาติที่อยู่ใน บริเวณนั้น เนื่องจากต้องใช้ในปริมาณที่มาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนย้ายมากจากที่ห่างไกล เขื่อนดินถมจึง เหมาะกับที่ที่มีช่องเขาที่มีลักษณะผายกว้างและไหลเขาไม่ชันมากนัก ลักษณะนี้จะมีความแข็งแรงมากไม่ซับซ้อน แข็งแรงมากเหมือนกับเขื่อนคอนกรีต จึงเหมาะกับสภาพภูมิประเทศและธรรมชาติวิทยาของประเทศไทย

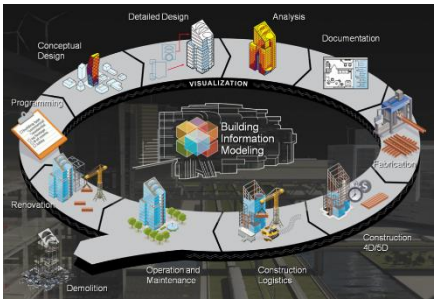
2.1.3 การแบ่งขนาดของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ การแบ่งขนาดของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำจะแบ่ง ออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ โดยพิจารณาจากปัจจัยความสูงของเขื่อน ความจุอ่างเก็บน้ำ การจัดหาที่ดินเพื่อการก่อสร้าง งบประมาณ และระยะเวลาในการก่อสร้างเป็นต้น กรมแบ่งตามความจุอ่างเก็บน้ำ โดยที่เขื่อนขนาดเล็กเป็นเขื่อนที่มีความสูงไม่เกิน 15.00 เมตร ความจุของอ่างเก็บน้ำไม่เกิน 1 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งงบประมาณการก่อสร้างน้อยกว่า 15 ล้านบาท ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการจัดหาที่ดินส่วนที่เป็นอ่างเก็บน้ำและ บริเวณหัวงานสามารถก่อสร้างแล้วเสร็จภายในหนึ่งปีและส่วนใหญ่ไม่มีความยุ่งยากในการปรับปรุงฐานราก



รูปที่ 1 เขื่อนขนาดเล็ก
ที่มา : https://www.facebook.com/photo/?fbid=2805839889713835&set=pcb.280589174970864

2.2 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

กระบวนการของการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เป็นกระบวนการสร้างแบบจำลองมิติที่ 3 ของอาคารขึ้นมาเพื่อช่วยให้สามารถเห็นปัญหาและช่วยลดข้อผิดพลาดที่กระบวนการทำงานในลักษณะมิติที่ 2 ในลักษณะเดิมอาจจะไม่สามารถพบได้ง่าย ซึ่งแบบจำลอง BIM มีความสามารถในการแสดงผลของแบบจำลองอาคารให้อยู่ในรูปแบบของมุมมอง (Views) ในลักษณะต่างๆ ที่เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน ทั้งในมุมมองผังพื้น รูปด้าน รูปตัดมิติที่ 3 หรือทัศนียภาพ เป็นต้น และนอกเหนือจากแบบจำลองในรูปแบบของโมเดลมิติที่ 3 แล้ว แบบจำลอง BIM ยังสามารถแสดงผลในรูปแบบของตารางแสดงรายการข้อมูลต่าง ๆ ได้ เช่น ตารางแสดงพื้นที่ใช้สอย ตารางการถอดปริมาณวัสดุในเรื่องต่าง ๆ เป็นต้น นั่นแสดงว่าในแบบจำลอง BIM นั้น จะมีการบันทึกข้อมูลฝังลงไปในแบบจำลองอยู่ด้วย ทำให้แบบจำลองโมเดล BIM ที่พัฒนาขึ้นมีทั้งส่วนประกอบของโมเดลชิ้นส่วนขององค์ประกอบอาคาร และส่วนข้อมูลประกอบขององค์ประกอบนั้น ๆ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถนำโมเดล BIM มาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2 แบบจำลองอาคารสารสนเทศ
ที่มา : https://www.nipponpaintdecor.com/get_idea/building-information-modeling-bim/

2.3 กระบวนการสร้าง แบบจำลองข้อมูลสารสนเทศสำหรับโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา

คือกระบวนการสร้าง แบบจำลองข้อมูลสารสนเทศสำหรับโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา โดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการรวบรวม วิเคราะห์ และจัดการข้อมูลตลอดวงจรชีวิตของโครงการก่อสร้าง เช่น ถนน สะพาน ระบบระบายน้ำ หรือโครงสร้างพื้นฐานอื่น

CIM เป็นแนวคิดที่คล้ายกับ Building Information Modeling (BIM) แต่เน้นไปที่โครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่อยู่นอกอาคาร ซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ การขนส่ง และระบบสาธารณูปโภค

2.3.1 องค์ประกอบสำคัญของ CIM

- สร้างแบบจำลองดิจิทัลของโครงสร้าง เช่น ถนน เขื่อน หรือระบบขนส่ง
- รวมข้อมูลภูมิสารสนเทศ (GIS) กับแบบจำลอง CIM เพื่อให้เห็นภาพรวมของพื้นที่โครงการ
- วิเคราะห์ผลกระทบของโครงการ เช่น น้ำท่วม การจราจร หรือสิ่งแวดล้อม

2.3.2 ประโยชน์ของ CIM

- เพิ่มความแม่นยำของการออกแบบ ⟶ ลดข้อผิดพลาดและปรับปรุงคุณภาพ
- ลดต้นทุนและเวลาการก่อสร้าง ⟶ ตรวจสอบปัญหาล่วงหน้าผ่านแบบจำลอง
- ปรับปรุงการบำรุงรักษา ⟶ บริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐานได้ดีขึ้น ส่งเสริมความยั่งยืน ⟶ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
  การตัดสินใจที่ดีขึ้น ⟶ ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถดูแบบจำลองและข้อมูลประกอบการตัดสินใจได้ง่าย

2.3.3 เครื่องมือที่ใช้ใน CIM

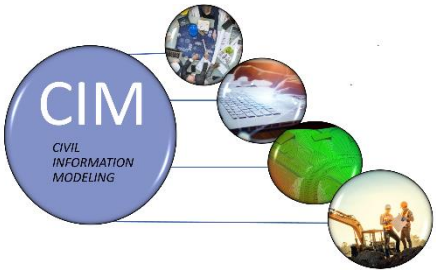
- Infraworks⟶จำลองและวิเคราะห์ สภาพแวดล้อมแบบมิติที่ 3

2.3.4 ตัวอย่างการนำ CIM ไปใช้จริง

โครงการระบายน้ำและชลประทาน ⟶ ใช้ CIM วิเคราะห์การไหลของน้ำและป้องกันน้ำท่วม

Civil Information Modeling (CIM) เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้วิศวกรและนักออกแบบสามารถจำลอง วิเคราะห์ และบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ CIM ช่วยลดต้นทุน เพิ่มความแม่นยำ และทำให้การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานมีความยั่งยืนมากขึ้น หากต้องการนำ CIM ไปใช้ในโครงการจริงควรเลือกซอฟต์แวร์และเครื่องมือ

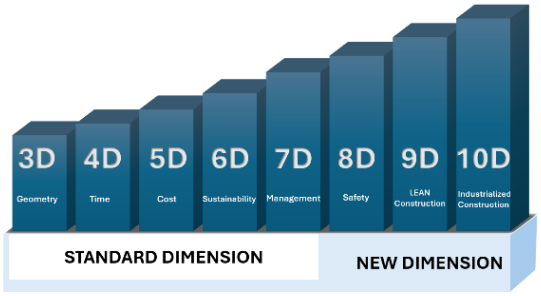
ที่เหมาะสม รวมถึงผสาน GIS และเทคโนโลยีดิจิทัลอื่น ๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพสูงสุด



รูปที่ 3 Civil Information Modeling
ที่มา : https://www.eci3d.com/blog/top-4-ways-to-enhance-earthwork-efficiency-through-cim

2.4 BIM Dimension

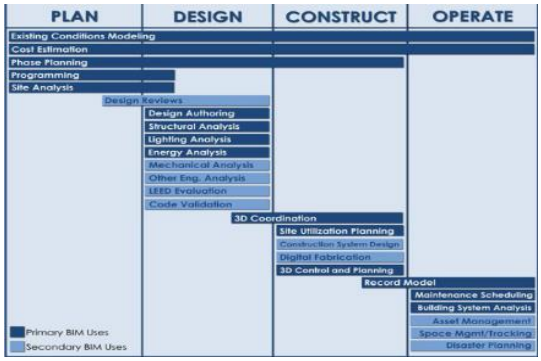
เป็นกระบวนการที่ช่วยสนับสนุนการพัฒนาการบริการจัดการการทำงานในโครงการตั้งแต่เริ่มต้นโครงการช่วงการออกแบบ การก่อสร้างจนถึงการใช้และดูแลรักษาอาคารรวมถึงการจัดการข้อมูล (Information) เพื่อสนับสนุนให้ผู้เกี่ยวข้องในโครงการสามารถสื่อสารประสานงานกันโดยใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน (Single Source of Truth) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันเป็นยุคของการทำ Big Data ซึ่งการทำ BIM มีเรื่องของข้อมูล (Information) ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน เพื่อให้ง่านต่อการความเข้าใจ จึงนำข้อมูลที่เกิดขึ้นมาแบ่งตามความละเอียดของข้อมูลและตามประเภทการทำงาน BIM



รูปที่ 4 กระบวณการของระบบ BIM
ที่มา : https://www.vrdigital.co.th/vr/2023/01/01/building-information-modeling-bim/

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

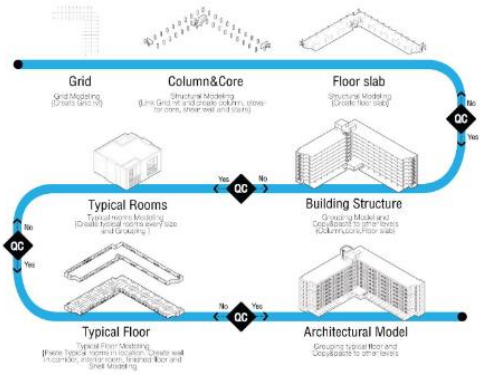
อลีนา ธรรมสอน และคณะ (2566) ทำวิจัยศึกษาข้อกำหนดขอบเขตของงานที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารของงานจ้างออกแบบสำหรับโครงการอาคารของรัฐที่ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในปัจจุบันจากการศึกษาพบว่าข้อกำหนดเกี่ยวกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารโครงการอาคารหน่วยงานของรัฐยังคงขาดรายละเอียดตามองค์ประกอบที่สำคัญอยู่มาก ได้แก่ การใช้ประโยชน์แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM Uses)แผนปฏิบัติงานมาตรฐาน การสื่อสารเทคโนโลยีโครงสร้างแบบจำลอง (Model Structure)ทีมแบบจำลองสารสนเทศอาคาร การประชุมโครงการ และการควบคุมคุณภาพ ซึ่งมีการกำหนดตามองค์ประกอบดังกล่าวให้ครบถ้วนเพื่อให้ขอบเขตของงานมีความสมบูรณ์และช่วยให้การจ้างออกแบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับรายละเอียดขององค์ประกอบแต่ละข้อสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากแผนปฏิบัติงานด้วยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM Execu ion Plan) ตามแนวทางหรือมาตรฐานแบบจำลองสารสนเทศอาคาร



รูปที่ 5 ประโยชน์แบบจำลองสารสนเทศอาคารตลอดวงจรชีวิต
ที่มา : https://so05.tci-thaijo.org/index.php/sarasatr/article/view/259125/177880

สรรพวัฒน์ จตุพัฒน์วรางกูร (ธันวาคม 2561) ทำวิจัยในหัวข้อการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อประมาณการมูลค่างานก่อสร้าง มีเป้าหมายที่จะหาแนวทางในเชิงเทคนิคในการกำหนดขั้นตอนและวิธีการสร้างแบบจาลองให้เหมาะสมต่อการประมาณการ โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อศึกษาแนวความคิดปัจจัยและกรอบการปฏิบัติที่เป็นเลิศ (Best Practice) ในการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม 2) เพื่อกำหนดแนวทางและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองให้เหมาะกับการประมาณค่าก่อสร้าง 3) เพื่อเสนอตัวอย่างการจัดการรายการวัสดุจากแบบจำลอง 4) เพื่อสร้างเทคนิคและวิธีการถอดปริมาณให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมและบริหารต้นทุน ทั้งนี้การทดลองและสร้างแบบจำลองสามมิติเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยใช้ซอฟแวร์ Autodesk Revit Autodesk

Naviswork และ Microsoft Office Excel เป็นเครื่องมือสาหรับการทดลอง แบบจำลองในหมวดงานสถาปัตยกรรม โครงสร้างบางส่วน โดยใช้ตัวอย่างมาตรฐานรูปแบบอาคารและวัสดุจากบริษัท แอล.พี.เอ็ น.ดี เวลลอปเมนท์ จำกัด (มหาชน) มาเป็นตัวอย่างการพัฒนาแบบจำลองนี้ผลการวิจัยสามารถเสนอแนวทาง รวมถึงปัจจัยในการกำหนดและบริหารต้นทุนที่สนับสนุนการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว รวมทั้งรูปแบบการสร้างแบบจำลองสามมิติ การกำหนดรูปแบบรายการวัสดุ (Material Template) และวิธีการถอดปริมาณ (Quantity Take Off) ที่มี ประสิทธิภาพในช่วงเวลาดำเนินการที่เหมาะสม ซึ่งผลงานวิจัยนี้สามารถเป็นตัวอย่างที่ดี สามารถตอบสนองและตรงตามความต้องการผู้ที่ต้องการใช้แบบจำลองในเกณฑ์ที่คล้ายเคียงกันได้ดี เพียงแต่มีขั้นตอนอยู่ที่หลักเกณฑ์ของบัญชี แสดงปริมาณวัสดุและราคา (Bill of Quantity: BOQ) แต่ละองค์กรมีวิธีจัดการและเป้าหมายของการใช้การประการไม่เหมือนกัน จึงต้องนำงานวิจัยมาใช้เป็นตัวอย่างประยุกต์



รูปที่ 6 Modeling procedure
ที่มา : https://so04.tci-thaijo.org/index.php/archkmitl/article/view/170340/122437

สมจินตนา แขนงแก้ว และคณะ (2567) ทำวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร5 มิติที่ผสานข้อมูลมิติทางด้านแผนงานก่อสร้างและราคาค่าก่อสร้างเข้ากับแบบจำลอง 3 มิติเพื่อปรับปรุงการถอดปริมาณงานเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit และบัญชีแสดงปริมาณวัสดุและราคา(BOQ) สำหรับโครงการก่อสร้างอาคารเรียนรู้และปฏิบัติการ4 ชั้นวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา จากการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร5 มิติเพื่อการถอดปริมาณงานของโครงการก่อสร้างสามารถลดระยะเวลาในการทำงานตรวจสอบความถูกต้องของแบบก่อสร้างลดข้อผิดพลาดจากการถอดปริมาณงานสนับสนุนและเพิ่มความเข้าใจในการทำงานของผู้ประมาณราคาได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมจากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit และ บัญชีแสดงปริมาณวัสดุและราคา (BOQ)พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ยของงานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรมและงานสุขาภิบาลมีค่าน้อยกว่า2.69%, 4.12% และ 8.43% ตามลำดับสามารถสรุปได้ว่าปริมาณงานจากโปรแกรมAutodesk Revit มีความแม่นยำมากกว่าเนื่องจากวิธีการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมมีการวัดปริมาณงานซ้ำซ้อนเช่นการวัดปริมาณงานคอนกรีตโครงสร้างประกอบด้วยงานคอนกรีตพื้นคานและเสาโดยที่โครงสร้างทั้ง 3 ส่วนซ้อนทับกันทำให้การวัดปริมาณงานซ้ำซ้อนแตกต่างกับปริมาณงานจากโปรแกรมAutodesk Revit ที่วัดปริมาณงานเฉพาะโครงสร้างแต่ละส่วน



รูปที่ 7 แบบจำลองมิติที่ 3 โครงการก่อสร้างอาคารเรียนรู้และปฏิบัติการ 4 ชั้น วิทยาลัยเทคนิคนครราชศรีมา
ที่มา : https://so05.tci- thaijo.org/index.php/sarasatr/article/download/270776/182029/1100644

3. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การนำเทคโนโลยีระบบแบจำลองสารสนเทศอาคารมาใช้สำหรับงานกรมชลประทาน มีขั้นตอนการศึกษาทั้งหมด 7 ขั้นตอน โดยจะอธิบายดังนี้

3.1 ทบทวนวรรณกรรม

เพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายสามารถเข้าถึงข้อมูลและเห็นภาพรวมของโครงการได้อย่างชัดเจน โดยประกอบด้วยทฤษฎีและองค์ความรู้ที่สามารถเรียนรู้และนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาได้ ดังนี้

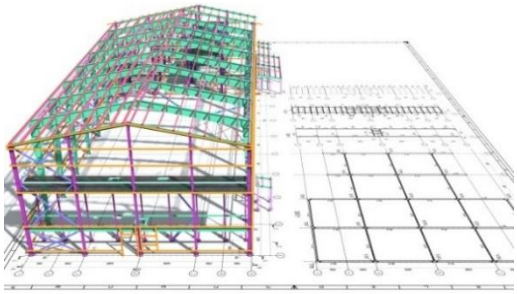
3.1.1 การก่อสร้างเขื่อนขนาดเล็ก
3.1.2 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร
3.1.3 Civil Information Modeling (CIM)
3.1.4 BIM Dimension

3.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม Autodesk Revit

3.2.1 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองสารสนเทศจากโปรแกรม Autodesk Revit 2024 เป็นการสร้างแบบจำลองมิติที่ 3 ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบ โปรแกรมนี้สามารถทำงานร่วมกับข้อมูลหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองโครงสร้าง อาคาร หรือระบบไฟฟ้า และประปาทำให้สามารถเห็นภาพรวมของโครงการและทำการปรับปรุงแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการจัดการข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุและการทำงานที่มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

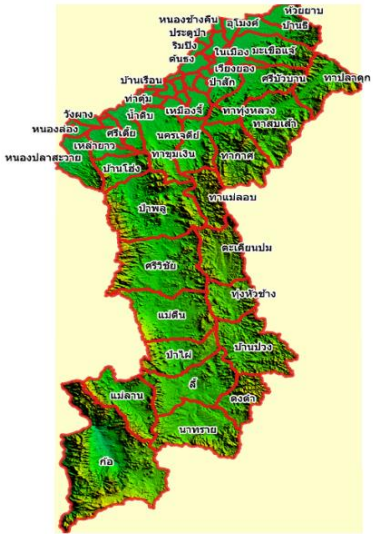
3.2.2 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองสารสนเทศจากโปรแกรม Autodesk Infraworks ในการสร้างแบบจำลองภูมิทัศน์และโครงสร้างพื้นฐานเชิงวิศวกรรมที่มีขนาดใหญ่ โปรแกรมนี้สามารถสร้างภาพจำลองของโครงการในระดับมหาภาคเพื่อให้เห็นถึงการวิเคราะห์ภูมิทัศน์และการจัดการทรัพยากรที่สมบูรณ์มากขึ้น ช่วยให้ทีมงานสามารถวางแผนและออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน เขื่อน หรือระบบระบายน้ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



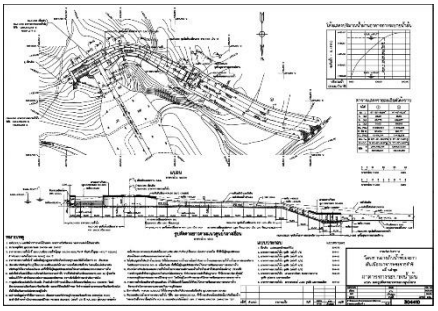
รูปที่ 8 แบบจำลองสารสนเทศอาคาร
ที่มา : https://bimspaces.com/blog/what-is-bim-how-important-is-the-real-estate-industry/#

3.3 ดำเนินการเลือกแบบเพื่อจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกแบบโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยจะกา อ.ลี้ จ.ลำพูน เนื่องจากแบบงานมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีและนโยบายที่เหมาะสมเพื่อนำมาลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองดูจากแบบรูปที่ 9



(A)

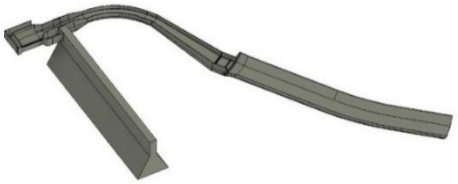


(B)

รูปที่ 9 แผนที่บริเวณอ่างเก็บน้ำ (A) , แบบแปลนฝายน้ำล้น อ.ลี้ จ.ลำพูน (B)

3.4. สร้างแบบจำลองจากแบบของกรมชลประทาน

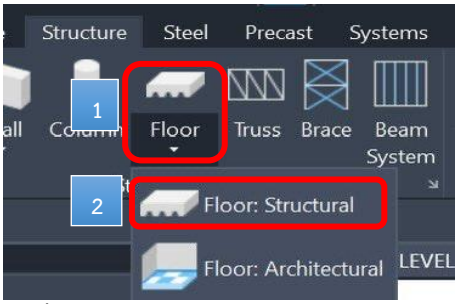
ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแบบของกรมชลประทานที่จะนำมาสร้างในเทคโนโลยีระบบแบบจำลองสารสนเทศ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองในส่วนของ อาคารระบายน้ำล้น โดยรายละเอียดขององค์ประกอบที่ถูกนำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองนั้นประกอบไปด้วย ระดับ(ร.ท.ก) และมิติต่างๆ ในหน่วยเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร ดังแสดงรูปที่ 10



รูปที่ 10 แบบจำลองอาคารระบายน้ำล้น (Spillway)

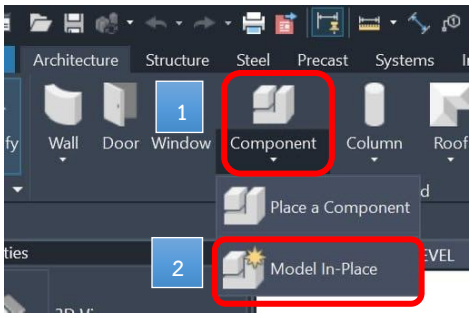
3.5 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองใน Autodesk Revit

3.5.1นำแปลนรูปตัดจาก Autodesk AutoCAD นำมาใส่ใน Autodesk Revit โดยสร้างแผ่นพื้นขึ้นเป็นอันดับแรกจากคำสั่ง Structure⟶ Fool: Structural ดังแสดงรูปที่ 11

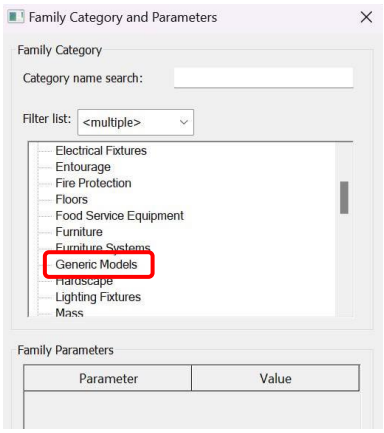


รูปที่11 นำแปลนรูปตัดจาก Autodesk AutoCAD ใส่ใน Autodesk Revit

3.5.2 ทำการสร้าง Model ด้านข้าง จากแปลนรูปตัดโดยแยกทีละรูปตัด ก,ข และ ค ตามความยาวที่แบบกำหนดจากคำสั่ง ดังแสดงรูปที่ 12 และ รูปที่ 13

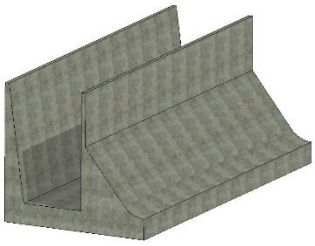


รูปที่ 12 คำสั่ง Component⟶ Model In Place



รูปที่ 13 ขั้นตอนการสร้าง Family Category & Parameters

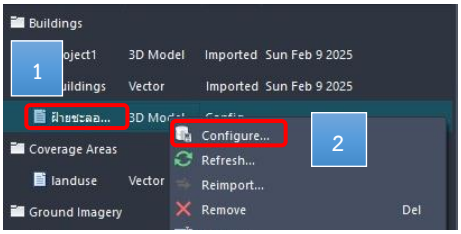
3.5.3 เมื่อทำการสร้าง Model ตามขนาดที่รูปตัดได้กำหนดไว้จะได้ดังรูปที่ 15 และในส่วนอื่นๆทำตามขั้นตอนที่ 4.1.2 ตามลำดับ



รูปที่ 14 จุดเริ่มต้นอาคารระบายน้ำล้น

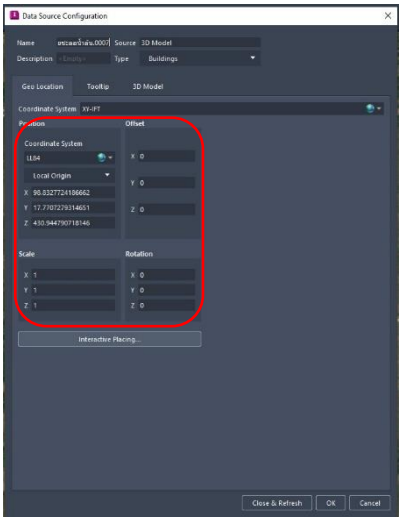
3.6 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลองมิติที่ 3 ใน Autodesk Infraworks

3.6.1 นำแบบจำลองที่ได้จาก Autodesk Revit เข้า Autodesk Infraworks จากนั้นคลิ๊กขวาไฟล์ที่นำเข้า ดังรูปที่ 167



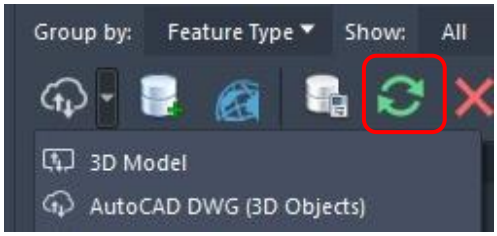
รูปที่ 15 นำแบบจำลองจาก Revit เข้า Autodesk Infraworks

3.6.2 จากนั้นจะแสดงค่าพิกัดแล้วกด OK ดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 ค่าพิกัด

3.6.3 กด Refesh เพื่อแสดงแบบจำลองในพื้นที่เสมือนจริง ดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 17 กด Refesh เพื่อแสดงแบบจำลอง



รูปที่ 18 แบบจำลองฝายน้ำล้น

3.7 สอบถามผู้ที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการสอบถามความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานจากผู้ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยวิศวกรและช่าง จำนวน 4คน โดยมีคำถามดังต่อไปนี้

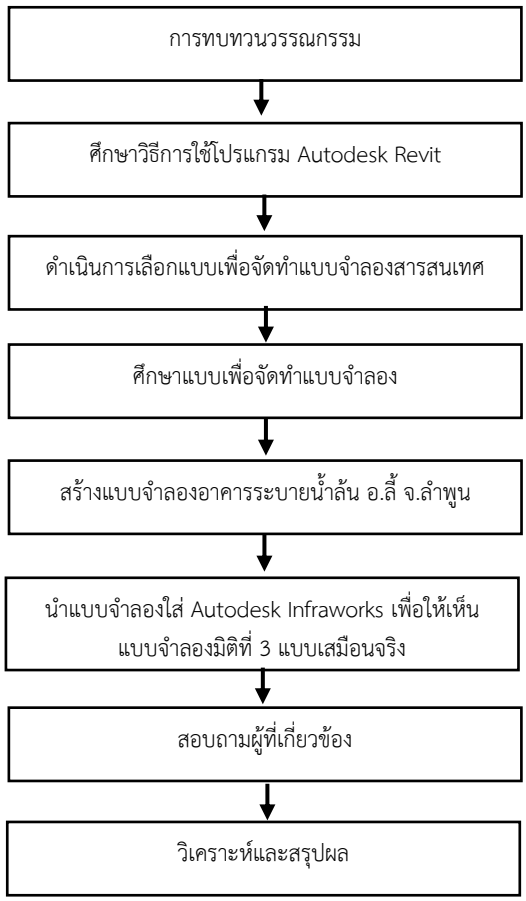
1. ท่านมีความพึงพอใจใน CIM โดยรวมมากน้อยเพียงใด
2. ท่านพบปัญหา CIM หรือไม่ หากพบโปรดระบุ
3. ฟังก์ชั่นการทำงานของ CIM ชัดเจนและเข้าใจง่ายหรือไม่
4. ระบบ CIM มีการปรับแต่งฟิวเจอร์ตามความต้องการขององค์กรท่านหรือไม่
5. CIM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างอย่างไรเมื่อเทียบกับวิธีดั่งเดิม

3.8 วิเคราะห์และสรุปผล

การใช้ CIM ในโครงการก่อสร้างเขื่อนชลประทานช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ลดข้อผิดพลาด และความไม่แน่นอนในกระบวนการออกแบบและการก่อสร้างร่วมกับซอฟต์แวร์เฉพาะทาง เช่น AutoCAD, Revit และInfraWorks ซึ่งช่วยให้การวิเคราะห์และวางแผนมีความแม่นยำสามารถติดตามสภาพโครงการแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งประเมินความเสี่ยงและคาดการณ์ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น

สรุปผลการดำเนินงาน

การใช้เทคโนโลยี CIM ในโครงการก่อสร้างเขื่อนชลประทานช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวางแผนและก่อสร้าง ลดปัญหาและข้อผิดพลาด ทำให้โครงการดำเนินไปตามแผนอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด พร้อมสรุปผลและจัดทำแผนการทำงานอย่างเป็นระบบดังแสดงรูปที่ 19



รูป 19 ผลการดำเนินการ

4. ผลการวิจัย

การวิจัยในบทนี้ดำเนินการตามแผนงานวิจัย โดยศึกษางานก่อสร้างจากแบบและแผนงานที่อ้างอิงจากโครงการของกรมชลประทาน ในส่วนของอาคารระบายน้ำล้น อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน โดยมีเป้าหมายเพื่อออกแบบองค์ประกอบในแบบก่อสร้าง และนำข้อมูลที่ได้มาสร้าง แบบจำลองมิติที่3 ใน Autodesk Revit 2024 เพื่อให้โครงสร้างมีความแม่นยำและครบถ้วน จากนั้นจะนำแบบจำลองเข้าสู่ Autodesk InfraWorks เพื่อตรวจสอบและจัดวางในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเหมาะสมของโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขั้นตอนการจัดทำ ดังนี้

4.1 ข้อมูลการสัมภาษณ์ถามความพึงพอใจในการสร้างแบบจำลองมิติที่ 3

ผู้วิจัยได้ทำการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานชลประทาน กองพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง สำนักงานก่อสร้างชลประทานขนาดกลาง ที่ 1 ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ วิศวกรชลประทาน นายช่างชลประทาน นายช่างสำรวจ ช่างก่อสร้าง ผู้ตอบแบบสอบถามขอสงวนชื่อและนามสกุล โดยหัวข้อการสัมภาษณ์ ดังนี้

4.1.1 ด้านเวลา

- คุณคิดว่าการสร้างแบบจำลองมิติที่ 3 ใช้เวลา มากกว่าการใช้แบบ 2 มิติหรือไม่? เพราะเหตุใด?
- การตรวจสอบข้อขัดแย้งระหว่างระบบในแบบมิติที่ 3 ช่วยลดเวลาการทำงานได้หรือไม่?

4.1.2 ด้านการจำลองโครงสร้าง

- การใช้แบบจำลองมิติที่ 3 ช่วยให้คุณเข้าใจ โครงสร้างโครงการดีขึ้นหรือไม่?
- ซอฟต์แวร์ที่คุณใช้รองรับการจำลองเสมือน จริง (AR/VR) หรือเทคโนโลยีอื่นที่ทันสมัยหรือไม่?

4.1.3 ด้านการประสานงาน

- แบบจำลองมิติที่ 3 ช่วยให้การสื่อสารและการประสานงานกับทีมงานต่างสาขาง่ายขึ้นหรือไม่?
- คุณพบปัญหาใดในการใช้แบบจำลองมิติที่ 3 ร่วมกับทีมงาน?

4.1.4 ด้านความเข้าใจ

- คุณคิดว่าแบบจำลองมิติที่ 3 ทำให้ข้อมูลโครงการเข้าใจง่ายขึ้นหรือไม่?
- การแสดงผลแบบเสมือนจริงช่วยให้คุณวิเคราะห์และอนุมัติแบบได้รวดเร็วขึ้นหรือไม่?

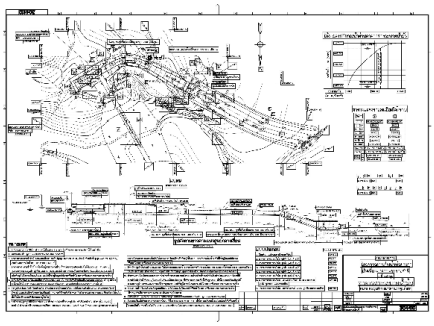
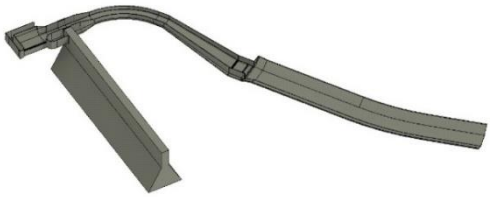
4.1.5 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- คุณมีข้อเสนอแนะใดในการปรับปรุงกระบวนการสร้างแบบจำลองมิติที่ 3 หรือไม่?
- ซอฟต์แวร์หรือเครื่องมือใดที่คุณอยากให้มีการพัฒนาเพิ่มเติม?

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า CIM เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างฝายน้ำล้น โดยช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดข้อผิดพลาด และปรับปรุงการทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หากมีการพัฒนาและปรับใช้ CIM อย่างเป็นระบบ จะสามารถยกระดับประสิทธิภาพการก่อสร้างโครงการของกรมชลประทานให้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำไปต่อยอดใช้ในโครงการก่อสร้างอื่นๆ ได้ในอนาคต ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบด้านต่างๆระหว่าง

	แบบจำลองแบบดั่งเดิม	**แบบจำลองมิติที่ 3**
ด้านแบบ		
ด้านเวลา	• แบบแปลนดั่งเดิม ใช้เวลาหลายเดือนกว่าจะสร้างเสร็จ เพราะต้องส่งต่อให้หลายฝ่ายตรวจสอบและดำเนินการ เช่น ฝ่ายสำรวจพื้นที่ ฝ่ายเก็บข้อมูลระดับ และฝ่ายออกแบบ จึงจะส่งต่อให้ฝ่ายเขียนแบบ ก่อนจะนำไปอนุมัติในขั้นสุดท้าย • ทำการก่อสร้างตามแบบ และถอดปริมาณวัสดุต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน ในการถอด	• มีการนำแบบแปลนแบบดั่งเดิมเข้ามาใช้ในการสร้างโมเดลมิติที่ 3 เวลาในขั้นตอนเริ่มต้นนานกว่า แต่ลดเวลาในระยะยาวและตรวจสอบข้อขัดแย้งอัตโนมัติ • ช่วยลดเวลาในการตรวจสอบแบบ เนื่องจากแสดงรายละเอียดและภาพเสมือนจริง ทำให้เข้าใจโครงการได้รวดเร็ว • ช่วยให้ทุกฝ่ายสามารถทำงานร่วมกันในการออกแบบได้แบบเรียลไทม์ ในการประสานงานระหว่างทีมงานต่างๆ
ด้านการจำลองโครงสร้าง	• การแสดงผลในแบบดั่งเดิมมีความซับซ้อน และการตรวจจับปัญหาข้อขัดแย้งระหว่างระบบ • ข้อมูลอาจแยกกันเก็บในแต่ละไฟล์ เช่น แบบโครงสร้าง แบบสถาปัตย์ หรือรายการวัสดุ ทำให้ตรวจสอบความเชื่อมโยงระหว่างข้อมูลได้ยาก ข้อผิดพลาดจากการอัปเดตข้อมูลไม่ตรงกัน	• การแสดงผลในแบบมิติที่ 3 ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างได้ดีขึ้น • ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เช่น Revit หรือ Navisworks ที่รองรับการทำงานร่วมกันแบบเรียลไทม์และการจำลองเสมือน เพื่อแสดงผลโครงการสำหรับการประชุมหรือการนำเสนอ
ด้านการประสานงาน	• การสื่อสารข้อมูลผ่านแบบดั่งเดิมมุมมองอาจไม่ครอบคลุม ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนหรือเข้าใจผิดได้ง่าย และทีมงานที่ไม่มีประสบการณ์อาจไม่เข้าใจแบบในทันที	• แบบจำลองมิติที่3 ช่วยให้ทีมงานทุกฝ่ายสามารถเห็นภาพรวมของโครงการได้ในรูปแบบที่ชัดเจน ลดปัญหาการตีความแบบผิดพลาด และส่งผลต่อการสื่อสารระหว่างทีมงานต่างสาขาง่ายขึ้น เช่น วิศวกรโครงสร้าง สถาปนิก และวิศวกรระบบ
ด้านความเข้าใจ	• การตรวจสอบต้องตีความจากแบบโดยความเข้าใจของผู้เชี่ยวชาญ	• ต้องมีความรู้ทางเทคนิคและทักษะทางซอฟแวร์ และมีความเข้าใจด้านการออกแบบ สำหรับสร้างและจัดการโมเดล

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย

	แบบจำลองแบบดั้งเดิม	แบบจำลอง 3 มิติ
ข้อดี	• ใช้เวลาในการเริ่มต้นน้อยกว่าการสร้างแบบมิติที่ 3 • ไม่ต้องใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะทางหรือทักษะที่ซับซ้อน • เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการรายละเอียดเชิงลึกมาก	• ช่วยลดเวลาในการปรับแก้ไขแบบและเพิ่มความแม่นยำในระยะยาว • สามารถใช้ซอฟต์แวร์ช่วยตรวจสอบข้อขัดแย้งระหว่างระบบได้อัตโนมัติ เช่น การชนกันของท่อ • ลดเวลาการตรวจสอบแบบ เพราะแสดงรายละเอียดและภาพเสมือนจริง ทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น • การสื่อสารและการประสานงานดีขึ้น เพราะทุกฝ่ายสามารถเห็นภาพรวมของโครงการได้ชัดเจน • สามารถใช้เทคโนโลยี AR/VR ช่วยจำลองโครงการแบบเสมือนจริงได้ • รองรับการทำงานร่วมกันแบบเรียลไทม์ผ่านซอฟต์แวร์เฉพาะทาง เช่น Revit หรือ Navisworks
ข้อเสีย	• การตรวจจับปัญหาข้อขัดแย้งทำได้ยากเนื่องจากระบบแสดงเป็นแบบแยกกัน • หากเกิดข้อผิดพลาด ต้องใช้เวลาแก้ไขเพิ่มเติมในภายหลัง • ต้องใช้เวลาในการอ่านและแปลความหมายแบบทำให้การอนุมัติล่าช้า • ข้อมูลอาจกระจัดกระจายและไม่เชื่อมโยงกัน เช่น แบบโครงสร้างกับแบบสถาปัตย์อาจไม่สอดคล้องกัน • มีโอกาสเกิดความเข้าใจผิดในการสื่อสารระหว่างทีมงาน	• ใช้เวลาในการสร้างแบบเริ่มต้นนานกว่าแบบดั้งเดิม • ต้องมีทักษะทางซอฟต์แวร์และความเข้าใจด้านการออกแบบเพื่อสร้างและจัดการโมเดล • อาจต้องลงทุนในซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพสูง

ข้อเสนอแนะ

เทคโนโลยี Civil Information Modeling (CIM) เป็นนวัตกรรมที่ช่วยยกระดับประสิทธิภาพในการก่อสร้าง โดยเฉพาะในโครงการที่มีความซับซ้อน เช่น โครงการของกรมชลประทาน ซึ่งมีโครงสร้างที่ต้องอาศัยความแม่นยำสูง ทั้งระบบอ่างเก็บน้ำ เขื่อน และโครงสร้างระบายน้ำอย่างไรก็ตาม เพื่อให้ CIM สามารถนำมาใช้งานได้อย่างเต็มศักยภาพ ควรมีการพัฒนาและปรับปรุงในหลายด้าน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเด็นได้แก่ การอบรมบุคลากร การปรับปรุงกระบวนการทำงานการพัฒนาและทดสอบซอฟต์แวร์ และการขยายการใช้งาน CIM ไปยังโครงการอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมและให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ (ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา) อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้คำแนะนำ องค์ความรู้ และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ขอขอบพระคุณ (ชื่อหน่วยงาน/องค์กรที่ให้การสนับสนุน) ที่ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า สนับสนุนข้อมูล เอกสาร และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและเพื่อนนักวิจัยที่ให้คำแนะนำและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย รวมถึงครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกขั้นตอนของการทำวิจัย สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ และสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ปราโมทย์ ไม้กลัด (26 กุมภาพันธ์ 2524). คู่มืองานเขื่อนดินขนาดเล็กและฝาย

[2] ผู้เขียนชาร่าห์ โลเร็ก (6 เมษายน 2565). BIM (Building Information Modeling) คืออะไร

[3] DOH Dream Team (สำนักก่อสร้างทางที่ 1 x กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง x สำนักมาตรฐานและประเมินผล x สำนักสำรวจและออกแบบ) (2566). การประยุกต์ใช้ CIM (Civil Information Modeling) ในงานก่อสร้างทางและสะพานของกรมทางหลวง

[4] โดย เกรซ เอลลิส (วันที่ 21 ธันวาคม 2566). วิวัฒนาการของมิติ BIM: 3D, 4D, 5D และอื่นๆ

[5] อลีนา ธรรมสอน (09/05/2565). การศึกษาข้อกำหนดเกี่ยวกับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ใน ขอบเขตของงาน (TOR) จ้าง ออกแบบ : กรณีศึกษาโครงการอาคารหน่วยงานของรัฐ The Study of Building Information Modelling (BIM) Requirements in Terms of Reference (TOR) for Design Service: Case Studies of Government Building Projects

[6] สรรพวัฒน์ จตุพัฒน์วราง (ธันวาคม 2561). กรณีศึกษาการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อประมาณการมูลค่างานก่อสร้างในส่วนงานสถาปัตยกรรมหลัก The Case Study of Using Building Information Modeling (BIM) for Forecasting Construction Cost in Architectural Segments

[7] สมจินตนา แขนงแก้ว และคณะ (2567). การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 5 มิติ เพื่อปรับปรุงการถอดปริมาณงาน กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารเรียนรู้และปฏิบัติการ 4 ชั้น Applying 5D-BIM to Improve the Quantity Takeoff: A Case Study of Educational and Laboratory Building Construction Project

[8] ชลลดา เลาะฟอ , พนิดา สีมาวุธ (วันที่ 24-26 สิงหาคม 2565 จ.เชียงราย). การจำลองแผนงานก่อสร้างอาคารโดยใช้ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร Simulation of building construction planning by using Building Information Modeling

[9] VR DIGITAL (06/04/2027). Autodesk Infraworks 360

[10] Construction Techniques (20 Apr 2021). BIM คืออะไร? สำคัญอย่างไรต่อวงการอสังหาริมทรัพย์

[11] นางสาวอุรชา ทับแย้ม (06/10/2563). การประเมินผลกระทบของพื้นที่น้ำซึมผ่านได้เพื่อลดการไหลนองของน้ำฝนในโครงการอาคารพักอาศัยรวมพื้นที่ในกรุงเทพมหานคร

[12] อ.เสน่ห์ บุญรำไพ มทร.อีสาน (3rd February 2015). ระบบการผลิตโดยใช้ข้อมูลร่วมกัน (CIM) Computer Integrated Manufacturing

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคาร กรณีศึกษา อาคารเรียนสี่ชั้น

Application Building Information Modeling For Analysis Building Surfaces Energy ; Case Study 4th floor Building

กฤษณพัฒน์ รัฐวัช[1] ธิเบต เดชบุญมี[2] กิตติศักดิ์ พูลเพิ่ม[3] ธีรภัทร์ มูลละออง[4] และ อภิชาต บัวกล้า[5]

[1,2,3,4] นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
[5] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: 64103745@up.ac.th*

บทคัดย่อ

ภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่กระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยหนึ่งในปัจจัยที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนในประเทศไทยคือ งานก่อสร้าง ซึ่งคิดเป็น 10 % ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในประเทศ โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแนวทางที่สามารถนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์พลังงาน พบว่าการนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการลดพลังงานกรอบอาคาร โดยพบว่าผลการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารของโปรแกรม Dynamo ให้ผลคาดเคลื่อน 4.2 % เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Autodesk Insight และพบว่าสามารถวิเคราะห์ทิศทางและตำแหน่งอาคารที่เกิดพลังงานกรอบอาคารที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถส่งผลให้ลดพลังงานที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน

คำสำคัญ: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, พลังงานกรอบอาคาร, โปรแกรม Autodesk Revit, โปรแกรม Dynamo

Abstract

Global warming is an environmental issue, and one of the factors contributing to global warming in Thailand is construction, which accounts for 10% of the total greenhouse gas emissions in the country. The purpose of this study is to create guidelines that can use Building Information Modeling (BIM) to develop energy analysis. It was found that BIM can be used as a guideline to address energy efficiency in building envelopes. The energy analysis results of building envelopes from the Dynamo program showed a 4.2% deviation compared to the analysis using Autodesk Insight. It was also found that BIM can analyze the optimal building orientation and position, which can lead to reduced energy consumption, thereby contributing to the reduction of global warming.

Keywords: Building Information Modeling, OTTV, Program Autodesk Revit, Program Dynamo

1. คำนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั่วโลก การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนอย่างหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญคือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดขึ้นจากกิจกรรมมนุษย์หลากหลายรวมถึงการก่อสร้างอาคารการก่อสร้างนั้นต้องใช้พลังงานในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เหล็ก และกระจก ซึ่งทั้งหมดนี้มีการปล่อยคาร์บอนในกระบวนการผลิตและการขนส่ง ในประเทศไทยสถิติการปล่อยคาร์บอนจากการก่อสร้างมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการพัฒนาเมืองและการขยายตัวของโครงสร้างพื้นฐาน จากข้อมูลของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมหรือOffice Of Natural Resources and Environmental Policy and Planning (ONEP) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการก่อสร้างของไทยคิดเป็นประมาณ 10% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในประเทศ ซึ่งถือว่าเป็นส่วนหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม

Building Information Modeling (BIM) เป็นกระบวนการสร้างและจัดการข้อมูลในโครงการก่อสร้างผ่านการสร้างโมเดลดิจิทัลที่เชื่อมโยงข้อมูลทั้งหมดของอาคารเข้าด้วยกัน BIM ช่วยให้ผู้เกี่ยวข้องทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดข้อผิดพลาดและต้นทุน โดยสามารถจำลองการทำงานของอาคารและคำนวณคาร์บอนที่เกิดจากวัสดุ กระบวนการก่อสร้าง และการใช้งานอาคารได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการก่อสร้างมีส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Emission) ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) สามารถช่วยในการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารที่เกิดขึ้นจากตัวอาคารและได้รับแนวทางเพื่อปรับปรุงตัวอาคารก่อนที่จะก่อสร้างจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยความสามารถเหล่านี้ ทางผู้วิจัยจึงสนใจนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) มาปรับใช้เป็นการส่งเสริมการก่อสร้างซึ่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น และช่วยในการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแนวทางที่สามารถนำแบบจำลองสารสนเทศอาคารนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์พลังงาน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของพลังงานกรอบอาคารของแบบจำลองสารสนเทศที่ใช้โปรแกรมเสริม Autodesk insight กับแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่คิดพลังงานกรอบอาคารโดยใช้โปรแกรมเสริม Dynamo

1.2.3 วิเคราะห์ทิศทางที่เหมาะสำหรับการวางอาคารตามมาตรฐาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ด้านโปรแกรม โปรแกรมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) คือ Autodesk Revit และส่วนโปรแกรมเสริมอื่นๆ

1.3.2 ได้แก่โปรแกรม Autodesk Insight, Microsoft Excel และ Dynamo

1.3.3 ด้านแบบก่อสร้าง แบบอาคารสถานศึกษาโดยที่เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่จัดทำตามมาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.)

1.3.4 ด้านพื้นที่ คัดเลือกจังหวัดสำหรับจัดตั้งแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) จากทั้ง 4 ภูมิภาคได้จังหวัดแต่ละภูมิภาคได้ดังนี้ อุดรธานี, ลำปาง, นครศรีธรรมราชและเพชบูรณ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถสร้างแนวทางที่สามารถนำแบบจำลองสารสนเทศอาคารนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์พลังงานได้จริง

1.4.2 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของพลังงานกรอบอาคารของแบบจำลองสารสนเทศที่ใช้โปรแกรมเสริม Autodesk insight กับแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่คิดพลังงานกรอบอาคารโดยใช้โปรแกรมเสริม Dynamo ได้จริง

1.4.3 สามารถวิเคราะห์ทิศทางที่เหมาะสำหรับการวางอาคารตามมาตรฐานได้จริง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำได้รวบรวมแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 (Overall Thermal Transfer Value, OTTV)

OTTV คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร

- หลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย

ที่ผ่านมาการควบคุมหรือกำกับการใช้พลังงานของอาคารในประเทศไทย ได้มีการดำเนินการ ภายใต้กฎหมายหลักสองกฎหมายคือ พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 (แก้ไข พ.ศ. 2535, 2543, 2550) และพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 (แก้ไข พ.ศ. 2550) ทำให้ ปัจจุบันได้มีกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานในดังต่อไปนี้

กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และ วิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.

ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552

ในปี พ.ศ. 2552 กระทรวงพลังงานได้ออกกฎกระทรวงพลังงานที่ใช้กำกับควบคุมการใช้งาน พลังงานของอาคารขนาดใหญ่ตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานฯ มาตรา 19 ให้ใช้ บังคับอาคารที่มีขนาดพื้นที่รวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป ต้องมีการออกแบบเพื่อนการอนุรักษ์พลังงาน

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารส่วนที่มีการปรับอากาศ (OTTV) วิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารส่วนที่มีการ ปรับอากาศ (OTTV) ในปัจจุบันใช้วิธีการคำนวณตามประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และ วิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้ พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติการ ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ให้คำนวณตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด ดังต่อไปนี้ (ประกาศกระทรวงพลังงาน, 2552)

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารแต่ละด้าน (OTTV) สามารถคำนวณ ได้จากสมการที่ 2.1

$$OTTV = (U)(1-WWR)(TD) + (U)(WWR)(AT) + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad 2.1$$

เมื่อ

$OTTV$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m²)

Uw คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเซลเซียส (W/(m².°C))

WWR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสง และ/หรือของผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา

$TDeg$ คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (equivalent temperature difference) ระหว่าง ภายนอกและภายในอาคารซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

$U,$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสง หรือกระจก มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเซลเซียส (W/(m².°C))

ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

$SHGC$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนังโปร่งแสงหรือ กระจก

SC คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด

ESR คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง และ/หรือ ผนังทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m²)

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) คือ ค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนัก ของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกแต่ละด้าน (OTTV) รวมกันสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.2

$$\frac{(Aw1)(OTTV^1)+(Aw2)(OTTV^2)+\cdots+(Aw)(OTTV_i)}{Aw1+A \quad +\ldots+Awi} \qquad 2.2$$

เมื่อ

Awi คือ พื้นที่ของผนังด้านที่พิจารณาซึ่งรวมพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่ง แสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

$OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) [7]

2.2 BIM หรือ Building information modeling

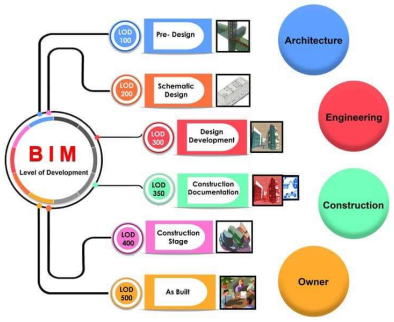
Building information modeling คือ แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ใน กระบวนการออกแบบและก่อสร้าง โดยการสร้างแบบจำลองอาคาร (building model) พร้อมข้อมูลหรือสารสนเทศ (information) ในองค์ประกอบของแบบจำลองนั้น ๆ จำลองการก่อสร้างอาคารจริง ซึ่งปัจจุบัน BIM ถูกนำมาใช้กับงานออกแบบสถาปัตยกรรมมากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการผนวกการทำงานออกแบบสถาปัตยกรรม ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองอาคาร และ ข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลองอาคาร ไปใช้ในการทำงานขั้นต่อ ๆ ไป (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558) โดยโปรแกรมที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในประเทศไทย ได้แก่ Autodesk Revit [8]



ภาพที่ 1 กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)
(ที่มา : https://civilengineeringlibrary.weebly.com/bim-programs.html)

2.3 Level of Development (LOD)

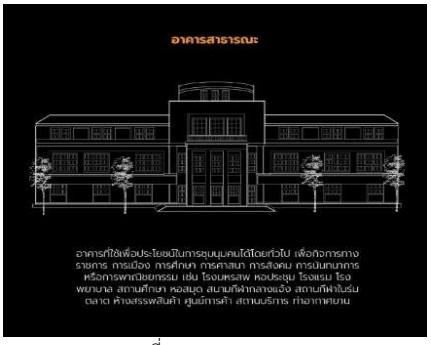
คือ การถูกพัฒนาขึ้นมาจากแนวคิดของแต่ละภูมิภาคที่อธิบายความละเอียดของข้อมูลในแง่ต่างๆ ในยุคแรก Vico Software (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Trimble) เป็นบริษัทที่ผลิต Construction costing software เสนอแนวคิดเรื่อง Model Progression Specification (MPS) เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดการข้อมูลภายใน BIM Model เรียกว่า Level of Detail (LOD) แนวคิดแบบเดียวกันนี้ได้รับการยอมรับจากสถาบันสถาปนิกอเมริกัน (AIA) ถูกพัฒนาไปใช้กับขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์ด้านอื่นๆ และเรียก Level of Development (LOD) และได้กำหนดระดับด้วยตัวเลขเป็น LOD 100, LOD 200, LOD300, LOD400, LOD500 [9]



ภาพที่ 2 ตารางรายละเอียด LOD (Level of Development) ต่างๆ
(ที่มา : https://sharrtz.org/2019/12/what-is-lod/)

2.4 อาคาร

คือแบบของอาคารในงานสถาปัตยกรรม มีมากมายหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น อาคารที่พักอาศัย ไปจนถึงอาคารสาธารณะ ความหลากหลายของการออกแบบประเภทอาคาร ไม่ใช่เพียงแค่ประโยชน์ด้านการใช้งาน แต่ยังสัมพันธ์ไปถึงข้อกฎหมายในการออกแบบอาคารต่างๆ อีกด้วย [10]



ภาพที่ 3 อาคารสาธารณะ
(ที่มา : https://www.wazzadu.com/article/5845)

2.5 โปรแกรม Autodesk Revit (Education license)

คือ Autodesk Revit เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบเขียนแบบด้านสถาปัตยกรรม งานอาคาร โดยเฉพาะของ Autodesk ในรูปแบบ CAD ที่รองรับการทำงานในระบบ BIM (Building Information Modeling) เพื่อช่วยให้สถาปนิก วิศวกร และนักออกแบบสามารถสร้างการออกแบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการสร้างเอกสารประกอบจากโมเดล Revit และยังสามารถใช้งานร่วมกับ โปรแกรมอื่นๆ ได้อย่างดี

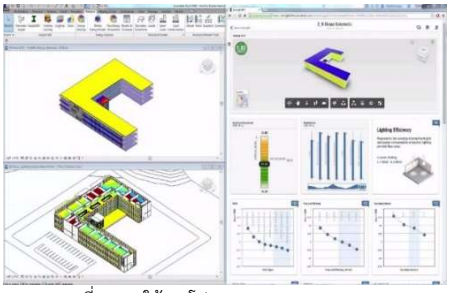
ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้งานโปรแกรม Autodesk Revitอย่างแพร่หลายทั้งในงานวิศวกรรมและงานสถาปัตยกรรมแต่เนื่องจากตัวโปรแกรมยังมีขีดจำกัดในการทำงานอยู่ซึ่งโปรแกรมมีจุดด้อยในการสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูงเนื่องจากโปรแกรมมีการทำงานโดยใช้ระบบอ้างอิงจากระนาบการทำงาน (work plane) เพื่อสร้างแบบจำลอง หรือการนำข้อมูลจากแบบจำลองมาใช้ในการวิเคราะห์ที่ยังไม่ครอบคลุมในทุกด้าน [11]



ภาพที่ 4 การใช้ Revit กับงานสถาปัตยกรรม
(ที่มา : https://yolandamuriel.com/2023/02/01/revit-architecture-830-familias-101-controlar-la-visibilidad-1-visibilidad-y-nivel-de-detalle-de-la-familia/)

2.6 โปรแกรม Autodesk Insight (Education license)

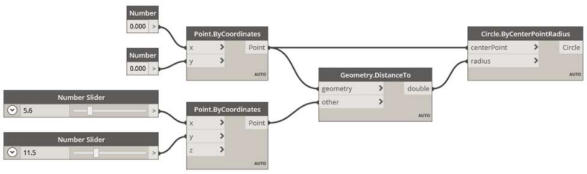
เป็นเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่รวมอยู่ใน Autodesk Revit และ Autodesk BIM 360 ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร ทำให้สถาปนิก วิศวกร และนักออกแบบสามารถทำการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12]



ภาพที่ 5 การใช้งานโปรแกรม Autodesk Insight
(ที่มา : https://www.ideateinc.com/blog/2016/10/revit-2017-optimize-building)

2.7 โปรแกรมเสริม Dynamo

คือเครื่องมือเสริมที่เป็น Visual Programming ซึ่งหมายถึงการเขียนโปรแกรม ด้วยภาพ พัฒนาโดยบริษัท Autodesk inc. เพื่อใช้กับ โปรแกรม Revit เป็นโปรแกรมที่ทำให้ผู้ที่ไม่ได้ เรียนมาใน สาขาคอมพิวเตอร์ ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบ 3 มิติ ได้อย่างที่ต้องการโดยใช้ การกำหนดเป็น Diagram ของแนวความคิด โดยย่อการทำงานเป็นจุด เรียกว่า Node เมื่อต้องการ ทำงานอะไร ก็ให้ไปหา Node ที่ต้องการมาในการสร้างโปรแกรม และในแต่ละ Node ก็จะบอก Input และ Output เป็นรูปภาพ [13]



ภาพที่ 6 การใช้งานโปรแกรม Dynamo
(ที่มา : https://xiebin.gitbooks.io/paper-crane/content/01_Introduction/what_is_visual_programming.html)

2.8 โปรแกรม Microsoft Excel

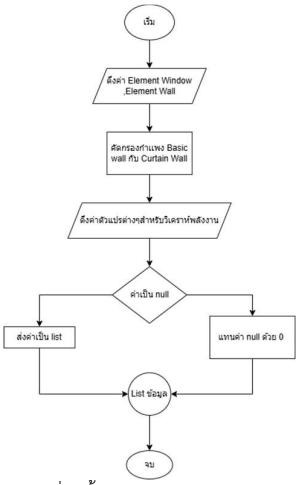
เป็นโปรแกรมประเภทสเปรดชีตหรือตารางทำการที่มีประสิทธิภาพ สูง ซึ่งมีความโดดเด่นทางด้านการคำนวณและการสร้างตาราง โดยสามารถช่วยให้ผู้ใช้สร้างสูตร คำนวณหรือฟังก์ชันเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้สะดวกและรวดเร็ว (อวยพร โกมลวิจิตรกุล 2550: 16) และ Microsoft Excel ยังเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้งานที่เกี่ยวข้อง กับตัวเลขมากที่สุด เช่น งานด้านบัญชี การเงิน วางแผนการตลาด การจัดทำงบประมาณ สถิติ สารสนเทศ และอื่น ๆ ซึ่งจะต้องนำสูตรและฟังก์ชันมาใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ ข้อดีการคำนวณ โดยใช้ Microsoft Excel ก็คือ เมื่อข้อมูลเปลี่ยนแปลง สูตรและฟังก์ชันจะคำนวณผลลัพธ์ให้ใหม่ทันที (นันทนี แขวงโสภา. 2549: 15) นอกจากนี้มีงานวิจัยของ สุกัญญา เรืองสุวรรณ (2542: 83) ได้ทำ การแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้น ด้วย Excel Solver พบว่าคำสั่ง Solver ของโปรแกรม Microsoft Excel นั้นเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้นได้ดี โดยสามารถจัดการข้อมูลต่าง ๆ บน เวิร์คชีท ได้ และยังสามารถทดลองเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ในตัวแบบเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นได้ทันที

ส่วนประกอบต่างๆ ของ Excel เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา เมื่อเปิดโปรแกรม Excel แล้วหน้าจอที่ได้จะมีส่วนต่างๆ ที่ควรรู้จักซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถที่จะใช้งาน Excel ได้ตามความต้องการ



ภาพที่ 7 โปรแกรม Microsoft Excel
(ที่มา : https://www.tech-recipes.com/windows/microsoft-office/microsoft-excel/master-excel-sort/)

3. วิธีการดำเนินงาน



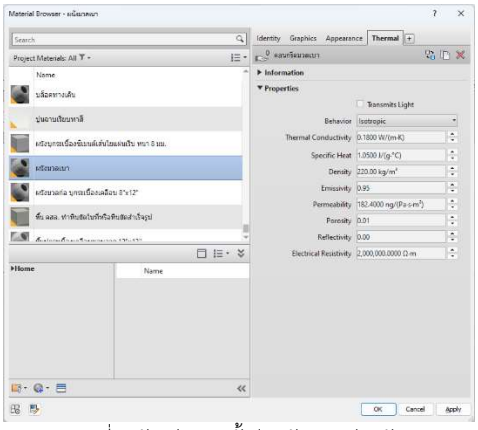
ภาพที่ 8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ซอฟแวร์ที่เกี่ยวข้อง

3.2 Autodesk Revit (Education license)

Autodesk Revit เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบเขียนแบบด้านสถาปัตยกรรม งานอาคารโดยเฉพาะของ Autodesk ในรูปแบบ CAD ที่รองรับการทำงานในระบบ BIM (Building Information Modeling) เพื่อช่วยให้สถาปนิก วิศวกร และนักออกแบบสามารถสร้างการออกแบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการสร้างเอกสารประกอบจากโมเดล Revit และยังสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ ได้อย่างดี

ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นประโยชน์และความสามารถของตัวโปรแกรม ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้ Autodesk Revit 2024 ในการจัดทำโมเดลให้มีการจัดทำโมเดลที่มีความละเอียด LOD 200 เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและกรอกค่าของวัสดุที่ตามแบบอาคาร



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการตั้งค่าพลังงานแต่ละวัสดุ

3.2.1 โปรแกรมเสริม Dynamo

คือเครื่องมือเสริมที่เป็น Visual Programming ซึ่งหมายถึงการเขียนโปรแกรม ด้วยภาพ พัฒนาโดยบริษัท Autodesk inc. เพื่อใช้กับ โปรแกรม Revit เป็นโปรแกรมที่ทำให้ผู้ที่ไม่ได้ เรียนมาใน สาขาคอมพิวเตอร์ ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบ 3 มิติ ได้อย่างที่ต้องการโดยใช้ การกำหนดเป็น Diagram ของแนวความคิด โดยย่อการทำงานเป็นจุด เรียกว่า Node เมื่อต้องการ ทำงานอะไร ก็ให้ไปหา Node ที่ต้องการมาในการสร้างโปรแกรม และในแต่ละ Node ก็จะบอก Input และ Output เป็นรูปภาพ

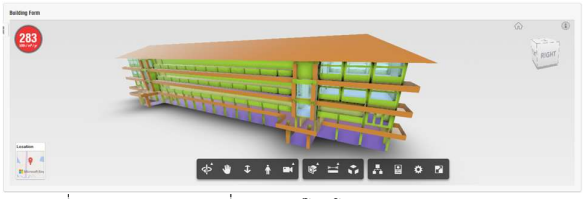
ทางคณะผู้จัดทำจึงนำตัว Dynamo มาใช้สำหรับการดึงข้อมูลของค่าต่างๆในวัสดุที่ใช้ในการคิดค่าพลังงานกรอบอาคารที่ จำลองในตัวแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

3.3 Autodesk Insight (Education license)

ที่เป็นตัว Plug-in ที่ติดตั้งเพิ่มเติมบน Autodesk Revit เพื่อช่วยให้สามารถนำโมเดล Revit มาวิเคราะห์ในด้านต่างๆ ดังนี้

Thermal analysis วิเคราะห์เชิงความร้อน ใช้ในการวิเคราะห์เวลาและอุณหภูมิที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนหรือความเย็นลง ตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่กำลังวิเคราะห์

ทางคณะผู้จัดทำได้นำตัว Autodesk Insight มาใช้ในการวิเคราะห์พลังงานที่ตัวแบบจำลองสารสนเทศอาคารจำลองขึ้นมา ในสถานการณ์ที่กำหนด



ภาพที่ 10 ตัวอย่างอาคารที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม Autodesk Insight

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 แบบสำหรับสร้างแบบจำลองสารสนเทศ

คัดเลือกแบบอาคารสถานศึกษา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) 4 ชั้น ที่จัดทำตามมาตราฐานการออกแบบสำหนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) โดยเป็นอาคารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัยสำหรับสร้างแบบจำลองสารสนเทศ (BIM) และวิเคราะห์พลังงานของตัวอาคาร

วิเคราะห์อิทธิพลที่กระทบจากตัวแปรด้านตำแหน่งของอาคารที่ส่งผลต่อค่าพลังงานของตัวอาคารในส่วนหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ตัวแปรด้านตำแหน่งและทิศทางของอาคารที่ส่งผลต่อการคิดค่าพลังงานของตัวอาคารเนื่องจากตำแหน่งและทิศทางของตัวอาคารมีผลโดยตรงกับค่าตัวแปรรังสีจากดวงอาทิตย์การรับแสงกระทบของตัวอาคารคณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลทิศทางของอาคาร โดยส่วนด้านหน้าอาคารเป็นทิศเหนือ 0องศาเริ่มต้นและเพิ่มที่ละ45องศาตามเข็มนาฬิกาโดยใช้โปรแกรมAutodeskRevitในการหาทิศทางของตัวอาคารและในส่วนตำแหน่งของอาคารทางคณะผู้จัดทำได้เลือกตำแหน่งดังนี้ลำปาง,นครศรีธรรมราช,เพชรบูรณ์และอุดรธานีกระจายภูมิภาคละ1จังหวัดโดยเลือกจากข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลาตั้งแต่ปี2021-2024จาก “สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ”

3.4.2 จัดทำแบบจำลองสารสนเทศ (BIM)

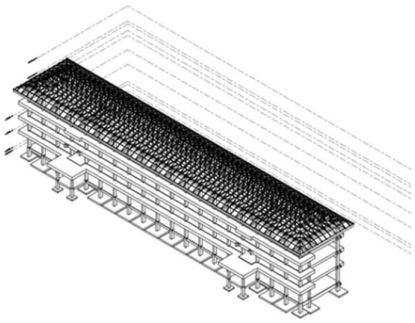
ในหัวข้อนี้เป็นการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Autodesk Revit เพื่อวิเคราะห์ พลังงานของตัวอารโดยเลือกใช้แบบอาคารสถานศึกษา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คสล. 4 ชั้น ที่จัดทำตามมาตราฐานการออกแบบสำหนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลการใช้พลังงานของตัวอาคาร ตามลำดับขั้นในการพัฒนาโมเดล (Level of development) Schematic Design เพื่อศึกษารูปลักษณ์ รูปทรง 3 มิติ ใน หมวดงานสถาปัตยกรรม และ งานวิศวกรรมโครงสร้าง (LOD 200)

ในจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำแบบจำลองสารสนเทศ เป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

1.ตั้งค่าระบบการทำงานในส่วนโปรแกรม Autodesk Revit

2.จัดทำแบบจำลองในส่วนงานโครงสร้าง และ งานสถาปัตยกรรม

3.ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสารสนเทศ ในส่วนของงานโครงสร้าง และ งานสถาปัตยกรรม



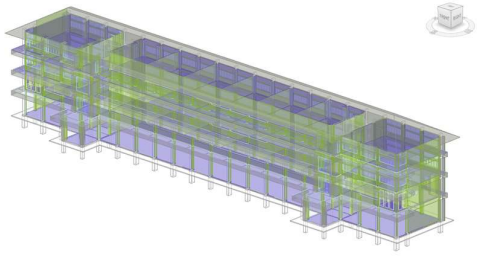
ภาพที่ 11 แบบจำลองอาคารสี่ชั้นงานโครงสร้าง

วิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นจากตัวอาคาร

ในจัดทำการวิเคราะห์พลังงานอาคาร คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำการวิเคราะห์พลังงานอาคารเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

1.เลือกค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ (Parameter) ที่เหมาะสำหรับตัวอย่างตัวแบบจำลองสารสนเทศอาคาร อาทิ เช่น ค่าระยะเวลาการใช้งานตัวอาคารต่อสัปดาห์, ประสิทธิภาพการให้แสงสว่าง เป็นต้น เพื่อจะนำไปวิเคราะห์ในส่วนพลังงานตัวอาคาร ในโปรแกรม Autodesk Insight ต่อไป

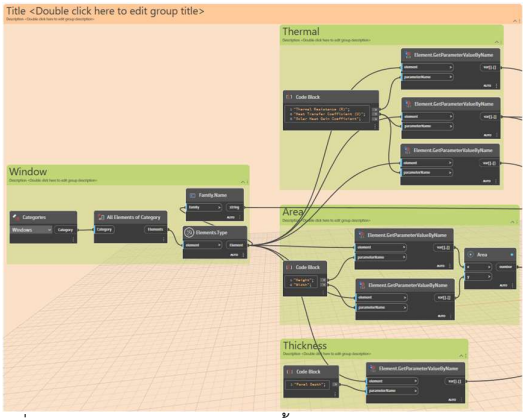
2.วิเคราะห์พลังงานตัวอาคาร โดยใช้ โปรแกรม Autodesk Insight โดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารที่ได้จาก โปรแกรม Autodesk Revit ในส่วนการทำงานสถาปัตยกรรม และงานโครงสร้าง มาวิเคราะห์ และเก็บรวบรวมผลการวิเคราะห์ข้อมูล โดยคำนึงถึงค่า พลังงานของตัวอาคาร และปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากตัวอาคาร



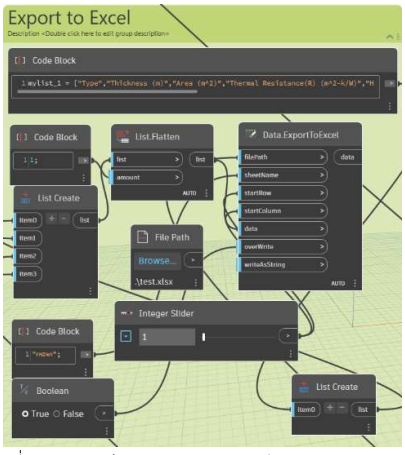
ภาพที่ 12 อาคารที่อยู่ในโหมดวิเคราะห์พลังงาน

3.4.3 สคริปต์การวิเคราะห์ Dynamo

การสร้างสคริปต์ Dynamo เพื่อใช้ในการดึงข้อมูลจากแบบจำลอง BIM ที่ได้ทำการบันทึกข้อมูลไว้ โดยขั้นตอนและวิธีการทำงานของ Dynamo สคริปต์เริ่มจากการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานภายในกลุ่มของแบบจำลองตามประเภทของกิจกรรม และทำการสร้างพารามิเตอร์ลิสต์ (List) ในขั้นสุดท้ายเป็นการบันทึกข้อมูลที่ได้ลงในรูปแบบไฟล์ Excel เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป โดยสามารถแบ่งกลุ่มสคริปต์ Dynamo ออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มแรก สคริปต์ Dynamo สำหรับดึงข้อมูลพื้นฐาน โครงการจากแบบจำลอง BIM เช่น สถานที่ตั้ง ค่าต่างๆในการวิเคราะห์พลังงาน



ภาพที่ 13 สคริปต์ Dynamo ดึงข้อมูลพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ค่าพลังงาน



ภาพที่ 14 สคริปต์ Dynamo สำหรับดึงค่าพลังงานสู่ Excel

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาแนวทางการคำนวนพลังงานกรอบอาคารจากแบบสารสนเทศอาคารแบบอัตโนมัติ โดยแบบบ่งได้เป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกจะเป็นการวิเคราะห์หาทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการวางตัวอาคาร จากตำแหน่งและทิศทาง โดยที่ตำแหน่งได้ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ อุดรธานี , ลำปาง , นครศรีธรรมราช และเพชรบูรณ์ ช่วงที่สอง เป็นการวิเคราะห์และเปรียบเปรียบพลังงานกรอบอาคารที่ได้ระหว่าง Autodesk Insight และ ค่าได้จากโปรแกรม Dynamo โดยที่กำหนดให้แบบจำลองสารสนเทศตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัด เพชรบูรณ์ จาก 4 จังหวัดที่เรากำหนดมา แบ่งทำเป็น 3 ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางที่ส่งผลกระต่อพลังงานอาคารที่เกิดขึ้น

ผลจากการวิเคราะห์พลังงานจากตำแหน่งและทิศทางที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่เกิดขึ้นจากอาคาร โดยมีการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของอาคารทั้ง 4 จังหวัด โดยเป็นพื้นที่จากภูมิภาคในไทย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit โดยทำการวิเคราะห์จากพลังงานกรอบอาคารที่กำหนดให้ 1 ตำแหน่ง ต่อ 8 ทิศทาง โดยกำหนดให้ทิศใต้เริ่มที่ 0 องศา ไปจนถึง 315 องศา โดยวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง สามารถแสดงทิศทางที่เกิดพลังงานกรอบอาคารมากที่สุดและน้อยที่สุดทั้งหมด 4 ตำแหน่งดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางที่ส่งผลกระต่อพลังงานอาคารที่เกิดขึ้น

ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผล	ทิศทางอาคาร(องศา)/พลังงานกรอบอาคาร (KWh/m^2/Year)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
อุดรธานี	278	283	283	283	283	283	283	283
ลำปาง	275	284	284	284	284	284	284	284
นครศรีธรรมราช	279	283	283	283	283	283	283	287
เพชรบูรณ์	274	283	283	283	283	283	283	283

เมื่อนำค่าพลังงานกรอบอาคารที่ได้จากตารางที่ 1 มาคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานรายปี จะทำให้ได้ค่าใช้จ่ายของอาคารที่เกิดจากพลังงานกรอบอาคาร ได้ดังตารางที่ 2,3,4

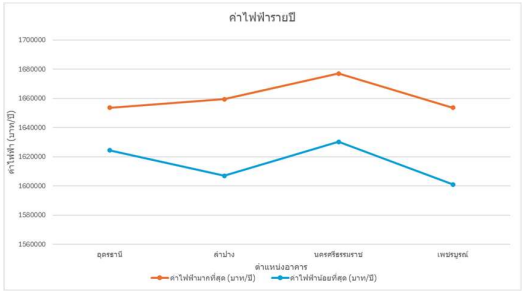
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจากพลังงานกรอบอาคารมากที่สุดรายปี

ตำแหน่งอาคารที่วิเคราะห์	ทิศทางอาคาร	น้อยสุด (ยูนิต)	ค่าไฟ (หน่วยละ)	ค่าไฟ (บาท/เดือน)	ค่าไฟ (บาท/เดือน)
อุดรธานี	0	48,928	4.15	203,051.2	1,624,409.60
ลำปาง	0	48,400	4.15	200,860	1,606,880.00
นครศรีธรรมราช	0	49,104	4.15	203,781.6	1,630,252.80
เพชรบูรณ์	0	48,224	4.15	200,129.6	1,601,036.80

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจากพลังงานกรอบอาคารน้อยที่สุดรายปี

ตำแหน่งอาคารที่วิเคราะห์	องศา	มากสุด (ยูนิต)	ค่าไฟ (หน่วยละ)	ค่าไฟ (บาท/เดือน)	ค่าไฟ (บาท/ปี)
อุดรธานี	315	49,808	4.15	206,703.2	1,653,625.60
ลำปาง	315	49,984	4.15	207,433.6	1,659,468.80
นครศรีธรรมราช	315	50,512	4.15	209,624.8	1,676,998.40
เพชรบูรณ์	315	49,808	4.15	206,703.2	1,653,625.60

และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 จัดทำกราฟแสดงผลจะได้ดังนี้

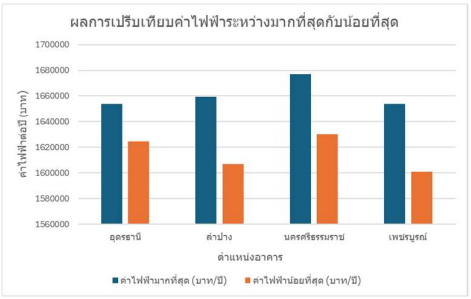


ภาพที่ 15 กราฟแสดงค่าไฟฟ้าทิศทางที่เกิดพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้ารายปีระหว่างค่าไฟฟ้ามากที่สุดและน้อยที่สุด

ตำแหน่งอาคารที่วิเคราะห์	องศาที่พลังงานมากสุด	ค่าไฟ (บาท/ปี)	องศาที่พลังงานน้อยที่สุด	ค่าไฟ (บาท/ปี)	% ที่ลดลง	จำนวนเงินที่ลดลง (บาท/ปี)
อุดรธานี	315	1,653,625.6	0	1,624,409.6	1.77%	29,216
ลำปาง	315	1,659,468.8	0	1,606,880	3.17%	52,588.8
นครศรีธรรมราช	315	1,676,998.4	0	1,630,252.8	2.79%	46,745.6
เพชรบูรณ์	315	1,653,625.6	0	1,601,036.8	3.18%	52,588.8

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาจัดทำกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าไฟฟ้ามากที่สุดกับค่าไฟฟ้าน้อยที่สุด จะแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 16 กราฟเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าทิศทางที่เกิดพลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุด

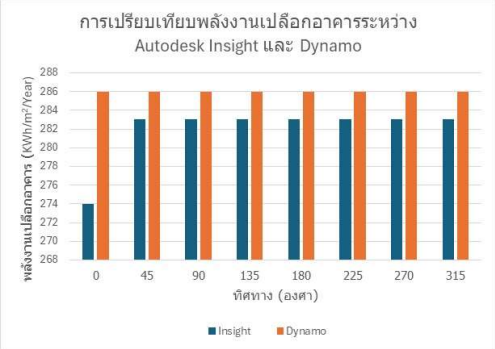
4.2 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และโปรแกรม Dynamo

ผลการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารโดยที่จะกำหนดให้ตำแหน่ง 1 ตำแหน่ง เลือกเป็นจังหวัดเพชบูรณ์ และกำหนด 8 ทิศทาง โดยกำหนดให้ทิศใต้เริ่มที่ 0 องศา ไปจนถึง 315 องศา และใช้โปรแกรม Autodesk Insight และ โปรแกรม Dynamo วิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารและสามารถแสดงค่าพลังงานกรอบอาคารที่วิเคราะห์โดยแต่ละโปรแกรมได้ดังนี้

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo

ทิศทางอาคาร	Autodesk Insight (KWh/m^2/Year)	Dynamo (KWh/m^2/Year)	เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบ
0	274	286	4.20%
45	283	286	1.05%
90	283	286	1.05%
135	283	286	1.05%
180	283	286	1.05%
225	283	286	1.05%
270	283	286	1.05%
315	283	286	1.05%

จากข้อมูลการเปรียบเทียบค่าพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo จะแสดงได้ดังนี้

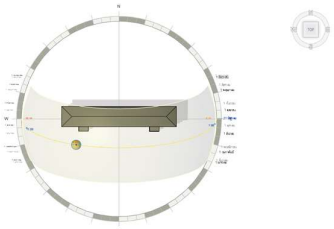


ภาพที่ 17 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสำหรับการวางอาคาร

จากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของพลังงานกรอบอาคาร จะเห็นได้ว่า ค่าที่บ่งบอกถึงค่าที่ได้จากโปรแกรม Autodesk Insight ทำให้ได้ทิศทางที่เหมาะสมอาคารของแต่ละตำแหน่งที่ศึกษาได้ดังนี้ อุดรธานี 0 องศา , ลำปาง 0 องศา , นครศรีธรรมราช 0 องศา และเพชรบูรณ์ 0 องศา โดยเริ่มต้นที่ทิศใต้



ภาพที่ 18 ตัวอย่างอาคารที่ทำการหมุนในแต่ละตำแหน่ง

การหมุนอาคารไม่ได้เป็นตัวแปรสำคัญมากสำหรับการที่ต้องลดพลังงานอาคารลง เพราะดูจากค่าตามตารางที่ 1 จะพบว่าพลังงานที่เปลี่ยนจากการหมุนอาคารจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปถึงไม่เปลี่ยนแปลง

5.2 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และ dynamo

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารระหว่างโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo โดยที่ทางคณะผู้จัดทำทำโดยตำแหน่งของอาคารโดยเลือกให้เป็นจังหวัด เพชรบูรณ์ และเปลี่ยนทิศทางอาคาร และได้ค่าดังตารางที่ 3 จะพบว่า Dynamo ที่ทางคณะผู้จัดทำทำขึ้นนั้น สามารถคำนวณค่าพลังงานกรอบอาคารได้และมีค่าพลังงานใกล้เคียงกับโปรแกรม Autodesk Insight โดยมีเปอเซ็นต์เปรียบเทียบระหว่าโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo ดังนี้ 0 องศา 4.20 % , 45 องศา 1.05 % , 90 องศา 1.05 % , 135 องศา 1.05 % , 180 องศา 1.05 % , 225 องศา 1.05 % , 270 องศา 1.05 % และ 315 องศา 1.05 %



ภาพที่ 19 ตัวอย่าง Dynamo ที่ใช้วิเคราะห์พลังงานกรอบอาคาร

5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ผลการวิจัย

การศึกษาการประยุกต์การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการคำนวณพลังงานกรอบอาคารแบบอัตโนมัติ กรณีที่ศึกษาอาคารสถานศึกษาตามแบบมาตรฐาน สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) และทำหารหมุนทิศทางอาคารตามทิศทางที่กำหนด ได้ผลการวิเคราะห์ว่าทิศทางอาคารที่เหมาะสมมากที่สุดคือ จังหวัด เพชรบูรณ์ ในทิศทางที่ 0 องศาโดยที่เริ่มโดยหน้าอาคารหันไปในทิศใต้ จะทำให้พลังงานกรอบอาคารที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าพลังงานน้อยที่สุดจากทุกตำแหน่งที่กำหนดมา และเนื่องด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกจังหวัด เพชรบูรณ์ เป็นจังหวัดที่กำหนดให้เป็นตำแหน่งในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพลังงานกรอบอาคารโดยมีโปรแกรม Autodesk Insight และ Dynamo ที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรม Dynamo ที่คณะผู้จัดทำทำขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคาร จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม Dynamo มีค่าความต่างมากที่สุดที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 4.20 % ซึ่งเป็นการค่าคลาดเคลื่อนที่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์พลังงานกรอบอาคารลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ผศ.ดร. อภิชาต บัวกล้า อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ให้ความรู้ และข้อเสนอแนะและความคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษางานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ฤทธิ์ทยุต ก้องทอง สำหรับให้คำแนะนำตลอดจนถึงความรู้และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการศึกษางานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่เป็นสถานที่บ่มเพาะให้ความรู้และความอนุเคราะห์สถานที่ในการจัดทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยา เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนจากมหาวิทยาลัยพะเยา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อน บุคคลรอบข้างทุกๆ คน รวมถึงผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บิดา มารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดีและให้กำลังใจแรงบันดาลใจ ที่ทำให้เกิดงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] นันทพล มหาวัน ,อภิชาต บัวกล้า, ฤทธิ์ทยุต ก้อนทอง และ นพรัตน์ เกตุขาว(2565). การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานด้วยการปรับปรุงกรอบอาคาร กรณีศึกษา: อาคารที่อยู่อาศัย (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา) ,การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 ,24-26 สิงหาคม 2565 จ. เชียงรายจาก https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1924/917

[2] อภิเกียรติ เจริญสุทธิโยธิน และ อรรจน์ เศรษฐบุตร (ฉบับที่ 1/2561), แนวทางการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อคำนวณคำการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น จาก https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail/10.14457%2FCU.the.2017.919

[3] อภิเกียรติ เจริญสุทธิโยธิน (2560) , แนวทางการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น , สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , จาก https://digital.car.chula.ac.th/cgi/viewcontent.cgi?article=3016&context=chulaetd

[4] ภัทรพงษ์ วัฒนาจรัสแสง(2560) ,วัสดุผนังภายนอกอาคารที่เหมาะสมสำหรับห้องปรับอากาศ กรณีศึกษา จังหวัดพิษณุโลก ,หน้า 53-54 จาก https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/4862/1/PattarapongWattanajaratsaeng.pdf?fbclid=IwY2xjawIhV1pleHRuA2FlbQIxMAABHQwRgpbQt1N7KyeVOrXD0f4WhzlyYtJhKGiSERZGEiMsW7Fle6qVwxSgw_aem_HC66jtUbOt1f6NwZL8yaQQ

[5] Tanesh Tiagarajan (2024), Yun li Go , Integration of BIPV design and energy efficient technologies for low energy building in meeting net zero target , School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University Malaysia. 1, Jalan Venna P5/2, Precinct 5, Putrajaya 62200, Malaysia , fromhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124001335

[6] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (2565) ,ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายเดือนของแต่ละจังหวัดทั่วประเทศ ที่ผ่านการวิเคราะห์จากข้อมูลรายสถานี โดยใช้วิธีการทางสถิติ ,จาก https://data.hii.or.th/dataset/8bbbb32d-f70a-4f4a-a81b-632f863c1995/resource/a5d00230-33c4-4872-b6e2-0e32ce96b97b/download/tmax-tmin.csv

[7] กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2550. (16 ตุลาคม พ.ศ. 2550). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 124 ตอนที่ 68 ก

[8] Mio' S (2555) ,กระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) , สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2568 จาก https://miobim.blogspot.com/2012/10/bim-building-information-modeling.html?m=1

[9] Sharrtz Organization Myanmar (2568) ,ตารางรายละเอียด LOD (Level of Development) ต่างๆ ,สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2568 จาก https://sharrtz.org/2019/12/what-is-lod/

[10] Encyclopedia (2564) ,อาคารสาธารณะ ,สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2568 จาก https://www.wazzadu.com/article/5845

[11] Yolanda MURIEL (2566) ,การใช้ Revit กับงานสถาปัตยกรรม , สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2566 จาก https://yolandamuriel.com/2023/02/01/revit-architecture-830-familias-101-controlar-la-visibilidad-1-visibilidad-y-nivel-de-detalle-de-la-familia/

[12] Vasudha Dixit (2559) ,การใช้งานโปรแกรม Autodesk Insight , สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2568 จาก https://www.ideateinc.com/blog/2016/10/revit-2017-optimize-building

[13] Pavel Pavlov (2558) ,การใช้งานโปรแกรม Dynamo , Automation of information Flow from Revit to Bim Ling Dynamo ,สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2565 จาก https://projekter.aau.dk/projekter/files/231026964/Dynamo_Project.pdf