กำลังและความเร็วคลื่นปฐมภูมิของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์ภายใต้อุณหภูมิ

สิริชัย เพชร์รุ่ง[1] อภิวิชญ์ ทองรักษา[1] สิทธิภัสร์ เอื้ออภิวัชร์[2] และ กษิดิศ สินโน[3]

[1]

[2]

Corresponding author; E-mail address: sirichai.p@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังและความเร็วคลื่นปฐมภูมิของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยดินที่ปรับปรุงคุณภาพถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยน้ำหนักในปริมาณร้อยละ 0 10 15 และ 20 ตามลำดับ ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต 50:50 ความเข้มข้นของสารละลาย 6 โมลาร์ เลือกใช้สำหรับทำการบดอัดดินที่ประมาณความชื้น 1 1.25 และ 1.5 เท่า ของ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด (OMC) ทำการทดสอบโดยให้ความร้อน 40 80 และ 120 องศา เมื่อครบ 28 วัน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และปล่อยให้อุณหภูมิในตัวอย่างลดลง 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและทำการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิเพื่อตรวจสอบค่ากำลังและความเร็วคลื่นปฐมภูมิของวัสดุปรับปรุงนี้ จากผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่มีปริมาณความชื้น 1.25 เท่าของ OMC. มีการพัฒนากำลัง ความเร็วคลื่นปฐมภูมิสูงสุด ผลของการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังและความเร็วคลื่นคลื่นปฐมภูมิมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า ภายใต้โครงสร้างทางเมื่อมีการปรับปรุงด้วยคุณภาพด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างทางมีเสถียรภาพในการรับแรงเฉือนได้มากขึ้น นอกจากนี้การทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยการวัดความเร็วคลื่นปฐมภูมิยังสามารถนำมาปรับใช้ในการทดสอบกำลังวัสดุสำหรับงานก่อสร้างทางได้

คำสำคัญ: ดินลูกรัง, กำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ, ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ, จีโอพอลิเมอร์

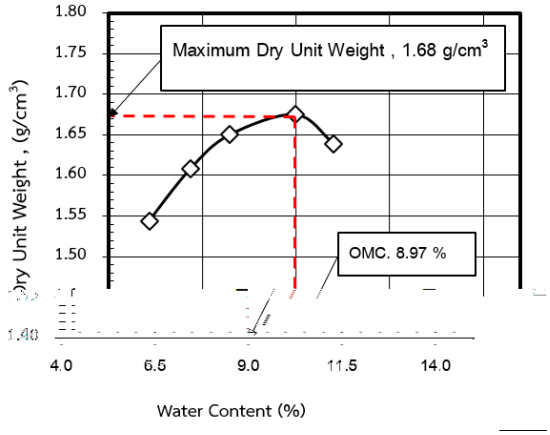
This study investigates the strength and primary wave velocity of laterite soil stabilized with geopolymer material under varying temperature conditions. The stabilization process involved replacing laterite soil with fly ash at replacement by weight with the levels of 0%, 10%, 15%, and 20%. A sodium silicate solution with a 50:50 ratio and 6 Molar concentration was used for soil compaction at moisture contents of approximately 1.0, 1.25, and 1.5 times the optimum moisture content (OMC). The specimens were subjected to heating at 40°C, 80°C, and 120°C for 48 hours after curing for 28 days, followed by a 24-hour cooling period before experimenting. The unconfined compressive and primary wave velocity tests were chosen to investigate the improvement of enrichment materials. Regarding the testing results, it can be indicated that the laterite soil stabilized with 15% fly ash and compacted at 1.25 times the OMC exhibited the highest strength and P wave velocity. Furthermore, samples exposed to 80°C demonstrated the most significant improvement in both parameters, indicating a strong correlation between temperature and strength development. These findings suggest that geopolymer-stabilized pavement structures become more stable under increased temperature conditions, enhancing their ability to resist shear forces. Additionally, P-wave velocity measurements can serve as a non-destructive method for assessing the strength of materials used in road construction.

Keywords: Laterite soil, undrained shear strength, primary wave velocity, geopolymer

บทนำ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยเฉพาะความแข็งแรงและความแข็งแกร่ง มีบทบาทสำคัญในการกำหนดความเหมาะสมของดินสำหรับการก่อสร้างและการใช้งานทางธรณีเทคนิค ดินลูกรังเป็นดินที่พบได้มากในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน และมักถูกนำมาใช้ในโครงการวิศวกรรมโยธา เช่น การก่อสร้างถนน คันดิน และโครงสร้างฐานราก อย่างไรก็ตาม ดินลูกรังส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้งานซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยทางวิศวกรรม เช่น ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูง

กำลังเฉือนต่ำ และความสามารถในการรับน้ำหนักที่ไม่ดี ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้เทคนิคการเสถียรดินเพื่อเพิ่มสมรรถนะและคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยวิธีการเสถียรดินแบบดั้งเดิมที่ถูกเลือกใช้ในช่วง 10 ปีที่ผ่าน โดยวิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธีการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวผสมกับวัสดุดินเดิมได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดิน อย่างไรก็ตาม วัสดุเสถียรเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์และปูนขาว [1] ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนมากขึ้น เช่น การใช้จีโอโพลีเมอร์ ในการเพิ่มเสถียรดิน [2],[3],[4],และ[5] จึงได้รับความสนใจอย่างมากในการประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิน จีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุปูนไฮดรอลิกที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุที่อุดมไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกต [6] เช่น เถ้าลอย หรือสแลกจากเตาถลุงเหล็ก กับสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ทำให้เกิดโครงข่ายพอลิเมอร์สามมิติที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความต้านทานทางเคมีสูง การนำจีโอโพลีเมอร์มาใช้ในการเสถียรดินเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มความแข็งแรงและปรั



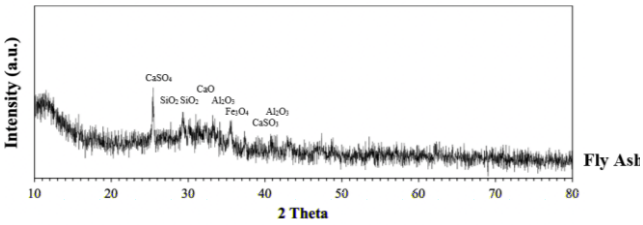
รูปที่ 2 หน่วยน้ำหนักดินแห้งและปริมาณความชื้นสำหรับการบดอัด

Fly Ash: FA)

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุผลิตผลจากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เถ้าลอยที่ใช้ในศึกษาถูกเก็บตัวอย่างมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินจากโรงไฟฟ้า โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง จำแนกเป็นเถ้าลอยชนิดนี้มีปริมาณแคลเซียมสูง ดังรูปที่ 3 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยผ่านวิธีการ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งสามารถตรวจสอบแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าลอยได้ ดังสรุปไว้ใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
Fly ash	24.25	13.43	18.34	29.56	6.46	0.6



รูปที่ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยวิเคราะก์ด้วย (XRD)

3

สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารละลายอัลคาไลน์ที่ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และซิลิกา (SiO_2) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ไรเซชันในจีโอพอลิเมอร์ โดยมีอัตราส่วน SiO_2/Na_2O ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมความหนืดและความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย โดยสารละลายที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เมื่อทำการเจือจางด้วยน้ำจะมีความเข้มข้น 6 โมลาร์

ในการศึกษาครั้งนี้ดินลูกรังที่นำมาเป็นส่วนผสมสำหรับการศึกษาจะถูกควบคุมสัดส่วนโดยดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 จำนวน 0.33 เปอร์เซนต์ ดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 10 จำนวน 44.7 เปอร์เซนต์ ดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 16 จำนวน 18.6 เปอร์เซนต์ ดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 40 จำนวน 22.4 เปอร์เซนต์ และดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จำนวน 10.7 เปอร์เซนต์ วิธีปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าลอยจะแบ่งสัดส่วนสำหรับการศึกษาในครั้งนี้โดยออกแบบส่วนผสมที่แตกต่างกัน 4 ส่วนผสมได้แก่ 100:0, 90:10, 85:15, และ 80:20 ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัย เลือกใช้สัดส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งเป็นสารละลายที่เตรียมด้วยตัวกระตุ้นที่มีฤทธิ์เป็นด่างและน้ำในอัตราส่วน 50:50 [10] ความเข้มข้นของสารละลาย 6 โมลาร์ ทำการผสมและทำการอัดขึ้นรูปตัวอย่างในโมลเหล็ก ภายใต้ความชื้นสำหรับการบดอัด (OMC) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1.0, 1.25 และ 1.5 เท่า โดยวิธีการผสมของ FA:LS โซเดียมซิลิเกตร่วมกับน้ำแสดงไว้ในรูปที่ 4 สำหรับเทคนิคการอัดแน่นของดินซึ่งถูกเลือกและนำมาใช้เพื่อกำหนดความแข็งแรงของดินในตัวอย่างดินที่ผสมจะทำการอัดขึ้นรูปตัวอย่างด้วยแม่แรงไฮดรอลิกในโมลเหล็กด้วยทำการขึ้นรูปตัวอย่างเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร โดยทำการควบคุมปริมาณตัวอย่างดินซึ่งคำนวณจากค่าความหนาแน่นแห้ง, γ_d และใช้ประมาณความชื้น, w สำหรับการบดอัดดังสมการที่ (1)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w} \tag{1}$$

โดยน้ำหนักดินสำหรับการบดอัดได้จากสมการที่ (2)

$$m_t = \left(A_m \, \gamma_d (1+w)\right) h_{compac} \tag{2}$$

เมื่อ m_t เป็นน้ำหนักดินสำหรับบดอัด, A_m คือพื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่างและ h_{compac} คือความสูงของดินที่บดอัด



รูปที่ ดินลูกรังผสมเถ้าลอยและสารละลายโซดียมซิลิเกต

สำหรับตัวอย่างการวัดค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิทางอ้อมการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัดค่าจะเตรียมชิ้นตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยมีความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตรและมีความสูง 20 เซนติเมตร ทำการควบคุมความหนาแน่นเช่นเดียวกับตัวอย่างรูปทรงกระบอก สำหรับตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบทั้งกรณีศึกษานี้ตามตารางที่ 1 ได้แสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 สัดส่วนของ FA:LS และปริมาณความชื้น

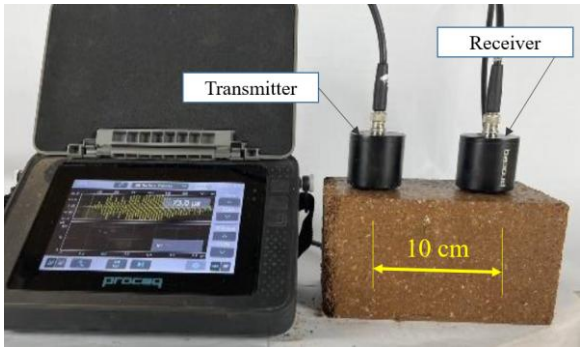
OMC	Sample FA:LS S[%]-F[%]	Alkali-activators Na_2SiO_3 :H_2O
1.00 OMC	S100-F0	Only H_2O
1.00 OMC	S90-F10	50:50
	S85-F15	
	S80-F20	
1.25 OMC	S90-F10	
	S85-F15	
	S80-F20	
1.50 OMC	S90-F10	
	S85-F15	
	S80-F20	

UPV Test เป็นการทดสอบที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อประเมินคุณภาพของวัสดุแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing - NDT) โดยการวัดความเร็วของคลื่นผ่านวัสดุเพื่อวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ความพรุน และความแข็งแรงของวัสดุ โดยใช้หลักการส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านวัสดุและวัดเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่น เพื่อคำนวณความเร็วของคลื่นในวัสดุ โดยทั่วไปคลื่นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 20 kHz – 500 กิโลเฮิรตซ์ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุความเร็วของคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

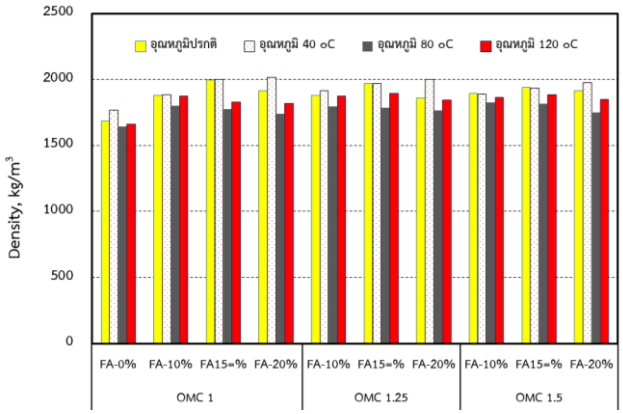
$$Vp = \frac{L}{t} \qquad (3)$$

Vp = ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (m/s) L = ระยะทางที่คลื่นเดินทาง (m) และ t = เวลาเดินทางของคลื่น (s)

สำหรับการวัดความเร็วคลื่นปฐมภูมิแบบทางอ้อม ใช้สมการเดียวกับวามความเร็วคลื่นปฐมภูมิในการคำนวณ แต่ในการวัดแบบทางอ้อม เส้นทางการเดินทางของคลื่น ($L1$)ไม่ได้เป็นเส้นตรงเหมือนการวัดแบบทางตรง เนื่องจากคลื่นมีการสะท้อนและกระจายตัวในเนื้อวัสดุ ดังนั้น ค อ รง รธ เอน□- ังดั าเดในเนื ิน



รูปที่ 7 การวัดค่าเวลาเดินทางของคลื่นผ่านตัวอย่างดินปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์แบบทางอ้อม (Indirect Transmission)



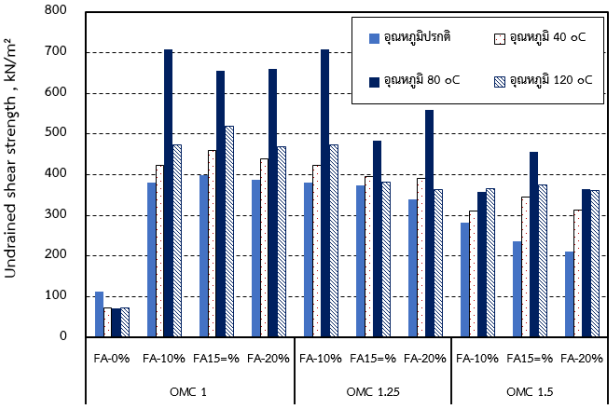
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่นของตัวอย่างดินปรับปรุง คุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลการทดสอบ

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่นของดินจีโอพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย (Fly Ash: FA) ภายใต้สภาวะต่างความชื้น (OMC) เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินพฤติกรรมของวัสดุจีโอพอลิเมอร์กับความร้อนในงานวิศวกรรมดินและโครงสร้าง โดยเฉพาะในบริบทของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเถ้าลอย ปริมาณความชื้นและผลของการรับความร้อนที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของตัวอย่างดินจีโอพอลิเมอร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40°C เป็น 120°C ในทุกสัดส่วนของเถ้าลอยที่ผสมอยู่ ได้แก่ 0%, 10%, 15% และ 20% ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานที่ว่า ความร้อนส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โครงสร้างภายในเกิดช่องว่างมากขึ้น และนำไปสู่การลดลงของความหนาแน่นโดยรวม ผลของตัวอย่างที่มีเถ้าลอย 0% และ 5% มีความหนาแน่นสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 40°C แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นระเหยออกจากตัวอย่าง ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง ในขณะที่กลุ่มที่มีสัดส่วนเถ้าลอย 10% และ 15% แสดงค่าความหนาแน่นที่ค่อนข้างคงที่มากกว่า โดยมีการลดลงของค่าความหนาแน่นในอัตราที่ต่ำกว่า จึงเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินจีโอพอลิเมอร์ให้ทนต่ออุณหภูมิได้ดีและยังคงความหนาแน่นในระดับที่เหมาะสม สำหรับการใช้เถ้าลอยที่ 20% พบว่ามีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ อาจเนื่องมาจากการที่ปริมาณเถ้าลอยมากเกินไปส่งผลให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น รวมถึงอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันไม่สมบูรณ์ จึงไม่สามารถสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงและหนาแน่นได้เพียงพอ ดังนั้นจากการศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการใช้งานภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงคือ 10–15% ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สมดุลระหว่างความหนาแน่นและความทนทานต่ออุณหภูมิ

Undrained Shear Strength)

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนที่ไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) กับปริมาณเถ้าลอยที่ผสมกับดินลูกรัง ในสัดส่วน 0%, 10%, 15% และ 20% ดังแสดงในรูปที่ 9 จากรูปพบว่าภายใต้สภาวะความชื้นต่างกันที่ 1, 1.25 และ 1.5 เท่า รวมถึงผลกระทบของอุณหภูมิ อุณหภูมิปกติ, 40°C, 80°C และ 120°C จากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณเถ้าลอยส่งผลต่อกำลังเฉือนของดินลูกรัง อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อ ไม่มีเถ้าลอย (FA-0%) กำลังเฉือนต่ำที่สุดในทุกสภาวะความชื้นและอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมเถ้าลอยในปริมาณ 10% และ 15% กำลังเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเริ่มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มเป็น 20% ซึ่งอาจเกิดจากการลดประสิทธิภาพการยึดเกาะของอนุภาคดินและเถ้าลอย ในส่วนของ ผลกระทบของปริมาณน้ำ (OMC 1, OMC 1.25 และ OMC 1.5) พบว่า OMC 1.25 ให้กำลังเฉือนที่สูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณความชื้นที่พอเหมาะสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าลอยและดิน เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มเป็น OMC 1.5 กำลังเฉือนลดลงอย่างชัดเจน

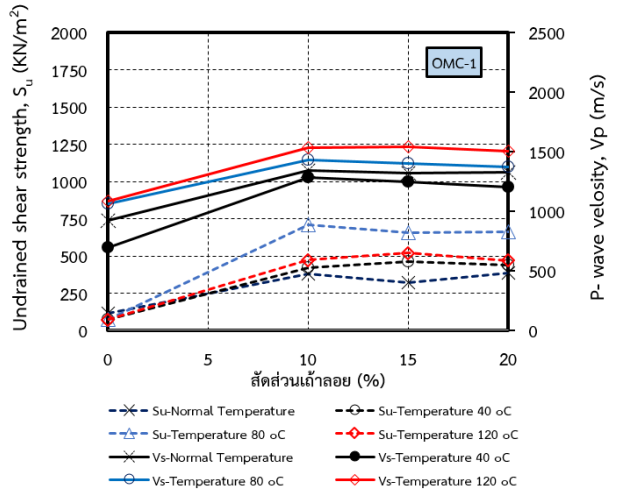


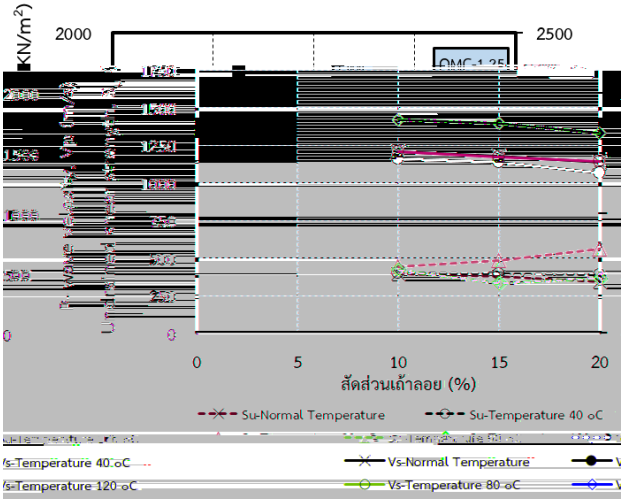
รูปที่ การวัดค่าเวลาเดินทางของคลื่นผ่านตัวอย่างดินปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์แบบทางตรง (Direct Transmission)

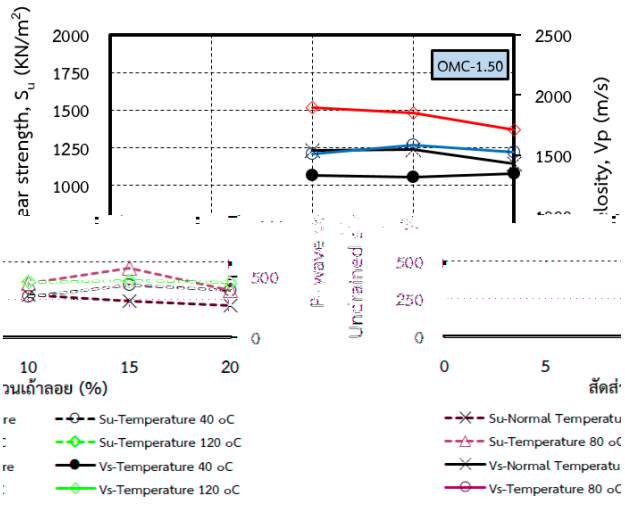
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความชื้นที่มากเกินไป จะเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการลดความสามารถในการรับแรงเฉือนของดิน ผลกระทบของอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังเฉือน โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้กำลังเฉือนเพิ่มขึ้นตามลำดับ พบว่าที่ 80°C ให้กำลังเฉือนสูงสุด ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการแข็งตัวของเถ้าลอยที่สมบูรณ์ขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้น การใช้เถ้าลอยผสมดินลูกรังสามารถเพิ่มกำลังเฉือนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เถ้าลอย 15% ที่ OMC 1.25 และผ่านการให้ความร้อนที่ 80°C

Primary Wave Velocity: Vp)

รูปที่ 10a ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเถ้าลอย (Fly Ash; FA) ร้อยละ 0–20% กับค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบาย (Undrained Shear Strength; Su) และค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave velocity; Vp) ของดินจีโอพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะความชื้นเท่ากับ (OMC=1) และอุณหภูมิทดสอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิปกติ, 40°C, 80°C และ 120°C พบว่าทั้งค่า Su และ Vp มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าลอยและอุณหภูมิอย่างชัดเจนการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจาก 0% ถึง 15% ส่งผลให้ทั้งค่า Su และ Vp เพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงและความแน่นของโครงสร้างภายในของดินจีโอพอลิเมอร์ โดยเฉพาะในช่วงเถ้าลอย 10–15% ที่ให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนและความเร็วคลื่นปฐมภูมิสูงที่สุด ขณะที่สัดส่วนเถ้าลอย ที่ 20% กลับแสดงค่าที่ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความพรุนที่เพิ่มขึ้นหรือปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สมบูรณ์เมื่อมีเถ้าลอย มากเกินไป ในด้านของอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากปกติไปจนถึง 120°C มีผลชัดเจนต่อการเพิ่มค่า Vp โดยเฉพาะในสัดส่วนเถ้าลอยที่เหมาะสม อุณหภูมิช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความหนาแน่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับค่า Su พบว่าค่าสูงสุดมักเกิดในช่วงอุณหภูมิ 40–80°C และลดลงเล็กน้อยที่ 120°C ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างบางส่วนเริ่มเสื่อมสภาพจากความร้อนที่สูงเกินไป สำหรับค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบาย (Undrained Shear Strength; Su) และค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P wave velocity; Vp) ของดินจีโอพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะความชื้นเท่ากับ (OMC=1.25) ดังรูปที่ 10b พบว่า Su และ Vp มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจาก 10% ไปถึง 20% เป็นเพราะความชื้นส่วนเกินส่งผลต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเกิดความพรุน ลดทอนคุณสมบัติเชิงกล ในด้านของอุณหภูมิ พบว่าค่า Vp มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ 120°C ให้ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิสูงที่สุดในทุกสัดส่วนของ FA สะท้อนว่าอุณหภูมิสูงช่วยเร่งการพัฒนาโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ได้ดี อย่างไรก็ตาม ค่า Su ไม่แสดงการเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มที่มี FA 15–20% ซึ่งค่า Su กลับลดลงที่อุณหภูมิ 120°C อาจเกิดจากโครงสร้างที่เปราะบางจากความชื้นเกินไม่สามารถทนความร้อนได้ สำหรับผลจากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขความชื้นเหมาะสม (OMC - 1.5%) ดังรูปที่ 10c ค่าความแข็งแรงเฉือนแบบไม่ระบาย (Su) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 80°C และ 120°C มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าทุกกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของดินอย่างชัดเจน ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนเถ้าลอยจาก 5% เป็น 20% ส่งผลต่อค่า Su ไม่มากนัก โดยค่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 5–15% แล้วคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่าเถ้าลอยมีผลต่อความแข็งแรงในระดับหนึ่ง แต่ไม่มากเท่าผลของอุณหภูมิ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงซึ่งกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโปซโซลานิก ส่งผลให้เกิดการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของดิน ในส่วนของค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) ก็แสดงแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ Vp ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 80°C และ 120°C ซึ่งแสดงว่าดินมีโครงสร้างภายในที่แน่นและแข็งแรงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน ในขณะที่ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อค่า Vp มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่เด่นชัดเท่าอุณหภูมิ โดยค่า Vp จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงสัดส่วนเถ้าลอย 5–15% และเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วง 20% ดังนั้น จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเถ้าลอย (Fly Ash; FA) อุณหภูมิ และค่าความชื้นสำหรับการบดอัดต่อคุณสมบัติเชิงกลของดินจีโอพอลิเมอร์ โดยพิจารณาค่าความต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบาย (Undrained Shear Strength; Su) และค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave velocity; Vp) พบว่าองค์ประกอบทั้งสามมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุที่ได้ โดยเฉพาะเมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 10a–10c ซึ่งครอบคลุมสภาวะ OMC ที่ 1.0, 1.25 และ 1.5 เท่าตามลำดับที่ OMC = 1.0 พบว่าการเพิ่มสัดส่วน FA จาก 0% ไปถึง 15% ส่งผลให้ค่า Su และ Vp เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วง เถ้าลอย 10–15% ซึ่งแสดงค่าที่สูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเถ้าลอย ถึง 20% ค่าทั้งสองกลับลดลงเล็กน้อย อาจเกิดเกิดจากโครงสร้างที่พรุนมากขึ้นหรือปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับผลของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่า Vp เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกสัดส่วน เถ้าลอยขณะที่ค่า Su เพิ่มขึ้นถึงช่วง 80°C แล้วลดลงเล็กน้อยที่ 120°C อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างภายในดินที่ได้รับความร้อนสูงเกินไป ที่ OMC = 1.25 พบว่า Su และ Vp มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วน FA เพิ่มขึ้นเกิน 10% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความชื้นส่วนเกินอาจรบกวนกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ทำให้โครงสร้างวัสดุไม่สมบูรณ์และลดทอนคุณสมบัติเชิงกล อย่างไรก็ตาม ค่า Vp ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แสดงว่าอุณหภูมิยังมีผลดีต่อโครงสร้างโดยรวม ในขณะที่ Su ไม่แสดงแนวโน้มที่แน่ชัดและอาจได้รับผลกระทบจากทั้งความชื้นและโครงสร้างที่ไม่เสถียรที่ OMC เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิกลายเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มค่าความแข็งแรง โดยเฉพาะที่ 80°C และ 120°C ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่าทุกกรณี ขณะที่ผลของ FA มีน้อยลง โดยค่า Su และ Vp เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ FA 5–15% และค่อนข้างคงที่ที่ 20% แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงมีอิทธิพลต่อการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีมากกว่าสัดส่วนของเถ้าลอย จากงานวิจัยบ่งชี้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของดินจีโอพอลิเมอร์มากที่สุดคืออุณหภูมิ รองลงมาคือปริมาณ FA และค่าความชื้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิช่วงระหว่าง 80–120°C ร่วมกับเถ้าลอย 15% และค่าความชื้นที่ 1.25 จะให้คุณสมบัติเชิงกลดีที่สุดสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม.

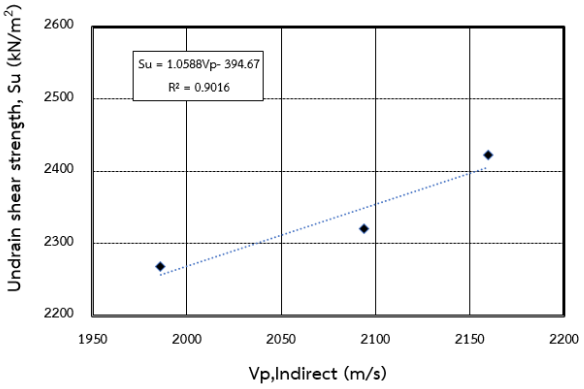






รูปที่ 10 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ความเร็วคลื่นปฐมภูมิที่ค่าความชื้น a) ความชื้น OMC เท่ากับ 1 b) ความชื้น OMC เท่ากับ 1.25 และ c) ความชื้น OMC=1.50

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบาย (Undrained Shear Strength, Su) และความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave velocity, Vp) ที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบวิธีทางตรงและวิธีการทางอ้อมดังรูปที่ 11 มีเป้าหมายเพื่อช่วยในการประเมินค่ากำลังในสนามโดยทางอ้อมโดยวิธีการไม่ต้องทดสอบแบบทำลาย โดยประมาณการจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vp กับ Su พบว่า ในการหาค่า Su จากการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถประเมินค่า Su ได้จากสมการอย่างง่ายในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (6) โดยเป็นตัวอย่างของสัดส่วนผสมของเถ้าลอยและดินลูกรังที่สัดส่วน 85:15 ที่ปริมาณความชื้นที่ 1.25 เท่า ซึ่งเป็นสัดส่วนแนะนำสำหรับการใช้งานในสนาม



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นปฐมภูมิวัดแบบทางอ้อมกับค่ากำลังรับแรงเฉือน แบบไม่ระบายน้ำ LS:FA 85:15, OMC 1.25

โดยสมการการวัดวิธี Vp Indirect method

$$Su = a\ Vp_{indirect} + C \quad (5)$$

โดยค่า a เป็นสัดส่วนของค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายและค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิแบบทางอ้อม C เป็นค่าคงที่ ดังนั้น สมการสำหรับประมาณการค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายแบบไม่ทำลายของการปรับปรุงคุณภาพของดินที่ค่าความชื้นสำหรับการบดอัดสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (6)

สมการที่ประมาณความชื้นที่ OMC เท่ากับ 1.25

$$Su = Vp_{indirect} - 394.67 \quad (6)$$

ดังนั้นสมการที่ (6) ที่ได้จากการวัดค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิในสนามของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์สามารถทำนายกำลังการรับแรงเฉือนแบบไม่ทำลายซึ่งจะช่วยให้การประเมินคุณภาพของวัสดุในภาคสนามมีความง่ายและแม่นยำมากขึ้น

4. สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมทางกลของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบาย (Su) และความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมบัติด้านความแข็งแรงและความแน่นของวัสดุที่สำคัญในงานวิศวกรรมธรณีผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า

1. การใช้เถ้าลอยในปริมาณ 15% ร่วมกับการบดอัดที่ระดับความชื้น 1.25 เท่าของค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) ทำให้ค่าทั้ง Su และ Vp เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายในเนื้อวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อได้รับความร้อนในระดับปานกลางถึงสูง 80–120°C ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น

2. การเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยมากเกินไป (20%) ทำให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนและความเร็วคลื่นปฐมภูมิลดลงเล็กน้อย โดยเฉพาะเมื่อรวมกับความชื้นที่สูงเกินพอดี สันนิษฐานว่า เกิดจากความไม่สมดุลของปฏิกิริยาเคมีและการเกิดโพรงอากาศภายในวัสดุ อันส่งผลต่อความเสถียรของโครงสร้างวัสดุในภาพรวม

3. ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (Vp) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงของดินที่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Vp สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินคุณภาพวัสดุในรูปแบบที่ไม่ทำลายโครงสร้าง และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมคุณภาพในภาคสนาม

4. ความเร็วคลื่นปฐมภูมิสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่ากำลังอัดแบบไม่ระบายและสามารถใช้เป็นวิธีทดสอบที่ไม่ทำลายโครงสร้างได้ดังนั้น การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ร่วมกับเถ้าลอยมีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังให้มีสมรรถนะทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อควบคุมปริมาณเถ้าลอยและอุณหภูมิการบ่มอย่างเหมาะสม การวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินคุณภาพวัสดุในงานก่อสร้างทางได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี วิชาโครงงาน ที่ช่วยให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชมงคลกรุงเทพที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Dang, L.C., B. Fatahi, and H. Khabbaz, (2016). Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. Procedia engineering, 143: p. 658-665.

[2] Abdullah, H.H., M.A. Shahin, and M.L. Walske (2020). Review of fly-ash-based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay. Geosciences, 2020. 10(7): p. 249.

[3] ชูศักดิ์ คีรีรัตน์, ปิยะพงศ์ กิ่สวัสดิ์คอน, และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล, (2021) การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานทาง. Rattanakosin Journal of Science and Technology, 3(2): p. 9-18.

[4] AhMAd, M., et al., (2024) Stabilization of lateritic Soil uSing fly aSh baSed geopolymer. Archives of Metallurgy and Materials: p. 1165-1173.

[5] NAEEM, Z.T., A.R. AL-ADHADH, and T.H. WAZI, (2024). Evaluating the Strength and Durability Properties of Geopolymer-Stabilized Soft Soil for Deep Mixing Applications: p. 757-765.

[6] กมลวรรณ วงษ์ขันธ์, กฤษฎา บุญรัตน์, และ โชคชัย ไตรยสุทธิ์, (2022) การ ปรับปรุงคุณภาพเศษคอนกรีตด้วยไฮดรอลิกซีเมนต์สำหรับวัสดุงานทาง. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้ง ที่ 27, 2022. 27: p. MAT17-1-MAT17-6.

[7] Liu, F., H. Luo, and X. Wan, (2024) Experimental study of the mechanical and thermal properties of metakaolin based geopolymer stabilized soil during low temperature curing. Cold Regions Science and Technology, 218: p. 104085.

[8] Lemougna, P.N., et al., (2014). Influence of the processing temperature on the compressive strength of Na activated lateritic soil for building applications. Construction and Building Materials, 65: p. 60-66.

[9] Belinga Essama Boum, R., et al., (2022) Thermal behavior of acidic and alkali-activated laterite based geopolymer: a comparative study. Geosystem Engineering, 25(5-6): p. 225-238.

[10] Suksiripattanapong, C., et al., (2022) Properties of soft Bangkok clay stabilized with cement and fly ash geopolymer for deep mixing application. Case Studies in Construction Materials, 16: p. 01081.