บทความวิจัย

คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน

ชุดาภัค เดชพันธ์ ศตคุณ เดชพันธ์ ขัตติย ชมพูวงศ์ และ ธนากร ภูเงินขำ*
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.2020.06.005
รับเมื่อ 12 ตุลาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 13 มกราคม 2563 ตอบรับเมื่อ 24 มกราคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 9 มิถุนายน 2563
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ นาโนซิลิกาถูกเพิ่มเข้าไปในเถ้าลอยแคลเซียมสูงร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาในส่วนผสม และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการทดสอบระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น และกำลังรับแรงเฉือนอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น กำลังอัด กำลังดัด มอดุลัสยืดหยุ่น และกำลังรับแรงเฉือนอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาจนถึงปริมาณการใช้ที่เหมาะสมยกเว้นนาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า นาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 นาโนเมตร ร้อยละ 3 ยังคงสามารถพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 80 นาโนเมตร ร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสม ขณะที่การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 นาโนเมตร ร้อยละ 3 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นสารผสมเพิ่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์

คำสำคัญ: เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ นาโนซิลิกา ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงเฉือนอัด

การอ้างอิงบทความ: ชุดาภัค เดชพันธ์, ศตคุณ เดชพันธ์, ขัตติย ชมพูวงศ์, ธนากร ภูเงินขำ, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, "คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 1, หน้า 36–46, ม.ค.–มี.ค. 2564.

Research Article

Mechanical Properties of High-calcium Fly Ash Geopolymer with Nano-SiO_2 Particle Sizes

Chudapak Detphan, Satakhun Detphan, Khattiya Chompoovong and Tanakorn Phoo-ngernkham*
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.2020.06.005
Received 12 October 2019; Revised 13 January 2020; Accepted 24 January 2020; Published online: 9 June 2020
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents effects of the use of nano-SiO_2 with different particle sizes as an additive on mechanical properties of high-calcium fly ash (FA) geopolymer paste. Nano-SiO_2 with different particle sizes were added in high-calcium FA at the rates of 0%, 1%, 2%, and 3% by weight of the binder. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) solutions were used as the liquid portion in mixtures. The 10 molar NaOH solution, Na_2SiO_3-to-NaOH ratio of 2.0, liquid alkali-to-binder ratio of 0.60, and curing at ambient temperature were used in all mixtures. The setting time, compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity, and slant shear bond strength of high-calcium FA geopolymer paste were studied. Test results indicated that the setting times of geopolymer paste tended to decrease with increasing nano-SiO_2 content. Compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity and slant shear bond strength of high-calcium FA geopolymer paste tended to increase with an increase in nano-SiO_2 content up to 2% by weight and then gradually decrease except nano-SiO_2 with particle size of 150 nm. It was found that using 3% nano-SiO_2 particle size of 150 nm could develop the mechanical properties of high-calcium FA geopolymer paste. It could be concluded that using 2%nano-SiO_2 with particle size of 12 and 80 nm and 3%nano-SiO_2 with particle size of 150 nm were the optimum levels for use as an additive in high-calcium FA geopolymer paste.

Keywords: High-Calcium Fly Ash Geopolymer, Nano-SiO_2, Particle Sizes, Compressive Strength, Slant Shear Strength

Please cite this article as: C. Detphan, S. Detphan, K. Chompoovong, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, and P. Chindaprasirt, "Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolymer with nano-SiO_2 particle sizes," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 36–46, Jan.–Mar. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

วัสดุซ่อมแซมที่นิยมใช้ในการป้องกัน บำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต ได้แก่ อิพ็อกซี และวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ใช้งานได้สะดวก และให้กำลังสูงในระยะเวลาอันสั้น แต่วัสดุดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ราคาค่อนข้างสูง จากเหตุผลดังกล่าว การพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุซ่อมแซมทางการค้าเพื่อใช้ในงานวัสดุซ่อมแซมจึงถือเป็นการเพิ่มทางเลือกในการนำไปใช้งาน

ในปัจจุบันจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Kajaste และ Hurme [1] พบว่า จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถสังเคราะห์จากวัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต นอกจากนั้นการใช้วัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมถือเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งหลักการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ คือ ซิลิกา และอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง และใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ในปัจจุบันวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ คือ เถ้าลอย แต่อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีความสามารถในการรับกำลังได้ต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) จำเป็นต้องใช้ความร้อนประมาณ 40–90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา [2] จากเหตุผลข้างต้นถือเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างจริง จากรายงานวิจัยของแสงสุรีย์ และคณะ [3] พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งปฏิกิริยาคายความร้อนนี้เพียงพอต่อการเร่งเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันโดยไม่ต้องใช้กระบวนเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน และงานวิจัยของปริญญา และคณะ [4] พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแทรกอยู่กับจีโอพอลิเมอร์เจลส่งผลให้คุณสมบัติทางกลขึ้น นอกจากการใช้วัสดุข้างต้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ นักวิจัยหลายท่าน [5], [6] ได้มีความพยายามปรับปรุงสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์โดยการใช้วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กระดับอนุภาคนาโนเมตร ซึ่งจากรายงานของ Riahi และ Nazali [7] รายงานไว้ว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้นและความละเอียดของวัสดุตั้งต้น ซึ่งความละเอียดของวัสดุตั้งต้นที่มากขึ้นจะสามารถเพิ่มปริมาณการละลายซิลิกาและอะลูมินามากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น [5] ในปัจจุบันวัสดุนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตรได้มีการใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ดังรายงานวิจัยของ [8] เนื่องจากเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานนิคและการอัดแน่นของอนุภาค (Filler Effect) ขณะที่ธนากร และคณะ [9] ได้มีการใช้วัสดุนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาสามารถปรับปรุงกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เมื่อบ่มที่อุณหภูมิปกติ

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9] พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาการใช้วัสดุนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 12 นาโนเมตร ในเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้ดำเนินการศึกษาการใช้วัสดุนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันเป็นสารเพิ่มเพื่อผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม โดยจะมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติด้านระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น และกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมและจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่มีการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อเป็นทางแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซมในอนาคตและเพื่อเป็นอีกหนึ่งในทางเลือกในอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่อไป

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน ได้แก่ ขนาด 12 (FNS), 80 (MNS) และ 150 (LNS) นาโนเมตร องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและนาโนซิลิกาดังแสดงในตารางที่ 1 คุณสมบัติของนาโนซิลิกาดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของวัสดุตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูง มีความละเอียดทดสอบตามวิธีของเบลน (Blaine Fineness) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4,300 ตารางเซนติเมตร/กรัม และ 15.4 ไมครอน ตามลำดับ

สารละลายด่างที่ใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ประกอบด้วย 13.45% Na_2O, 32.39% SiO_2 และ 54.16% H_2O

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี	FA (%)	FNS (%)	MNS (%)	LNS (%)
SiO_2	31.32	99.98	99.94	97.22
Al_2O_3	12.96	-	-	-
Fe_2O_3	15.64	-	-	-
CaO	25.79	-	0.01	0.27
MgO	2.94	-	-	-
K_2O	2.93	-	-	-
Na_2O	2.83	-	-	-
SO_3	4.92	-	-	-
Others	-	0.02	0.77	2.51
LOI	1.30	-	-	-

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของนาโนซิลิกา

คุณสมบัติทางกายภาพ/วัสดุ	FNS	MNS	LNS
หน่วยน้ำหนัก (ก/ซม^3)	<0.05	<0.15	<0.30
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร)	12	80	150
ความละเอียดของวัสดุด้วยวิธีของ BET (ม^2/กรัม)	200±25	110±20	20±5
ลักษณะของวัสดุ	ผงสีขาว	ผงสีขาว	ผงสีขาว

หมายเหตุ: คุณสมบัติทางด้านกายภาพของนาโนซิลิกาเป็นข้อมูลที่ได้รับจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของวัสดุตั้งต้น

สัญลักษณ์	FNS	MNS	LNS
Control	5.803		
FA1NS	5.937	5.937	5.929
FA2NS	6.063	6.063	6.055
FA3NS	6.197	6.197	6.181

2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับการผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ทุกอัตราส่วนผสม

สำหรับขั้นตอนการผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์เริ่มต้นด้วยการผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูงและนาโนซิลิกาให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายด่างแล้วผสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที โดยก่อนนำสารละลายด่างไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนการผสมประมาณ 5 นาที

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์

สัญลักษณ์	FA (กรัม)	FNS (กรัม)	MNS (กรัม)	LNS (กรัม)	NaOH (กรัม)	Na_2SiO_3 (กรัม)
Control	100	-	-	-	20	40
FA1FNS	100	1	-	-	20	40
FA2FNS	100	2	-	-	20	40
FA3FNS	100	3	-	-	20	40
FA1MNS	100	-	1	-	20	40
FA2MNS	100	-	2	-	20	40
FA3MNS	100	-	3	-	20	40
FA1LNS	100	-	-	1	20	40
FA2LNS	100	-	-	2	20	40
FA3LNS	100	-	-	3	20	40

2.3 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เข็มไวแคตทำนองเดียวกันกับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM

C191-13 [10]

สำหรับการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ขั้นเตรียมตัวอย่างดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร หลังจากทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก หลังจากครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการถอดแบบหล่อ หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7, 28 และ 90 วัน

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังดัด และการวิเคราะห์กำลังดัดดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C293-02 [12] โดยใช้แบบหล่อรูปปริซึมขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร แล้วปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบ หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงดำเนินการหุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7, 28 และ 90 วัน

การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์การทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ดัดแปลงดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C469 [13] โดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร แล้วปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบ หลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วหุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหย และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7, 28 และ 90 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ และการวิเคราะห์ดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C882 [14] การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัด เริ่มต้นด้วยคอนกรีตถูกออกแบบกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล โดยวิธีการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [15] หลังจากนั้นคอนกรีตถูกเทลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาด 50×50×125 มิลลิเมตร แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากบ่มในน้ำครบ 28 วัน ตัวอย่างคอนกรีตถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 60 วัน หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะถูกตัดแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน โดยทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง สำหรับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ จีโอพอลิเมอร์เพสต์ถูกเทลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาด 50×50×125 มิลลิเมตร ที่มีตัวอย่างคอนกรีตครึ่งหนึ่งโดยจีโอพอลิเมอร์จะถูกเทเป็น 2 ชั้นเท่าๆ กัน หลังจากครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการถอดแบบหล่อ แล้วเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องทดลองจนครบอายุการบ่ม โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

3.ผลการวิจัย

3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ตารางที่ 5 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่า ระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวปลายของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทุกขนาดของนาโนซิลิกา จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้นาโนซิลิกาในส่วนผสมของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เนื่องด้วยซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของนาโนซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ ปริญญา และคณะ [16] รายงานไว้ว่า การทำปฏิริยาระหว่างซิลิกาจากนาโนซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะมีปริมาณสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการเวลาก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

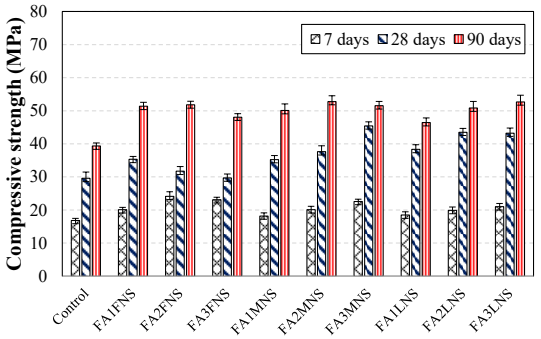
นอกจากนั้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้นาโนซิลิกาหมายถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของวัสดุตั้งต้น จากตารางที่ 3 พบว่า ส่วนผสมควบคุม (ไม่มีการใช้นาโนซิลิกา) มีค่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ

5.803 เมื่อใช้นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 12 (FNS) และ 80 (MNS) นาโนเมตร ร้อยละ 1, 2 และ 3 มีค่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 5.937, 6.063 และ 6.197 ตามลำดับ ส่วนการใช้นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 150 (LNS) นาโนเมตร ร้อยละ 1, 2 และ 3 มีค่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 5.929, 6.055 และ 6.181 ตามลำดับ โดยปกติแล้วการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นการใช้แหล่งให้ซิลิกาที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เช่น เถ้าแกลบ นาโนซิลิกา เป็นต้น ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของปริญญา และคณะ [16]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของขนาดอนุภาคต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มชะลอระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งการก่อตัวที่รวดเร็วของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมหรืองานอื่นๆ ที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว

ตารางที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน

สัญลักษณ์	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
	ก่อตัวต้น	ก่อตัวปลาย
Control	30	58
FA1FNS	27	53
FA2FNS	19	40
FA3FNS	12	26
FA1MNS	27	55
FA2MNS	24	45
FA3MNS	19	32
FA1LNS	30	53
FA2LNS	24	46
FA3LNS	20	35



รูปที่ 2 กำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน

3.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถพัฒนา และปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้เปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ควบคุม

นาโนซิลิกาเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรุงคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กทำให้สามารถถูกชะละลายออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาได้มาก ส่งผลทำให้วัสดุประสานมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบในงานนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8], [17] พบว่า การใช้วัสดุที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตได้ ในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยนี้ที่เป็นจีโอพอลิเมอร์เพสต์ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์อาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากนาโนซิลิกาและเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) มากขึ้นภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ และความร้อนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงกับซิลิกาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตช่วยเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ [9] นอกจากนี้การใช้นาโนซิลิกาสามารถลดปริมาณ

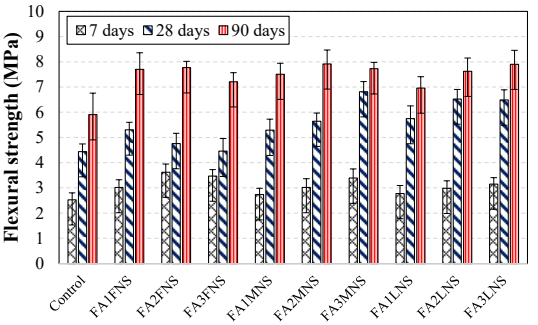
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้มีการปรับแต่งขนาดโพรงในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ [9] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 พบว่า กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มลดลง ในประเด็นนี้อาจเป็นไปได้ว่า ปริมาณของนาโนซิลิกาที่มากเกินความต้องการในการทำปฏิกิริยาภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์จึงส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคต่อกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยพัฒนากำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เมื่อพิจารณารูปที่ 2 พบว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการปรับปรุงกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์

3.3 กำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน เป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถพัฒนาและปรับปรุงกำลังรับแรงดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้ ซึ่งผลการทดสอบกำลังดัดสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Nazari และ Riahi [7] รายงานไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์เมื่อใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มอาจเนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาภายในระบบจีโอพอลิเมอร์มากขึ้น นอกจากนี้ ปริญญา และคณะ [16] รายงานไว้ว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกาและอะลูมินาที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) มากขึ้น

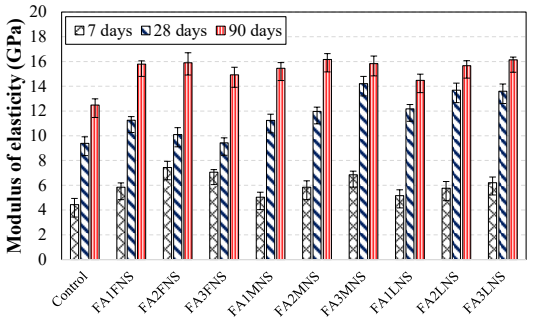
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคต่อกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยพัฒนากำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เมื่อพิจารณารูปที่ 3 พบว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์เช่นเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์



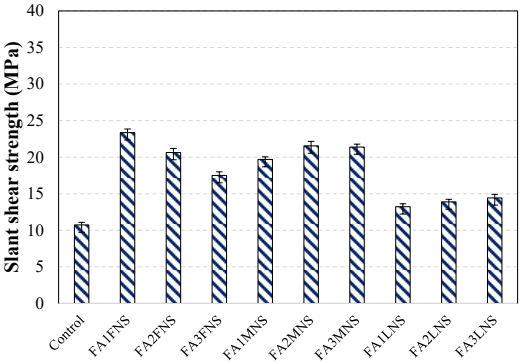
รูปที่ 3 กำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน

3.4 มอดุลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

รูปที่ 4 แสดงมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน เป็นสารผสมเพิ่มพบว่า ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนาเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ประเด็นหลักที่จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถพัฒนาความแกร่งได้ คือ ผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มากขึ้นภายในระบบจีโอพอลิเมอร์ ขณะที่ปัจจัยของขนาดอนุภาคต่อมอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยพัฒนามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ นาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 (FNS) และ 80 (MNS) นาโนเมตร มีพฤติกรรมใกล้เคียงกันคือ การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2



รูปที่ 4 มอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 5 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการพัฒนามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ แต่เมื่อใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 (LNS) นาโนเมตร พบว่า คือ การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการพัฒนามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของข้อมูลพบว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 ของนาโนซิลิกาที่มีขนาด 150 (LNS) นาโนเมตร ส่วนผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 ของนาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 (FNS) และ 80 (MNS) นาโนเมตร โดยปกติอนุภาคที่เล็กจะสามารถพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าหากอนุภาคเล็กมากๆ ถึงระดับนาโนเมตร ความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมควรได้รับพิจารณาร่วมด้วย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมอดุลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสต์จะมีค่าระหว่าง 12.5–17.5 จิกะปาสคาล [18], [19] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่ได้รับจากวิจัยนี้

3.5 กำลังรับแรงเฉือนอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์เมื่อใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงเฉือนอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มทุกขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาอย่างเห็นชัด ผลการทดสอบแสดงถึงการยึดเกาะกันของคอนกรีตกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ดีขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ไม่ได้ใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสม การเพิ่มขึ้นของการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ธนากร และคณะ [9], [20] รายงานไว้ว่า ซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นสามารถทำปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้สามารถปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอพอลิเมอร์ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงที่บริเวณผิวสัมผัส

เมื่อพิจารณาปัจจัยของการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันพบว่า ปริมาณการใช้ร้อยละ 2–3 ของนาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 12 (FNS) นาโนเมตร ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มลดลง ขณะที่การใช้นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 80 (MNS) และ 150 (LNS) นาโนเมตร พบว่าปริมาณการใช้ร้อยละ 2–3 ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของข้อมูลพบว่า นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 12 (FNS) นาโนเมตร ร้อยละ 2–3 จะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงอาจส่งผลต่อ

การยึดเกาะกับคอนกรีตเดิม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 1) และกำลังดัด (รูปที่ 2) พบว่า การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 (FNS) นาโนเมตร ร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่มีความเหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่า การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 (FNS) นาโนเมตร ร้อยละ 1 เป็นปริมาณการใช้ที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน อาจเป็นไปได้ว่า ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุ 2 ชนิด มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการใช้นาโนซิลิกา

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบทั้งหมดพบว่า การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดเท่ากับ 80 (MNS) ร้อยละ 2–3 เป็นสารผสมเพิ่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มีความสามารถในการพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซมได้ เนื่องด้วยมีคุณสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด และกำลังเฉือนอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C881 [21]

นอกจากนั้น เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันร่วมกับวัสดุซ่อมแซมปัจจุบันที่มีในท้องตลาด [20] พบว่า กำลังรับแรงเฉือนอัดของวัสดุซ่อมแซมปัจจุบันที่มีในท้องตลาดมีค่าระหว่าง 13–25 เมกะปาสคาล สำหรับกำลังรับแรงเฉือนอัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกามีค่าระหว่าง 14–24 เมกะปาสคาล ดังนั้น เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมนาโนซิลิกาสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานซ่อมแซมได้

4. สรุป

ผลการศึกษาของการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันเป็นสารผสมเพิ่มในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ปัจจัยของขนาดอนุภาคพบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มชะลอระยะเวลาการก่อตัว

4.2 กำลังอัดและกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณการใช้ที่เหมาะสม ขณะที่ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยพัฒนากำลังอัดและกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสม

4.3 การใช้นาโนซิลิกาสามารถช่วยพัฒนาความแกร่งของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ส่วนการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาด 12 และ 80 นาโนเมตร ร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสม ขณะที่การใช้นาโนซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร ร้อยละ 3 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการพัฒนามอดุลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ อาจเนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมซึ่งจำเป็นต้องได้รับพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์

4.4 การใช้นาโนซิลิกาทุกขนาดอนุภาคมีแนวโน้มพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์ อาจเนื่องจากผลผลิตจากการทำปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ขณะที่ปริมาณการใช้นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 12 นาโนเมตร ร้อยละ 1 และการใช้นาโนซิลิกาขนาดเท่ากับ 80 และ 150 นาโนเมตร ร้อยละ 3 สามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สัญญาเลขที่ NKR2561REV028 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Kajast and M. Hurme, "Cement industry greenhouse gas emissions–management options and abatement cost," *Journal of Cleaner Production*, vol. 115, no. 5, pp. 4041–4052, 2015.

[2] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, L.Y. Li, N, Damrongwiriyanupap, and P. Chindaprasirt, "Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 714–723, 2018.

[3] 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.

[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. e00198, 2018.

[5] M. E. Gülşan, R. Alzeebaree, A.A. Rasheed, A. Niş, and A.E. Kurtoğlu, "Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 271–283, 2019.

[6] T. Alomayri, "Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material (Al_2O_3)," *Journal of Building Engineering*, vol. 25, pp. 100788, 2019.

[7] S. Riahi and A. Nazari, "The effects of nanoparticles on early age compressive strength of ash-based geopolymers," *Ceramics International*, vol. 38, no. 6, pp. 4467–4476, 2012.

[8] M. Alhawat and A. Ashour, "Bond strength between corroded steel and recycled aggregate concrete incorporating nano silica," *Construction and Building Materials*, vol. 237, pp. 117441, 2020.

[9] 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.

[10] *Standard test method for time of setting of hydrualic cement by vicat needle*, Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01, ASTM C191-13, 2013.

[11] *Standard test method of compressive strength of hydrualic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube speciments)*, Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01, ASTM C109, 2002.

[12] *Flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*, Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02, ASTM C293-02, 2002.

[13] *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*, Annual Book of ASTM Standard, vol. 02.01, ASTM C469, 2002.

[14] *Standard test method for bond strength of*

epoxy-resin systems used with concrete by slant shear, Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02, ASTM C882, 2013.

[15] *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*, American Concrete Institute, ACI 211.1-91, 1991.

[16] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883, 2012.

[17] F. Lavergne, R. Belhadi, J. Carriat, and A. Ben Fraj, "Effect of nano-silica particles on the hydration, the rheology and the strength development of a blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 95, pp. 42–55, 2019.

[18] A. Alsalman, C.N. Dang, G.S. Prinz, and W.M. Hale, "Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete" *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 918–928, 2017.

[19] D. Wang, Q. Zhao, J. Zhang, and L. Jin, "Experimental research for elastic modulus of cement paste at ultra-early age based on indentation technique," *Construction and Building Materials*, vol. 226, pp. 51–60, 2019.

[20] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridtirud, S. Hatanaka, and P. Chindaprasirt, "High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 482–428, 2015.

[21] *Standard specification for epoxy-resin-base bonding systems for concrete*, Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02, ASTM C881/C881M-14, 2014.