



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์โดยใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ

Prediction of unconfined compressive strength of soft clay improved with cement and fly ash geopolymer using multiple-linear regression method

วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง¹ ณัฐญา วงละคร^{2*} รัชชานนท์ ศักดินากรณ์³ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์³

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา 90000

² สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000

Wisitsak Tabyang¹ Nattiya Wonglakorn^{2*} Ratchanon Sakdinakon³ Cherdasak Suksiripattanapong⁴

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000

² Department of Information and Communication Technology, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: nattiya.wo@muti.ac.th; Telephone: 083 740 8520

วันที่รับบทความ 26 เมษายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 22 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์โดยใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ ดินเหนียวอ่อนเก็บที่ความลึก 5-8 เมตร บริเวณเขตคลองเตย กรุงเทพฯ เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ และปริมาณความชื้น ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณความชื้นและปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อกำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ลดลงและปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ คือ อัตราส่วนดินต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 70:30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 95:5-70:30 ปริมาณสารกระตุ้นตัววัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.6 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL สมการที่ได้จากวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุมีประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (R^2) เท่ากับ 0.878

คำสำคัญ

ดินเหนียวอ่อน เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ

Abstract

This paper investigated the prediction of unconfined compressive strength of soft clay improved with cement and fly ash geopolymer using a multiple linear regression method. Soft clay (c) was collected at a depth of 5-8 m. from Klong

Toey in Bangkok. Fly ash (FA) was obtained from the Mae Moh power plant in Lampang. Factors influencing this study were cement content, $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ratio, and water content. The results showed that water content and cement content affect the unconfined compressive strength of the soft clay improved with cement and fly ash geopolymers samples. The unconfined compressive strength of the samples increased with a decrease in water content and increase in cement content. The optimum ingredient of soft clay improved with cement and fly ash geopolymer sample was found at c:binder ratio of 70:30, FA:C ratios between 95:5-70:30, liquid alkaline:binder ratio of 0.6, $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ratio of 50:50, the concentration of NaOH of 8 molar and water contents of LL, 1.5LL, and 2.0LL. This equation using the multiple linear regression method is useful for predicting 28-day unconfined compressive strength of soft clay improved with cement and fly ash geopolymer.

Keywords

soft clay; fly ash; cement; multiple-linear regression method

1. คำนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน หรือระบบสาธารณูปโภค อาทิเช่น โครงสร้างคันดิน โครงสร้างฐานราก และโครงสร้างถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อนในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมักประสบกับปัญหาทางวิศวกรรม เนื่องจากปริมาณความชื้น (Water content) ในมวลดินสูงมีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) สูงใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้น คือมีค่าระหว่างร้อยละ 60-140 และมีค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ประมาณ 2.0 [1] ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่ำ และการทรุดตัวสูง [2] การปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ดินเหนียวอ่อนมีคุณสมบัติที่สามารถในการรับกำลังได้ ในปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยการผสมลึกในสนาม (Deep mixing) โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การผสมแบบเชิงกล (Mechanical mixing) และการผสมแบบแรงดัน (Jet mixing) [3] การนำเสาเข็มดินซีเมนต์เข้ามาในงานก่อสร้างเป็นการลดต้นทุนของซีเมนต์ในการทำเสาเข็ม และใช้ระยะเวลาสั้นในการทำ

เถ้าลอย (Fly ash, FA) เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้จากการเผาถ่านหินในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้ถ่านหินแปสสภาพอยู่ในรูปของออกไซด์ ส่วนที่ปลิวออกมากับก๊าซร้อนคือเถ้าลอย ส่วนที่ตกลงกันเตาคือเถ้าหนัก มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา และอะลูมินา ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ [4] เถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีองค์ประกอบหลัก คือซิลิกา (SiO_2) และอะลูมิ

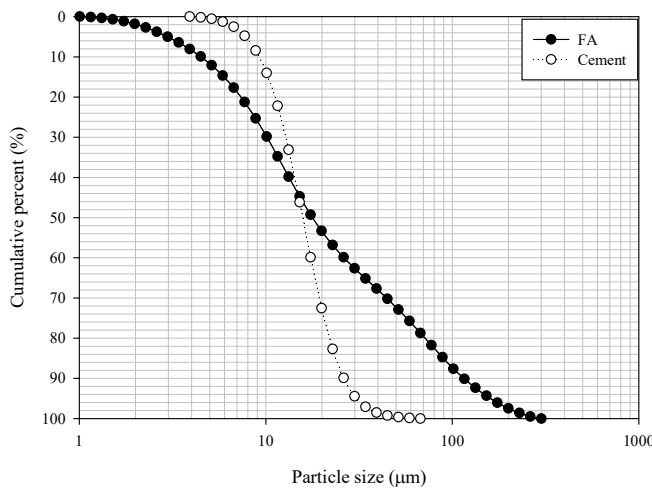
นา (Al_2O_3) เมื่อผสมกับสารละลายที่มีด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) จะทำให้มีโครงสร้างจับตัวกันเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตเป็นโครงสร้างกึ่งผลึกมีความแข็งแรง ทำให้รับแรงได้ [5]

งานวิจัยนี้ศึกษากำลั้งอัดของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโโพลีเมอร์ และทำนายกำลังอัดโดยใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ โดยแปรผัน ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น และสารกระตุ้นซึ่งเป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ที่อายุบ่ม 28 วัน สมการที่ได้จากวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุมีประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโโพลีเมอร์

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 ดินเหนียวอ่อน

ดินเหนียวอ่อน (Soft clay, c) เก็บที่ความลึก 5-8 เมตร บริเวณเขตคลองเตย กรุงเทพฯ c มีหน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight) เท่ากับ 15.97 kN/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะ (GS) เท่ากับ 2.68 ค่าขีดจำกัดของเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 63.93 ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 25.49 และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) เท่ากับ 38.44 c จำแนกได้เป็นดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH) โดยระบบเอกภาพ Unified Soil Classification System (USCS) [6]



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

2.2 วัสดุเชื่อมประสาน

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ซึ่งได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง ค่าความถ่วงจำเพาะ (GS) ของ FA เท่ากับ 2.31 องค์ประกอบทางเคมีของ FA ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] แสดงในตารางที่ 1 พบว่าปริมาณของธาตุ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ในเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 77.15 โดยน้ำหนัก ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 16.09 และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.61 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยชนิดนี้จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F (แคลเซียมสูง)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 1 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยและปูนซีเมนต์พบว่าขนาดค่าเฉลี่ยของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 กับ NaOH โดย NaOH แบบเกรดความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และละลายให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์

2.3 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ ดำเนินการดังนี้ เตรียมดินเหนียวอ่อนที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL (LL คือขีดจำกัดเหลว) วัสดุประสาน (เถ้าลอย และปูนซีเมนต์) ร้อยละ 30 โดย

การแทนที่ FA ด้วยปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักเถ้าลอย และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50, 70:30 และ 80:20

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ FA และ OPC

Chemical compositions	FA (%)	OPC (%)
SiO_2	43.10	20.93
Al_2O_3	18.95	4.35
Fe_2O_3	15.10	3.45
CaO	16.08	65.11
MgO	N.D.	1.35
SO_3	3.66	2.71
Na_2O	0.73	0.42
K_2O	1.76	0.11
LOI	0.61	0.65

N.D. = Non detective

จากนั้นนำเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ ผสมให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที แล้วเติมอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เข้าไปในส่วนผสม ผสมเป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วนำไปผสมกับดินตัวอย่างที่เตรียมไว้เป็นเวลาประมาณ 5 นาที เมื่อผสมตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงทำการเทลงแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 36 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 72 มิลลิเมตร แล้วทำการหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ หลังจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติก และเก็บไว้ในห้องที่อุณหภูมิห้อง เมื่อได้อายุบ่ม 28 วันแล้ว ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [8]

3. ผลการวิจัย

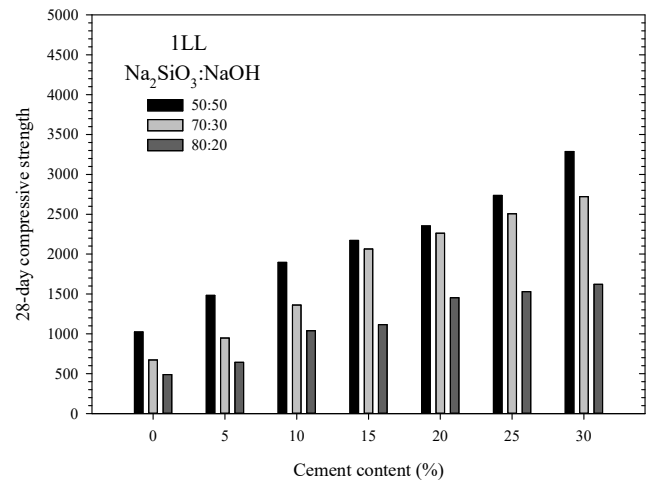
3.1 กำลังอัดแกนเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน และปริมาณปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ที่อัตราส่วนดินต่อวัสดุเชื่อมประสาน (เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์) เท่ากับ 70:30 ปริมาณ

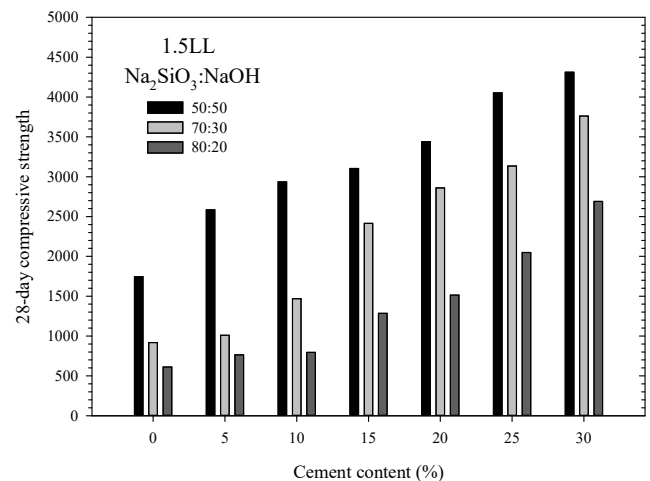
สารกระตุ้นตัววัสดุประสานเท่ากับ 0.6 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50, 70:30 และ 80:20 ดังแสดงตาม รูปที่ 2-4 ตามลำดับ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกปริมาณความชื้น และทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น [9,10] นอกจากนี้ปริมาณความชื้นส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ และทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ จนถึงค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5LL) จากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นที่น้อยเกินไป (ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL) ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่มากเกินไป (ปริมาณความชื้นเท่ากับ 2LL) ทำให้เกิดการเอิ่ม (Bleeding) และเกิดโพรง (Honey comb) ในตัวอย่าง [11] ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีกำลังอัดลดลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่ลดลง (ปริมาณ NaOH สูง) เนื่องจากปริมาณ NaOH ที่สูงสามารถชะซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย และทำปฏิกิริยากับ CaO จากปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้เกิดเจลร่วมกันระหว่าง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Sodium aluminosilicate hydrate, N-A-S-H) [12,13] ในขณะที่ปริมาณ NaOH ต่ำ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20) ปริมาณ Na_2SiO_3 ที่สูงเกินไปส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว และขัดขวางการทำปฏิกิริยาไฮเดชันของปูนซีเมนต์ [14] กำลังอัดสูงสุดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์พบที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5LL อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ

50:50 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 M และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4,311 กิโลปาสคาล



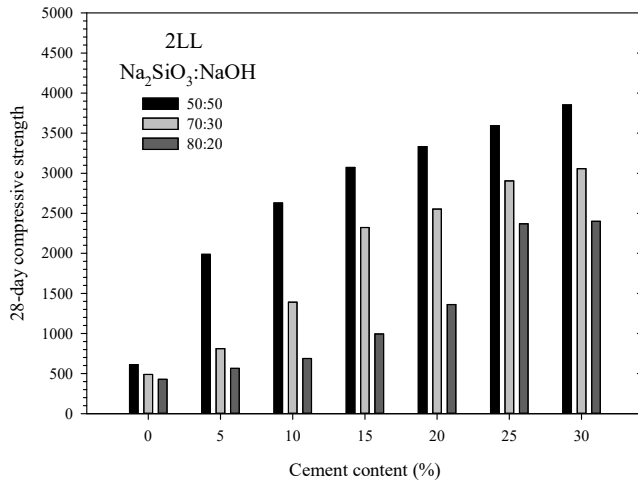
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ ที่ปริมาณความชื้น 1LL



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้น 1.5LL

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงที่กำหนดค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ต้องไม่น้อยกว่า 1,000 กิโลปาสคาล [15] จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ คือ อัตราส่วนดินต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 70:30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 95:5-70:30 ปริมาณ

สารกระตุ้นต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.6 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL



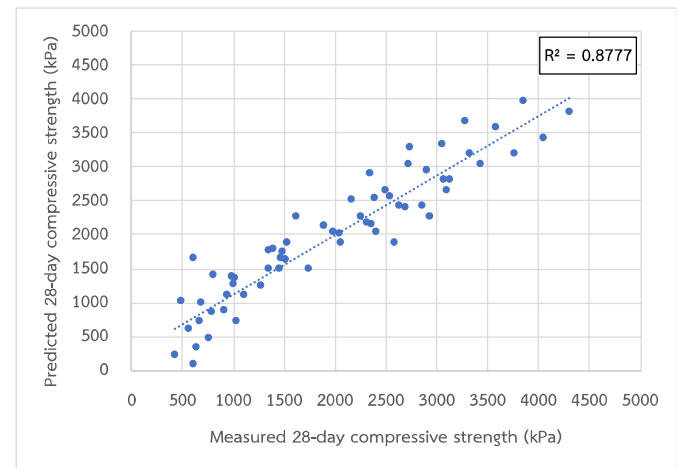
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ ที่ปริมาณความชื้น 2LL

3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ที่อัตราส่วนดินต่อวัสดุเชื่อมประสาน (เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์) เท่ากับ 70:30 ปริมาณสารกระตุ้นต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50, 70:30 และ 80:20 ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีอิทธิพลต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ เนื่องจากระดับค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังอัดแกนเดียวข้างต้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P-value
Regression	59486369	3	19828789	141	0.000
Residual	8286368	59			
Total	67772737	62			



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบและการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2 สามารถสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ ดังแสดงในสมการที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Coefficient of Determination, R^2) มีค่าเท่ากับ 0.878 ดังแสดงในรูปที่ 5

$$q_{u28days} = 1535.57 + 287.6(w) + 77.18(c) - 471.47(NS / Na) \quad (1)$$

เมื่อ $q_{u28days}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน w คือ ปริมาณความชื้น ซึ่งมีค่าระหว่าง 1-2 เท่าของ LL c คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0-30 ของน้ำหนัก FA และ NS/Na คือ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ซึ่งมีค่าระหว่าง 1-4 ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม

28 วันของตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5LL, ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 2 จะได้ $q_{u28\text{days}} = 1535.57 + 287.6(1.5) + 77.18(0.15) - 471.47(2) = 2,921.487$ กิโลปาสกาล

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ สามารถสรุปได้ว่า

1. ปริมาณปูนซีเมนต์มีผลต่อการพัฒนากำลังของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกปริมาณความชื้น และทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น

2. ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น จนถึงค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.5LL) จากนั้นกำลังอัดมีค่าลดตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นที่น้อยเกินไป (1LL) ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่มากเกินไป (2.0LL) ทำให้ตัวอย่างเกิดโพรงจากน้ำส่วนเกิน จึงทำให้มีกำลังอัดน้อยกว่า

3. กำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์มีค่าลดลง ตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ NaOH สูงสามารถชะล้างซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย และทำปฏิกิริยาร่วมกับ CaO จากปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ร่วมกับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Sodium aluminosilicate hydrate, N-A-S-H)

4. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ คือ อัตราส่วนดินต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 70:30 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 95:5-70:30 ปริมาณสารกระตุ้นต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.6 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$

เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LL, 1.5LL และ 2LL

5. สมการที่ได้จากวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุมีประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ปรินญาโท สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้สัญญาเลขที่ MSD6010076 และห้างหุ้นส่วนพรเพชรตันเจริญ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษม เพชรเกต, พินิจ ตั้งบุญเติม. การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. *ข่าวช่าง* 2536; 254: 41-45.
- [2] ขยำนันท์ ศรีเจริญ, รุ่งลาวัลย์ ราชนัน, สุขสันต์ หอพิบูลสุข. การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2557; 2:151-164.
- [3] Bredenberg H, Holm G, Bengt B. *Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*. Taylor and Francis group; 2017.
- [4] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. *วัสดุจีโอโพลีเมอร์*. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2560.
- [5] Davidovits J. Chemistry of geopolymer systems, terminology, *Proceedings of Geopolymer International Conference*, France, 1999; 9-40.
- [6] American Society for Testing and Materials. ASTM D2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM International. 2011.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International. 2015.

- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International. 2000.
- [9] Aliabdo AA, Elmoaty MA, Salem HA. Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and Building Materials* 2016; 581-593.
- [10] Kaja AM, Lazaro A, Yu QL. Effects of Portland cement on activation mechanism of class F fly ash geopolymer cured under ambient conditions. *Construction and Building Materials* 2018; 1113–1123.
- [11] Raphaëlle P, Martin C, Raphael B. Influence of the initial water content in flash calcined metakaolin- based geopolymer. *Construction and Building Materials* 2019; 421-429.
- [12] Garcia- Lodeiro I, Malseva O, Palomo A, Fernandez- Jimenez A. Hybrid alkaline cements. *Part I: Fundamentals. Romanian Journal of Materials* 2012; 330-335.
- [13] Phetchuay C, Horpibulsuk S, Arulrajah A, Suksiripattanapong C, Udomchai A. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. *Applied Clay Science* 2016; 134-142.
- [14] Keats J. Stabilization and Solidification, *In Hazardous Waste Management*, McGrawhill Book Co.; 1994, 641-642.
- [15] การควบคุมการก่อสร้างทาง เล่มที่ 2. *คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง*. กรมทางหลวง; 2550.