

กำลังและความคงทนของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์สำหรับบล็อกประสานไม่รับน้ำหนัก

รชต พรหมมาพงษ์, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ และ เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานและการขนส่งทางราง สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิศิษฎ์ศักดิ์ ทัพย์ยัง*

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5660 3230 อีเมล: wisitsak.t@rmutsv.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.027

รับเมื่อ 7 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 22 มิถุนายน 2563 ตอบรับเมื่อ 24 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังและความคงทนของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้อัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าลอยเท่ากับ 3 : 1 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50 ความเข้มข้นของ NaOH มีค่าเท่ากับ 1, 3 และ 5 โมลาร์ (M) และอายุบ่ม 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยทำการทดสอบการบดอัดกำลังอัดแกนเดี่ยว กำลังดัด และความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้งของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ พบว่า อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH และความเข้มข้นของ NaOH มีผลต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัดแกนเดี่ยว กำลังดัด และความคงทนของตัวอย่าง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสมของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 19.01 kN/m^3 และร้อยละ 18 ตามลำดับ กำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดของตัวอย่างพบที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80 : 20 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 M ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 6.55 และ 2.70 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 2.62 เท่า ปริมาณ NaOH ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ปริมาณ NaOH ที่สูงขึ้นสามารถชะลอการได้ดัดเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีความแน่นมากขึ้น

คำสำคัญ: ดินลูกรัง เถ้าลอย กำลังอัดแกนเดี่ยว สภาวะเปียกสลับแห้ง จีโอพอลิเมอร์



Strength and Durability of Lateritic Soil Mixed with Fly Ash Geopolymer as a Non-bearing Interlocking Block

Rachata Prommapong, Cherdasak Suksiripattanapong and Sermsak Tiyasangthong

Infrastructure and Rail Transportation Technologies Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

Wisitsak Tabyang*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5660 3230, E-mail: wisitsak.t@rmutsv.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.027

Received 7 May 2020; Revised 22 June 2020; Accepted 24 June 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research studies the strength and durability of lateritic soil mixed with fly ash geopolymer. The following parameters, i.e. the ratio of lateritic soil (LS) to fly ash (FA) at 3 : 1; the ratio of sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide (NaOH) at 80 : 20, 70 : 30, and 50 : 50; the concentration of NaOH of at 1, 3 and 5 Molar (M); and curing time of 7, 14, 28, 60, and 90 days were investigated in this study. The compaction test, the unconfined compressive strength (UCS), the flexural strength (FS), and the wet-dry cycles of LS mixed with FA geopolymer were evaluated. The test results showed that Na_2SiO_3 : NaOH ratio and the concentration of NaOH had an effect on dry unit weight, UCS, and FS. The maximum dry unit weight and the optimum liquid alkaline content of the sample were 19.01 kN/m^3 and 18% respectively. The maximum UCS and FS of the sample of Na_2SiO_3 : NaOH at the ratio of 80 : 20 and the concentration of NaOH of 5 Molar at 28 days curing were 6.55 and 2.70 MPa respectively. This maximum UCS was higher than the standard of non-bearing interlocking block at 2.62 times. The amount of NaOH had an effect on UCS, water absorption and weight loss of the sample. The higher NaOH content could leached silica when sample was heated, causing more dense matrix structure.

Keywords: Laterite Soil, Fly Ash, Unconfined Compressive Strength, Wet-dry Cycles, Geopolymer

Please cite this article as: R. Prommapong, C. Suksiripattanapong, S. Tiyasangthong, and W. Tabyang, "Strength and durability of lateritic soil mixed with fly ash geopolymer as a non-bearing interlocking block," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 675-684, Oct.-Dec. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

บล็อกประสานเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย การผลิตบล็อกชนิดนี้ใช้วัตถุดิบในพื้นที่ เช่น ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย หรือวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ผสมกับปูนซีเมนต์ และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแห้ง ด้วยขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตบล็อกประสานจึงแปรผันตามแหล่งดินและปูนซีเมนต์ แหล่งดินเป็นต้นทุนคงที่สำหรับพื้นที่การผลิตหนึ่ง ดังนั้น ตัวแปรต้นทุนที่สามารถปรับเปลี่ยนได้จึงเป็นเพียงปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงซึ่งส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อมและเป็นสาเหตุหลักก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) [1] และ [2]

ปัจจุบันวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานก่อสร้าง ซึ่งไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ วัสดุดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 สู่ชั้นบรรยากาศที่ปริมาณน้อย [3] จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุตั้งต้น (เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ) ที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก และทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง เถ้าลอย (Fly Ash; FA) จัดเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาค้นคว้าใช้ปริมาณการแทนที่เถ้าลอย ปริมาณสารละลาย และอุณหภูมิการบ่ม เช่น งานวิจัยในอดีต [4] ได้นำเถ้าลอยมาปรับปรุงดินลูกรังพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น Suksiripattanapong และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาค้นคว้ากำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คือ อัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนจากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมสำหรับตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 80 : 20 สำหรับทุกอัตราส่วนของ L : FA กำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอย

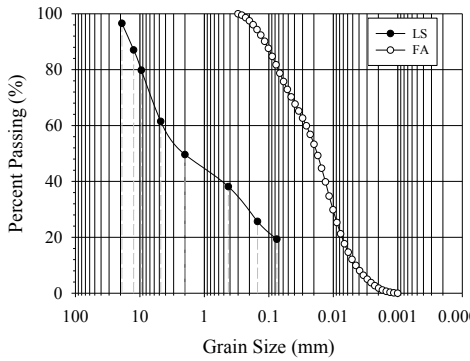
จีโอพอลิเมอร์แปรผันกับอัตราส่วน L : FA กำลังอัดที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และเงื่อนไขการบ่มค่าหนึ่ง มีค่าสูงสุดที่ L : FA เท่ากับ 1.3 (ค่าเหมาะสม) ซึ่งให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุด อุณหภูมิ และอายุบ่มตัวอย่างในตู้อบที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 75°C และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ อุณหภูมิที่สูงกว่า (85°C) จะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่าง ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ได้นำเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มาปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุให้มีความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง Hoy และคณะ [6] ศึกษาความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของแอสฟัลต์คอนกรีตไรเซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 1–12 รอบ พบว่า ค่าความคงทนของตัวอย่างมีค่าเพิ่มถึงรอบที่ 6 จากนั้นความคงทนเกิดการลดลงจนถึงรอบที่ 12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] และ [8] ที่รายงานว่าโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จะมีพันธะที่ตีขึ้นด้วยการบ่มด้วยสภาวะเปียกสลับแห้ง

ดังนั้น งานวิจัยนี้ศึกษาค้นคว้ากำลังและความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้งของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [9] ที่กำหนดค่าเฉลี่ยกำลังอัดของอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสคาล งานวิจัยนี้สามารถใช้เถ้าลอยทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ อีกทั้งยังเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ดินลูกรัง (Lateritic Soil; LS) ได้จากบ่อลูกรัง อำเภอสี่คิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ขั้นตอนการเตรียม LS เริ่มจากนำ LS ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดินลูกรังประกอบด้วยดินเม็ดหยาบร้อยละ 61 และดินเม็ดละเอียดร้อยละ 19 ค่าความถ่วงจำเพาะของ LS เท่ากับ 2.75 ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ขีดจำกัดพลาสติก (PL) และดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับร้อยละ 31, 19 และ 12 ตามลำดับ ดินลูกรังสามารถจำแนกได้เป็นดินทรายปนตะกอน (Silty Sand; SM) โดยระบบ USCS



รูปที่ 1 ขนาดคละของ LS และ FA

(รูปที่ 1) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่พลังงานบดอัดสูงกว่ามาตรฐานของ LS เท่ากับ 20.93 kN/m^3 และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ร้อยละ 9.90

เถ้าลอย (Fly Ash; FA) เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ FA ส่วนประกอบหลักทางเคมีของ FA ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 43.10 อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 18.95 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 14.10 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 16.09 ซึ่งสามารถจำแนกเป็นเถ้าลอย Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10] ขนาดคละเฉลี่ยของ FA มีค่าเท่ากับ 20 ไมครอน (รูปที่ 1)

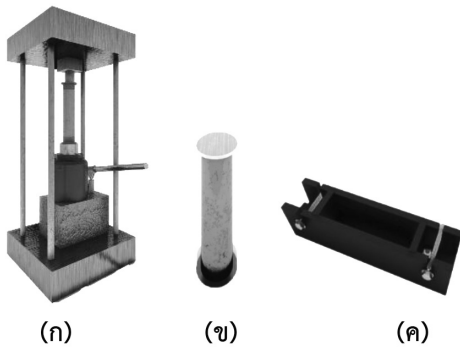
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ LS และ FA

Chemical compositions	LS (%)	FA (%)
SiO_2	66.44	43.10
Al_2O_3	8.16	18.95
Fe_2O_3	8.23	14.10
CaO	10.99	16.09
MgO	0.72	-
SO_3	0.06	3.66
Na_2O	0.05	0.73
K_2O	3.00	1.76
LOI	2.35	1.61

สารละลายต่าง (Liquid Alkaline; L) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มีค่าเท่ากับ 1, 3 และ 5 โมลาร์ ซึ่งเตรียมโดยการชั่ง NaOH แบบเกล็ด ที่ 40, 120 และ 200 กรัม และผสมกับน้ำให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นผสมจนน้ำใสแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50

2.2 การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ

ขั้นตอนการผสมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยการนำดินลูกรัง (LS) ที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ผสมกับเถ้าลอย (FA) แล้วผสมให้เข้ากันที่อัตราส่วน LS : FA เท่ากับ 3 : 1 โดยน้ำหนัก รวม จากนั้นนำปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content; OLC) ซึ่งได้จากการทดสอบการบดอัดดินมาผสมกับตัวอย่าง LS-FA ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ต่างๆ แล้วทำการผสมให้ให้เป็นเนื้อเดียวกัน รวมระยะเวลาการผสมตัวอย่างประมาณ 5 นาที หลังจากเสร็จกระบวนการผสมตัวอย่างแล้ว นำตัวอย่างมาอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดตัวอย่างแบบหล่อเหล็กทรงกระบอก ดังรูปที่ 2 (ก) ตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2 (ข) และตัวอย่างคานมีขนาดเท่ากับ $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร ดังรูปที่ 2 (ค) ลักษณะตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) จากนั้นทำการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ และห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ เมื่อตัวอย่างมีอายุบ่มเท่ากับ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM 2166 [11] กำลังตัดโดยใช้วิธี Third-Point Loading ตามมาตรฐาน ASTM D1635 [12] การทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D599 [13]



รูปที่ 2 เครื่องมือ (ก) เครื่องขึ้นรูปตัวอย่าง (ข) แบบหล่อทรงกระบอก (ค) แบบหล่อนาน

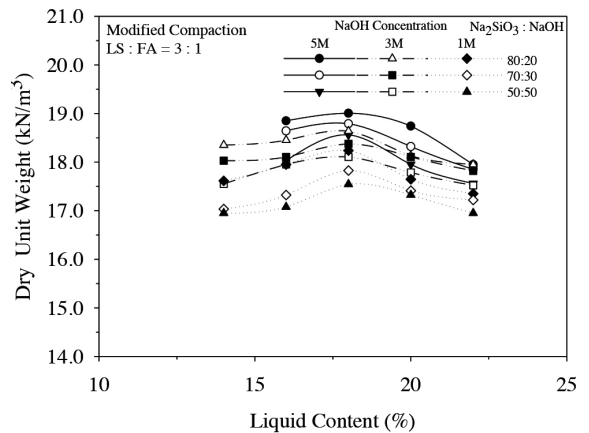


รูปที่ 3 ลักษณะตัวอย่าง (ก) ตัวอย่างคาน (ข) ตัวอย่างทรงกระบอก

3. ผลการทดลอง

3.1 การบดอัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์พบว่า หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ยกตัวอย่างเช่น หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 18.56, 18.79 และ 19.01 kN/m^3 สำหรับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50, 70 : 30 และ 80 : 20 ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ L เพิ่มขึ้น เนื่องจาก L สามารถชะซึลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอย ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างแน่นขึ้น เมื่อปริมาณ $L > \text{OLC}$ (OLC คือปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม) หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ L ที่มากเกินไปทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของตัวอย่าง LS-FA ซึ่งส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างลดลง ตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 :$



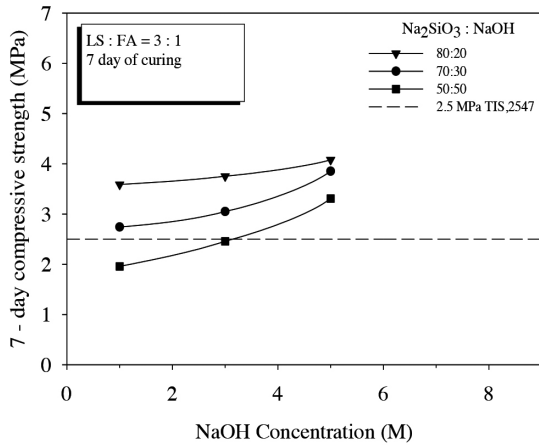
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณสารกระตุ้นของดินลูกรังผสมเถ้าลอย จีโอพอลิเมอร์

NaOH เท่ากับ 80 : 20 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ มีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในขณะที่ OLC ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีค่าประมาณร้อยละ 18 ของน้ำหนักดินลูกรังสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และความเข้มข้นของ NaOH

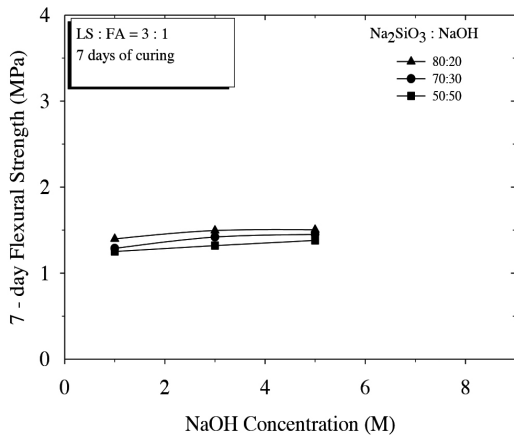
3.2 กำลังอัดแกนเดียวและกำลังตัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

รูปที่ 5 และ 6 แสดงกำลังอัดแกนเดียวและกำลังตัดที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1, 3 และ 5 โมลาร์ และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังตัดของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของ Na_2SiO_3 เนื่องจากปริมาณ Na_2SiO_3 ที่สูงขึ้นจะทำให้ SiO_2 ในระบบเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยา และจับตัวกันได้อย่างรวดเร็ว [14] และยิ่งทำให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของ NaOH สูงสามารถชะซึลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย ซึ่งส่งผลให้เกิด Sodium Aluminum Silicate Hydrate (NASH) เจล [15]

อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80 : 20 และความ

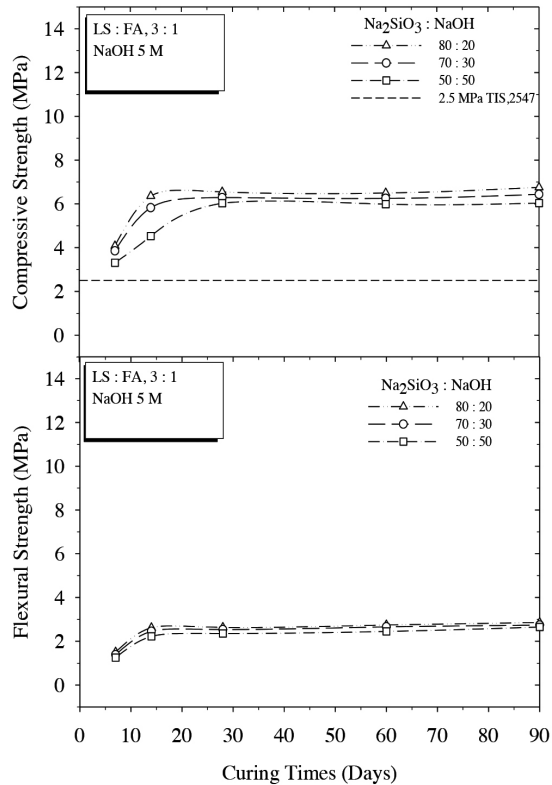


รูปที่ 5 กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ต่างๆ



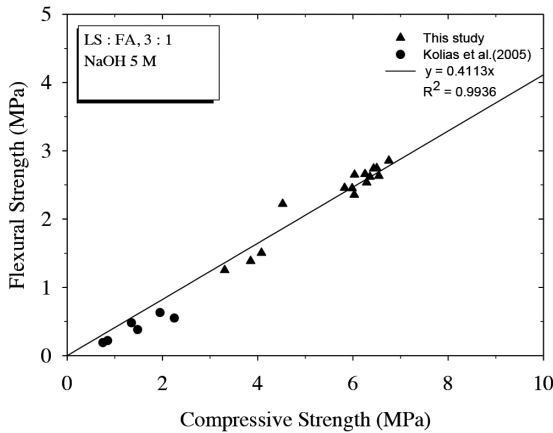
รูปที่ 6 กำลังดัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ต่างๆ

เข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ ให้กำลังอัด และกำลังดัดสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.55 และ 2.70 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดกับมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก (มผช.602-2547) [9] ซึ่งระบุกำลังอัดไว้ไม่น้อย 2.5 เมกกะปาสคาล พบว่า กำลังอัดที่อัตราส่วนผสมข้างต้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 2.62 เท่า



รูปที่ 7 การพัฒนา กำลังอัด และกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงการพัฒนา กำลังอัด และกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ พบว่า สำหรับอายุบ่มระหว่าง 7-28 วัน การพัฒนา กำลังของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80 : 20 และ ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 4.08, 6.36 และ 6.55 เมกกะปาสคาล สำหรับอายุบ่มเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่กำลังดัดมีค่าเท่ากับ 1.50, 2.62 และ 2.70 เมกกะปาสคาล สำหรับอายุบ่มเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เนื่องจาก Na_2SiO_3 และ NaOH สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง สำหรับอายุบ่มมากกว่า 28 วัน การพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

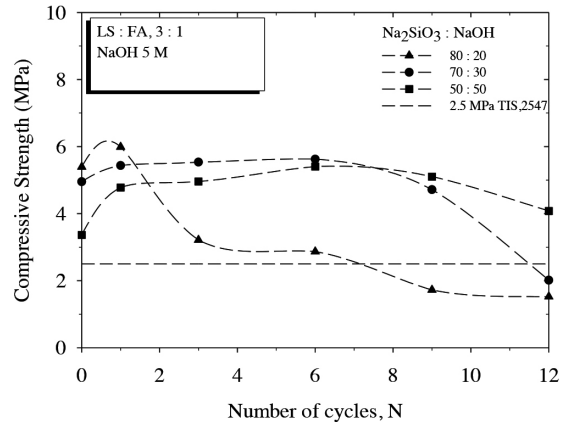


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ และเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kolas และคณะ [16] พบว่ากำลังดัดมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดแกนเดียวประมาณร้อยละ 60 เนื่องจากธรรมชาติของตัวอย่างทดสอบแรงดัดขนานกับหน่วยแรงในแนวตั้ง [17] เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kolas และคณะ [16] พบว่า กำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงกว่าดินเหนียวปรับปรุงด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูงและซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

3.3 ความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

รูปที่ 9 แสดงกำลังอัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งเท่ากับ 1 รอบ เนื่องจากตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เกิดการกระตุ้นผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์โซเดียม (Sodium Alumino-Silicate Hydrate; N-A-S-H) [18] และ [19] สำหรับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเท่ากับ 1 ถึง 6 รอบ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 70 : 30 และ 50 : 50 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณ NaOH ยังเหลืออยู่ในระบบ และ

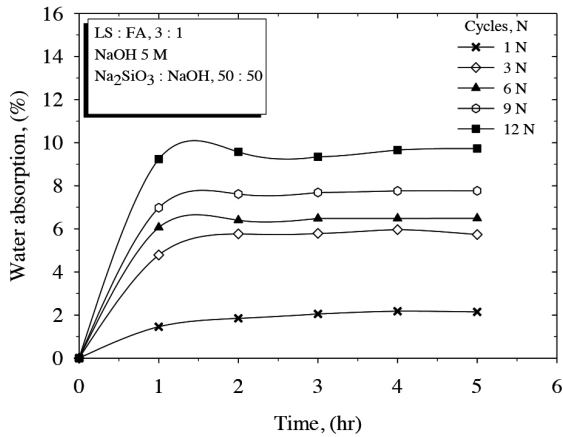


รูปที่ 9 กำลังอัดภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

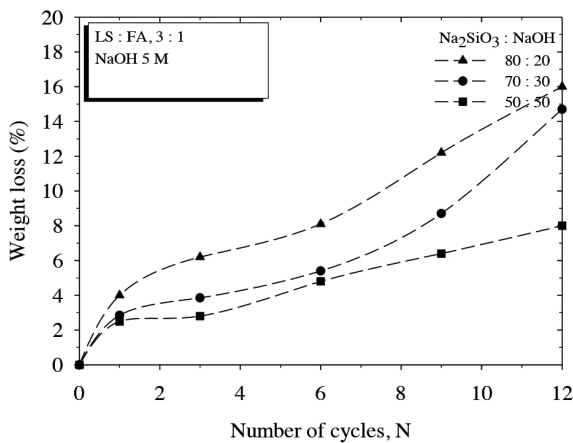
สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80 : 20 มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณ NaOH ที่ต่ำไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โซเดียม [5] เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งมากกว่า 6 รอบ โครงสร้างภายในของตัวอย่างจะเกิดการยึดและการหดตัว จนทำให้เกิดรอยแตกในระดับจุลภาค เป็นผลให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างและการซึมผ่านของน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้กำลังลดลง [6] และ [16]

เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดกับมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก (มผช.602-2547) [9] พบว่าที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งเท่ากับ 12 รอบ อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังผ่านเกณฑ์มาตรฐานคืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50 ซึ่งให้กำลังอัดเท่ากับ 4.07 เมกะปาสคาล

รูปที่ 10 แสดงการดูดซึมน้ำภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งพบว่า การดูดซึมน้ำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาการแช่น้ำเท่ากับ 1 ชั่วโมง จากนั้นการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมีค่าคงที่ สำหรับทุกจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง เนื่องจากในช่วง 1 ชั่วโมงแรกตัวอย่างมีปริมาณช่องว่างค่อนข้างมาก จากนั้นตัวอย่างเริ่มที่จะอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าคงที่ การดูดซึมน้ำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างเกิดการหดตัว และการขยายตัว



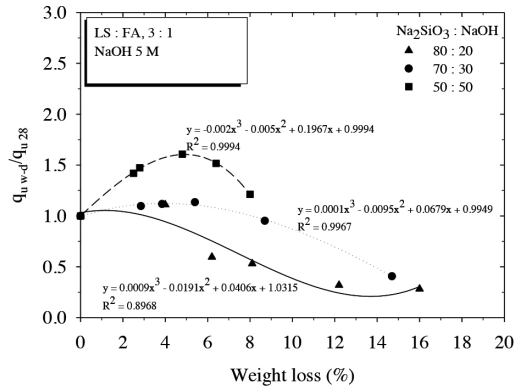
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำต่อสภาวะเปื่อยกลับแห้งที่ 1-12 รอบ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักต่อสภาวะเปื่อยกลับแห้งที่ 1-12 รอบ

ซึ่งทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกร้าว และส่งผลให้ตัวอย่างดูดซึมน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50 มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0.10-9.00 เนื่องจากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากสามารถชะซิลิกาได้ดี เมื่อได้รับความร้อนทำให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น [20] และ [21]

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่อจำนวนรอบสภาวะเปื่อยกลับแห้งพบว่า การสูญเสีย



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u\ w-d}/q_{u\ 28}$ และการสูญเสียน้ำหนักของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และจำนวนรอบเปื่อยกลับแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด โดยงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hoy และคณะ [6] ได้ใช้อัตราส่วนสารกระตุ้น $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50 และ 0 : 100 โดยนำสารกระตุ้นดังกล่าวมาผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 แล้วนำไปทดสอบความคงทนในสภาวะเปื่อยกลับแห้งผลปรากฏว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 0 : 100 สามารถทนทานต่อสภาวะเปื่อยกลับแห้งได้ดีกว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50 : 50 เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้นสามารถชะซิลิกาได้ดีเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้นสรุปได้ว่าปริมาณอัตราส่วน NaOH ที่สูงขึ้นจะส่งผลถึงประสิทธิภาพความทนทานต่อสภาวะเปื่อยกลับแห้งที่ดีขึ้น

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวที่จำนวนรอบเปื่อยกลับแห้งต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ($q_{u\ w-d}/q_{u\ 28}$) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss, WL) ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประมาณได้จากฟังก์ชันโพลีโนเมียลดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (3)

$$q_{u\ w-d}/q_{u\ 28} = 0.0009(WL)^3 - 0.0191(WL)^2 + 0.0406(WL) + 1.0315 \quad \text{สำหรับ } \text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 80 : 20 \quad (1)$$

$$q_{u,w-d}/q_{u,28} = 0.0001(WL)^3 - 0.0095(WL)^2 + 0.0679(WL) + 0.9949 \text{ สำหรับ } Na_2SiO_3 : NaOH = 70 : 30 \quad (2)$$

$$q_{u,w-d}/q_{u,28} = -0.002(WL)^3 - 0.005(WL)^2 + 0.1967(WL) + 0.9994 \text{ สำหรับ } Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50 \quad (3)$$

โดยค่า R^2 (Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.8968, 0.9967 และ 0.9994 สำหรับ $Na_2SiO_3 : NaOH$ เท่ากับ 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50 ตามลำดับ

4. สรุป

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างพบที่อัตราส่วน $Na_2SiO_3 : NaOH$ เท่ากับ 80 : 20 และความเข้มข้นของ $NaOH$ เท่ากับ 5 โมลาร์ ในขณะที่ OLC ของตัวอย่างมีค่าประมาณร้อยละ 18 ของน้ำหนักดินลูกรัง สำหรับทุกอัตราส่วน $Na_2SiO_3 : NaOH$ และความเข้มข้นของ $NaOH$

2. การเพิ่มขึ้นของ Na_2SiO_3 และความเข้มข้นของ $NaOH$ ช่วยพัฒนากำลังอัดแกนเดียว และกำลังดัดของดินลูกรังผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

3. กำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดของตัวอย่างพบที่อัตราส่วน $Na_2SiO_3 : NaOH$ เท่ากับ 80 : 20 และความเข้มข้นของ $NaOH$ เท่ากับ 5 โมลาร์ ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.55 และ 2.70 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดกับมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักพบว่า กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 2.62 เท่า

4. สำหรับจำนวนรอบเปิกกลลบั้บเท่ากับ 12 รอบ อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังผ่านเกณฑ์มาตรฐานคืออัตราส่วน $Na_2SiO_3 : NaOH$ เท่ากับ 50 : 50 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.07 MPa

5. ปริมาณ $NaOH$ ที่เพิ่มขึ้นส่งผลในการช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำ และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) โดยสำนักงานกองทุน

สนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MSD6210033

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*. Morrisville: Lulu Enterprises Inc., 2008.
- [2] S. Hanjitsuwan, P. Chindapasirt, and K. Pimraksa, "Electrical conductivity and dielectric property of fly ash geopolymer pastes," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 18, no. 1, pp. 94–99, 2011.
- [3] S. Lueangkamchon, "Geopolymer material," *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 3, 2008 (in Thai).
- [4] K. Wongkhum, C. Suksiripattanapong, S. Tiyasangthong, and J. Thumrongvut, "Compressive strength and microstructure of lateritic soil-used coffee grounds stabilized fly ash geopolymer," *UBU Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 65–73, 2018 (in Thai).
- [5] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, and A. Arulrajah, "Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge," *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 20–30, 2015.
- [6] M. Hoy, R. Rachan, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, and M. Mirzababaei, "Effect of wetting–drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly ash geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 624–634, 2017.
- [7] N. Banthia and R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete," *Cement and Concrete*



- Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1263–1267, 2006.
- [8] M.W. Ussin, A. Nur Farhayu, M.A.R. Bhutta, and A.S.L. Nor Hasanah, “Study on dry-wet cyclic resistance of geopolymer mortars using blended ash from agro-industrial waste,” presented at Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT3), Kyoto, Japan, August 18–21, 2013.
- [9] *The Community Product Standard*, Annual Book of TISI Standard TISI 602/2547, Bangkok, Thailand, 2004 (in thai).
- [10] *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C618, 2015.
- [11] *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, Annual Book of ASTM Standard ASTM D2166, 2000.
- [12] *Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading*, Annual Book of ASTM Standard ASTM D1635, 2009.
- [13] *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*, Annual Book of ASTM Standard ASTM D599-03, 2012.
- [14] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. Provis, and G.C. Lukey, “Geopolymer technology: The current state of the art,” *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007.
- [15] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer,” *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 12 pp. 1073–1078, 2009.
- [16] Y. Aygörmöz, O. Canpolat, M.M. Al-mashhadani, and M. Uysal, “Elevated temperature, freezing-thawing and wetting - drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites,” *Construction and Building Materials*, vol. 235, pp. 117502, 2020.
- [17] S. Kalias, V.K. Rigopoulou, and A. Karahalios, “Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement,” *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 301–313, 2005.
- [18] F. Brue, C.A. Davy, F. Skoczylas, N. Burlion, and X. Bourbon, “Effect of temperature on the water retention properties of two high performance concretes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 2, pp. 384–396, 2014.
- [19] J. Jiang and Y. Yuan, “Relationship of moisture content with temperature and relative humidity in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 685–692, 2013.
- [20] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, and P. Chindaprasirt, “Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 5, pp. 700-708, 2012.
- [21] T. Bakharev, “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions,” *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1133–1246, 2005.