วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30, ฉบับที่ 4 ต.ค.–ธ.ค. 2563
The Journal of KMUTNB., Vol. 30, No. 4, Oct.–Dec. 2020

บทความวิจัย

อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายด่างต่างชนิดกัน

ขัตติย ชมพูวงศ์ ธนากร ภูเงินขำ* ศตคุณ เดชพันธ์ และ ชุดาภัค เดชพันธ์
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5362 8964 อีเมล: tanakorn.ph@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.012
รับเมื่อ 12 ตุลาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 10 มกราคม 2563 ตอบรับเมื่อ 24 มกราคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 เมษายน 2563
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของชนิดสารละลายด่างต่อกำลังอัด และมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สารละลายด่าง 3 ประเภท ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เพียงอย่างเดียว (NH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกัน (NHWG) และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว (WG) ถูกใช้เป็นของเหลวในส่วนผสม โดยทำการทดสอบกำลังอัด และมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถปรับปรุงกำลังอัด และมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ ซึ่งกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับวัสดุตั้งต้นที่ใช้ และสารละลายด่างที่ใช้ในส่วนผสม โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกัน (NHWG) สามารถให้กำลังอัดสูงสุดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คำสำคัญ: เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดสารละลายด่าง กำลังรับแรงอัด มอดุลัสยืดหยุ่น

การอ้างอิงบทความ: ขัตติย ชมพูวงศ์ ธนากร ภูเงินขำ ศตคุณ เดชพันธ์ ชุดาภัค เดชพันธ์ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, "อิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายด่างต่างชนิดกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 4, หน้า 620–629, ต.ค.–ธ.ค. 2563.

Research Article

Effect of Portland Cement Content on Compressive Strength and Elastic Modulus of High-calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Various Type of Alkali Solution

Khattiya Chompoovong, Tanakorn Phoo-ngernkham*, Satakhun Detphan and Chudapak Detphan
Sustainable Construction Material and Technology Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand
Sakonwan Hanjitsuwan
Program of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand
Prinya Chindaprasirt
Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 5362 8964, E–mail: tanakorn.ph@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.04.012
Received 12 October 2019; Revised 10 January 2020; Accepted 24 January 2020; Published online: 24 April 2020
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article aims to study the effect of alkaline solution types on compressive strength and elastic modulus of high-calcium fly ash (FA) geopolymer containing Portland cement (PC). FA was replaced by PC at the dosages of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight of the binder. Three types of alkaline solutions viz., sodium hydroxide solution (NH), sodium silicate solution (WG), and NH plus WG solution (NHWG) were used as the liquid portion in the mixture. The compressive strength and elastic modulus of high-calcium FA geopolymer mortar were investigated. Test results indicated that the use of PC to replace FA could enhance the compressive strength and elastic modulus of high-calcium FA geopolymer mortar. The compressive strength of high-calcium FA geopolymer mortar depended on the types of source materials and alkali activators. The increase in PC content enhanced the compressive strength and elastic modulus of high-calcium FA geopolymer mortar. Finally, the use of NHWG showed the highest compressive strength of high-calcium FA geopolymer mortar containing PC.

Keywords: High-Calcium Fly Ash Geopolymer, Portland Cement, Alkali Solution Types, Compressive Strength, Modulus of Elasticity

Please cite this article as: K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, C. Detphan, S. Hanjitsuwan, and P. Chindaprasirt, "Effect of Portland cement content on compressive strength and elastic modulus of high-calcium fly ash geopolymer mortar containing various type of alkali solution," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 4, pp. 620–629, Oct.–Dec. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง และนักวิจัยหลายท่านได้มีความพยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อให้จีโอพอลิเมอร์สามารถใช้เป็นหนึ่งในทางเลือกสำหรับงานก่อสร้าง เนื่องด้วยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [1], [2] ทำให้มีการวิจัย และพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง ดังนั้น จากงานที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3] ซึ่งจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่าง และใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ดินขาว เถ้าถ่านหิน เป็นต้น [4]

ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง [4] เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่มากที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) [5] ดังนั้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันด้วยความร้อนประมาณ 40–90 องศาเซลเซียส [6] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ผ่านมาจึงพยายามพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์โดยการเติมสารผสมเพิ่มในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย เช่น ยิบซัม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นต้น [4], [5] ซึ่งจากงานวิจัยของ ปริญญา และคณะ [4] ได้รายงานไว้ว่า ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลเชิงบวกต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ อีกทั้งสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮเดรชันแทรกอยู่กับจีโอพอลิเมอร์เจลทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบของจีโอพอลิเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลในอายุปลายของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ [4] อีกทั้งจากงานวิจัยของ แสงสุรีย์ และคณะ [5] ได้รายงานไว้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ แต่ยังสามารถเพิ่มความร้อนให้กับระบบของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งความร้อนนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สารละลายด่างเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ ในปัจจุบันสารละลายด่างที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (WG) [7] ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในการชะละลายองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้นออกมาเพื่อทำปฏิกิริยา [7] ขณะที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่ควบแน่นของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน [7]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์พบว่า กำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อมอดุลัสยืดหยุ่น และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการใช้สารละลายด่างต่างชนิดกันยังการศึกษาและค้นคว้าไม่มาก ซึ่งค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มีความจำเป็นที่ต้องศึกษา เนื่องด้วยผู้วิจัยต้องการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซมในอนาคต โดยค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเป็นหนึ่งในคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมที่ต้องได้รับการพิจารณา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายด่างต่างชนิดกัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของสารละลายด่างและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซมในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) และทราย (RS) โดยที่องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ส่วนรูปที่ 1 และ 2 แสดงลักษณะของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามลำดับ สารละลายด่างที่ใช้ในการผลิตเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (WG) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 12.71, SiO_2 ร้อยละ 30.19 และ H_2O ร้อยละ 57.10

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	FA (%)	PC (%)
SiO_2	35.87	20.80
Al_2O_3	19.91	4.70
Fe_2O_3	12.07	3.40
CaO	20.68	65.30
MgO	2.40	1.50
Na_2O	1.88	0.40
K_2O	2.36	0.10
SO_3	4.25	2.70
LOI	0.58	0.90

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยแคลเซียมสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายละเอียด

คุณสมบัติทางกายภาพ	FA	PC	Sand
ความถ่วงจำเพาะ	2.65	3.15	2.63
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (μm)	15.4	14.6	-
ความละเอียด (cm^2/g)	4300	3600	-
มอดุลัสความละเอียด	-	-	1.85

รูปที่ 1 การห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

รูปที่ 2 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับการหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 3 เถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.60 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (WG/NH) เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1.0

ขั้นตอนการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายด่างแล้วดำเนินการผสมเป็นเวลาประมาณ 5 นาที ในกรณีของสารละลายด่าง คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันก่อนนำไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมก่อนประมาณ 5 นาที

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแปรผันชนิดสารละลายด่าง

ส่วนผสม	FA (g)	PC (g)	RS (g)	NH (g)	WG (g)
FA0PC_NH	100	-	100	60	-
FA5PC_NH	95	5	100	60	-
FA10PC_NH	90	10	100	60	-
FA15PC_NH	85	15	100	60	-
FA20PC_NH	80	20	100	60	-
FA0PC_NHWG	100	-	100	20	40
FA5PC_NHWG	95	5	100	20	40
FA10PC_NHWG	90	10	100	20	40
FA15PC_NHWG	85	15	100	20	40
FA20PC_NHWG	80	20	100	20	40
FA0PC_WG	100	-	100	-	60
FA5PC_WG	95	5	100	-	60
FA10PC_WG	90	10	100	-	60
FA15PC_WG	85	15	100	-	60
FA20PC_WG	80	20	100	-	60

2.3 ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [8] แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง หลังจากการเทตัวอย่างลงแบบ จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

2.4 ทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น และการวิเคราะห์ประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C469 [9] โดยใช้ตัวอย่างแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร สำหรับการเตรียมตัวอย่างนั้นหลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อ แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง หลังจากการเทตัวอย่างลงแบบ จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในรูปที่ 2

3.ผลการวิจัย

3.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า กรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

ส่วนกรณีใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แข็งตัวอย่างทันทีทันใด อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์เจลสามารถจับตัวกันและแข็งตัวได้รวดเร็วขึ้น [5] โดยการที่เกิดการทำปฏิกิริยาแบบรวดเร็วส่งผลเสียต่อความสมบูรณ์ของการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 4 กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแปรผันชนิดสารละลายด่าง

ส่วนผสม	กำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน (MPa)		
	NH	NHWG	WG
FA0PC	5.42	38.62	26.08
FA5PC	6.10	44.17	33.08
FA10PC	6.25	50.52	38.87
FA15PC	6.12	54.05	40.34
FA20PC	6.80	48.58	15.89

ส่วนกรณีใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ในทำนองเดียวกันกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยา อาจเนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีลักษณะเหนียวและหนืดทำให้ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน [6]

เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารละลายด่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดซึ่งการใช้สารละลายด่างทั้ง 2 ชนิด ผสมกันมีค่ากำลังอัดสูงสุดสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ธนากร และคณะ [10] รายงานไว้ว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีหน้าที่ชะละลายไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากวัสดุตั้งต้นเพื่อใช้ในการเกิดเป็นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ขณะที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีหน้าที่เพิ่มปริมาณซิลิกอนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาให้กับระบบของจีโอพอลิเมอร์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันมีความสมบูรณ์มากกว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียวหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว

3.2 มอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

มอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า กรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างต่ำสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว (ตารางที่ 4)

ส่วนกรณีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ซึ่งมอดุลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ธนากร และคณะ [11] และมีค่าใกล้เคียงกับมอดุลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งมีค่าระหว่าง 19–25 จิกะปาสคาล (ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 51.6–75.6 เมกะปาสคาล) [12] เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ

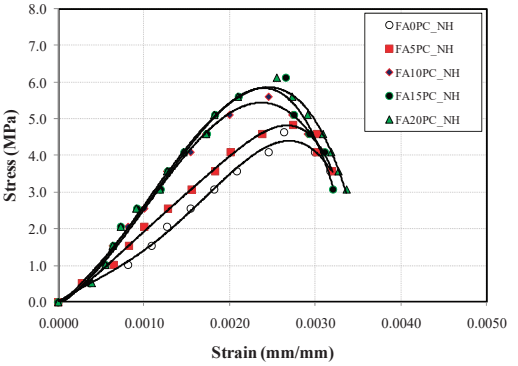
พบว่า การเพิ่มขึ้นของมอดุลัสยืดหยุ่น อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ช่วยเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ภายในระบบจีโอพอลิเมอร์ และทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จึงมีความแน่นมากขึ้น [11] แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5 พบว่า ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 20 ส่งผลให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 5 มอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแปรผันชนิดสารละลายด่าง

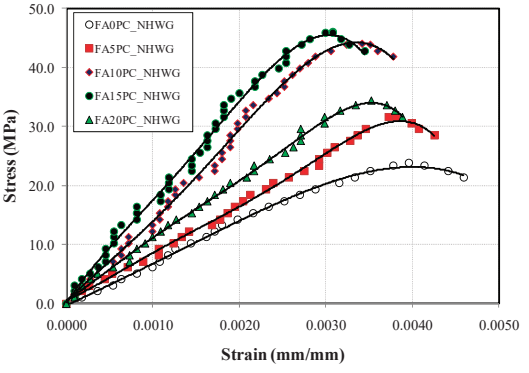
ส่วนผสม	มอดุลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วัน (GPa)		
	NH	NHWG	WG
FA0PC	0.98	6.73	4.55
FA5PC	1.32	8.19	4.94
FA10PC	1.99	14.54	6.41
FA15PC	2.24	16.68	8.90
FA20PC	2.26	10.87	3.11

ขณะที่กรณีใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 ทำนองเดียวกันกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้สารละลายด่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงสุด รองลงมาคือ การใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

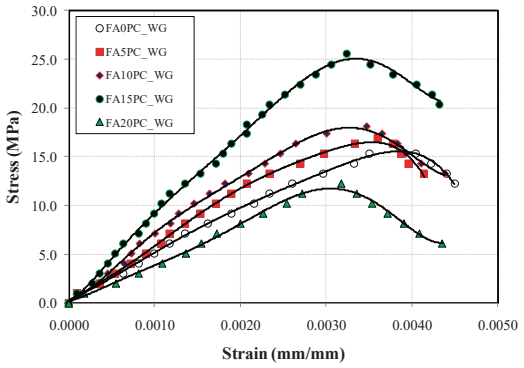


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์น้อยที่สุดทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ตารางที่ 4)

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

จากรูปที่ 3–5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว

แทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถเพิ่มความแกร่งให้กับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ และความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น โดยลักษณะเส้นกราฟคล้ายพาราโบลาคว่ำคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป และพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์รับแรงกดอัดได้ประมาณร้อยละ 40–70 ของกำลังอัดประลัย จากนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดมีลักษณะที่โค้งมากขึ้นจนเกิดการวิบัติ [13]

กรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดมีแนวโน้มของลักษณะความชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง และมีค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.00245–0.00274 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ส่วนกรณีใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดมีแนวโน้มของลักษณะความชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยทำนองเดียวกันกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว และมีค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.00309–0.00396 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ขณะที่กรณีใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดมีแนวโน้มของลักษณะความชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงทำนองเดียวกันกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และมีค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.00318–0.00387 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร

จากข้อมูลข้างต้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่า ค่าความเครียดอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.003–0.004 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร [13] แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าความเครียดอัดสูงสุดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว พบว่า จะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความเครียดอัดที่กำลังอัดสูงสุดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3 อาจเนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผลิตจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ (ตารางที่ 4)

4. สรุป

เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5–15 และเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียวสามารถปรับปรุงและพัฒนากำลังรับแรงอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ส่วนที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 พบว่า กำลังรับแรงอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แข็งตัวอย่างทันทีทันใด โดยการ

ที่เกิดการทำปฏิกิริยาแบบรวดเร็วส่งผลเสียต่อความสมบูรณ์ของการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ขณะที่ส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวพบว่า กำลังอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวในการทำปฏิกิริยาต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยา จึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียวที่มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, and S. Hatanaka, "The effect of adding nano-SiO_2 and nano-Al_2O_3 on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature,"*Materials & Design*, vol. 55, pp. 58–65, 2014.

[2] T. Phoo-ngernkham, C. Phiangphimai, N. Damrongwiriyanupap, S. Hanjitsuwan, J. Thumrongvut, and P. Chindaprasirt, "A mix design procedure for alkali-activated high-calcium fly ash concrete cured at ambient temperature," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, pp. 1–13, 2018.

[3] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, C. Suksiripattanapong, J. Thumrongvut, J. Suebsuk, and S. Sookasem, "Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali-activated binders under different types of alkali solutions," *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 673–678, 2016.

[4] P. Chindaprasirt, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, S. Horpibulsuk, A. Poowancum, and B. Injorhor, "Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, pp. 1–8, 2018.

[5] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 269–274, 2014.

[6] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007.

[7] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, pp. 9–14, 2014.

[8] *Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50 mm] Cube Speciments)*, ASTM C109, 2002.

[9] *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's ratio of Concrete in Compression*, ASTM C469, 2002.

[10] T. Phoo-ngernkham, A. Maegawa, N. Mishima,

S. Hatanaka, and P. Chindaprasirt, "Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 91, pp. 1–8, 2015.

[11] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Pangdaeng, and T. Sinsiri, "Properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement additive," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 2, pp. 214–220, 2013.

[12] D. J. Cook and P. Chindaprasirt, "Influence of loading history upon the tensile properties of concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 33, no. 116, pp. 154–160, 1981.

[13] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Computers and Concrete*, vol. 9, no. 6, pp. 427–437, 2012.