บทความวิจัย

อิทธิพลของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสมรรถนะสูงจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และเถ้าตะกรันเหล็ก

ดารกร อินทรบุตร* และ ปิติ สุคนธสุขกุล
ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
บูชิต มาโห้
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ภัทรชัย พงศ์โสภา
สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ธนากร ภูเงินขำ และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 5309 8657 อีเมล: darrakorn.in@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.011
รับเมื่อ 23 สิงหาคม 2565 แก้ไขเมื่อ 17 ตุลาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 21 ตุลาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 31 กรกฎาคม 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของเส้นใยเหล็กในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างมอร์ตาร์สมรรถนะสูงจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเถ้าตะกรันเหล็กต่อความสามารถในการทำงาน สมบัติเชิงกล เสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 ถึง 1.5 โดยปริมาตร ในการศึกษานี้ทำการแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 และความเข้มข้น NaOHเท่ากับ 8 และ 12 โมลาร์ ทุกส่วนผสมจะใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดอรกไซด์เท่ากับ 1.0 โดยทำการทดสอบความสามารถในการทำงาน (การไหลในแนวราบแบบอิสระและเวลาในการไหลแนวราบแบบอิสระ) และทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด) ผลการทดสอบพบว่าการไหลในแนวราบมีแนวโน้มลดลง ขณะที่เวลาในการไหลแผ่อิสระในแนวราบเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ความเหนียว และกำลังรับแรงดัดคงค้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก

คำสำคัญ: วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างสมรรถนะสูง การไหลในแนวราบแบบอิสระ เส้นใยเหล็ก เถ้าลอย เถ้าตะกรันเหล็ก

การอ้างอิงบทความ: ดารกร อินทรบุตร, ปิติ สุคนธสุขกุล, บูชิต มาโห้, ภัทรชัย พงศ์โสภา, ธนากร ภูเงินขำ และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, "อิทธิพลของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสมรรถนะสูงจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และเถ้าตะกรันเหล็ก," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 4, หน้า 1–15, เลขที่บทความ 244-136275, ต.ค.–ธ.ค. 2567.

Research Article

The Influence of Steel Fiber on Properties of High-Performance Fiber Reinforced Alkali-Activated Material Mortar Based on High-Calcium Fly Ash and GGBFS

Darrakorn Intarabut* and Piti Sukontasukkul
Construction and Building Materials Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Buchit Maho
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand
Phattharachai Pongsopha
Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage, Pathum Thani, Thailand
Tanakorn Phoo-ngernkham and Sakonwan Hanjitsuwan
Sustainable Construction Material and Technology Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 5309 8657, E–mail: darrakorn.in@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.011
Received 23 August 2022; Revised 17 October 2022; Accepted 21 October 2022; Published online: 31 July 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents the effect of Steel Fiber (SF) on high performance Alkali-activated Material Mortar (AAM) from fly ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS) on physical properties and mechanical properties. The Steel Fiber (SF) was added at the rates of 0 to 1.5% by volume of AAM. In this study, the liquid alkaline-to-binder ratio and NaOH concentration were varied at 0.40 to 0.45 and 8 to 12 M, respectively. The sand-to-binder ratio was fixed at 1.25 whereas the Na_2SiO_3-to-NaOH ratios was fixed at 1.0. The experimental series consisted of workability test (slump flow, T50 slump flow) and mechanical properties (compressive and flexural strength) of AAM. Test results indicated that the slump flow tended to decrease; however, the T50 slump flow tended to increase with increasing SF. The compressive strength, flexural strength, toughness, and residual strength of AAM tended to increase as the SF reinforcement increased.

Keywords: High-Performance Alkali-Activated Material, Slump Flow, Steel Fiber Fly Ash, Ground Granulated Blast-Furnace Slag

Please cite this article as: D. Intarabut*, P. Sukontasukkul, B. Maho, P. Pongsopha, T. Phoo-ngernkham, and S. Hanjitsuwan "The influence of steel fiber on properties of high-performance fiber reinforced alkali-activated material mortar based on high-calcium fly ash and GGBFS ," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 4, pp. 1–15, ID. 244-136275, Oct.–Dec. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันที่มีการพัฒนาและความเจริญรุ่งเรืองในทุกภาคส่วน อุตสาหกรรมการก่อสร้างก็เป็นส่วนหนึ่งที่ควบคู่ไปกับความเจริญรุ่งเรือง เพื่อตอบสนองความเจริญรุ่งเรืองในการก่อสร้างส่งผลให้มีการใช้ปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นตามไปด้วย เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโลกและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณสูง [1] เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มีงานวิจัยทำการศึกษาวัสดุทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงหรือทั้งหมดด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก หนึ่งในวัสดุทดแทนที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นหลัก คือ วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่าง [2] ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุกระตุ้นด้วยด่างได้แก่ เถ้าลอย เถ้าตะกรันเหล็ก เมตะเกาลิน และเถ้าแกลบ [3]–[7]

วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่าง คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลัก และกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาด้วยสารละลายด่างเช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ วัสดุกระตุ้นด้วยด่างที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงเป็นหลัก โดยจะมีสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากการทำปฏิกิริยาเป็นหลัก ส่วนระบบที่สองประกอบด้วยวัสดุตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมต่ำ โดยจะมีสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก [8]

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา [9]–[11] พบว่า วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างมีสมบัติเชิงกลเทียบเคียงกับระบบของปูนซีเมนต์ แต่มีความทนทานต่อการกรัดกร่อนของกรดและซัลเฟตได้ดีกว่าระบบของปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุหลัก แต่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิปกติไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าตะกรันเหล็ก [12] จากงานวิจัยของ Rafeet และคณะ [13] ได้มีการศึกษาวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าตะกรันเหล็กผสมกับเถ้าลอยแคลเซียมต่ำพบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้น แต่มีระยะเวลาในการก่อตัวที่ลดลงตามปริมาณของเถ้าตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน Marjanović [14] รายงานไว้ว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นซึ่งค่าที่เหมาะสมจะมีอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.34–0.50, Al/Si เท่ากับ 0.15–0.24, Mg/Si เท่ากับ 0.07–0.16 และ Na/Si เท่ากับ 0.21–0.37 Hamidi และคณะ [15] ได้รายงานไว้ว่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จาก 4–12 โมลาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้นส่งผลให้มีการชะละลายวัสดุตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาและจีโอพอลิเมอร์เจลมากขึ้น [16] ขณะที่ความเข้มของสารละลายที่มากกว่า 12 โมลาร์ ส่งผลกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นลดลง เนื่องจากปริมาณ OH^- ไอออนที่มากเกินไป

ตามที่ได้รายงานข้างต้นว่า วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงยังคงมีสมบัติด้านกำลังรับแรงดัดต่ำ ดังนั้นงานวิจัยจำนวนมากจึงได้มีการพัฒนาสมบัติด้านกำลังรับดัดจากการเสริมเส้นใยชนิดต่าง ๆ [17]–[19] ยกตัวอย่างเช่น Meng และคณะ [20] ได้รายงานไว้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกล ด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น ทั้งนี้การเสริมเส้นใยเหล็กสั้นและยาวเข้าด้วยกันยังสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความยาวของเส้นใยขนาดเดียว [17], [18] อย่างไรก็ตามการเสริมเส้นใยทำให้ความสามารถในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างลดลง [21] ดังเช่นงานวิจัยของ liu และคณะ [22] ได้รายงานไว้ว่าความสามารถในการไหลของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างมี

แนวโน้มลดลงตามปริมาณการเสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความจำเป็นต้องเพิ่มสมรรถนะทางด้านความสามารถในการทำงานให้ดีขึ้น

ดังนั้นจากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมางานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในเพื่อพิจารณาอิทธิพลของเส้นใยเหล็กต่อสมบัติเชิงกล ความสามารถในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างเสริมเส้นใยสมรรถนะสูงจากจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20 และเสริมเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 0–1.5 และใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดหน่วงระยะเวลาการก่อตัวเพื่อให้มีความสามารถในการทำงานตามมาตรฐานการไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (EFNARC 2002) [23] และมีกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานคอนกรีตกำลังสูง (ACI 363R) [24]

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

- เถ้าลอยแคลเซียมสูง (*FA*) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1
- เถ้าตะกรันเหล็ก (*SL*) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.90 และมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1
- ทรายแม่น้ำ จากแหล่งแม่น้ำเจ้าพระยา มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.85 มีขนาดคละระหว่าง 1.19 ถึง 4.75 มิลลิเมตร
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นเท่ากับ 8 และ 12 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O เท่ากับ 16.3 %, SiO_2 เท่ากับ 34.2 %และ H_2O เท่ากับ 49.5 %
- เส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2
- สารลดน้ำพิเศษชนิดหน่วงระยะเวลาการก่อตัว ADVA ® Cast 2727 TH เป็นสารผสมลดน้ำระดับสูงซึ่งออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงไม่มีการเพิ่มคลอไรด์ เป็นสูตรที่สอดคล้องกับข้อกำหนดส่วนผสมทางเคมีสำหรับคอนกรีต ASTM C 494 [25], Type G

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

สัดส่วนผสมใช้การแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กในเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อย 2.5 ของวัสดุเชื่อมประสาน อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 แปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 แปรผันเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร และแปรผันความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 และ 12 โมลาร์ โดยสัดส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างสมรรถนะสูงดังแสดงในตารางที่ 3

การผสมเริ่มต้นจากการผสมวัสดุตั้งต้นและทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 2 นาที เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารลดน้ำพิเศษก่อน) แล้วผสมให้เข้ากันประมาณ 2 นาที และตามด้วยเติมเส้นใยเหล็กแล้วผสมอีกครั้งประมาณ 1 นาที

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (%)	เถ้าตะกรันเหล็ก (%)
SiO_2	31.9	32.3
Al_2O_3	15.9	15.4
Fe_2O_3	14.1	0.6
CaO	26.8	39
MgO	3.7	7.2
K_2O	2.0	0.4
Na_2O	2.0	0.7
SO_3	2.5	1.2
LOI	0.2	0.7

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber)

คุณสมบัติ	
ความยาว (มม.)	35
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	0.55
กำลังรับแรงดึง (นิวตัน/มม.^{2})	1345
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	65

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างเสริมเส้นใย

สัญลักษณ์	เถ้าลอย (g)	เถ้าตะกรันเหล็ก (g)	ทรายแม่น้ำ (g)	เส้นใยเหล็ก (%)	สารลดน้ำพิเศษ (%)	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)	สาระลายโซเดียมซิลิเกต (g)
c/0.40/0SF	80	20	125	-	2.5	20	20
c/0.40/0.5SF	80	20	125	0.5	2.5	20	20
c/0.40/1.0SF	80	20	125	1.0	2.5	20	20
c/0.40/1.5SF	80	20	125	1.5	2.5	20	20
c/0.40/0SF	80	20	125	-	2.5	22.5	22.5
c/0.40/0.5SF	80	20	125	0.5	2.5	22.5	22.5
c/0.40/1.0SF	80	20	125	1.0	2.5	22.5	22.5
c/0.40/1.5SF	80	20	125	1.5	2.5	22.5	22.5

โดยที่

c คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 หรือ 12 โมลาร์

FA คือ เถ้าลอย

SL คือ เถ้าตะกรันเหล็ก

RS คือ ทรายแม่น้ำ

SF คือ เส้นใยเหล็ก

SP คือ สารลดน้ำพิเศษ

NH คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

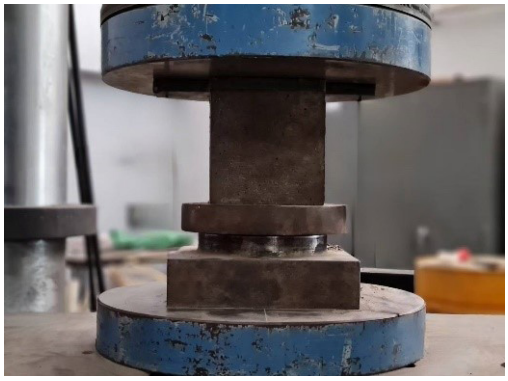
NS คือ สาระลายโซเดียมซิลิเกต

การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100 × 100 × 100 มิลลิเมตร กำลังรับแรงดัดขนาด 100 × 100 × 350 มิลลิเมตร หลังจากที่ตัวอย่างแข็งตัวทำการแกะแบบหล่อ ห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นแล้วบ่มในอากาศจนครบอายุการทดสอบเท่ากับ 28 วัน

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระ และเวลาในการไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระ (Slump Flow and T50 Slump Flow)

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จทำการเทวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยด่างเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Alkali-Activated Material; FRAAM) ลงกรวยทดสอบค่าการยุบตัว จากนั้นยกกรวยขึ้นแล้วจับเวลาที่ FRAAM ไหลถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อสิ้นสุดการไหลแบบอิสระ เกณฑ์ในการแนะนำสำหรับการไหลอิสระที่เหมาะสมเท่ากับ 650 มิลลิเมตร ถึง 800 มิลลิเมตร เวลา T50 ระหว่าง 2–5 วินาที ตามมาตรฐาน EFNARC (2002) [23]



รูปที่ 1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

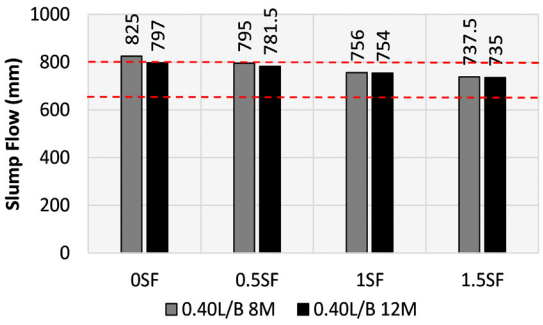
การทดสอบกำลังรับแรงอัด เตรียมตัวอย่างทดสอบที่อายุการทดสอบตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินตามมาตรฐาน BS EN 12390-3 [26] ดังแสดงในรูปที่ 1

2.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัด เตรียมตัวอย่างทดสอบที่



รูปที่ 2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด



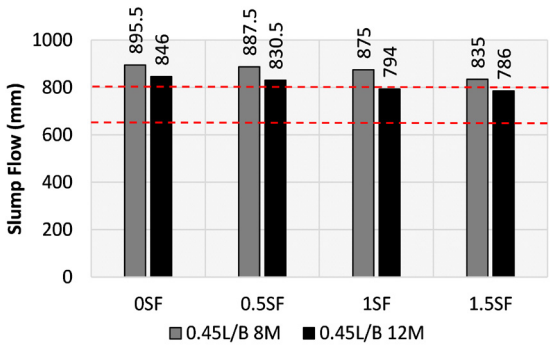
รูปที่ 3 การไหลแผ่ของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40

อายุการทดสอบตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง การทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C1609 [27] ดังแสดงในรูปที่ 2

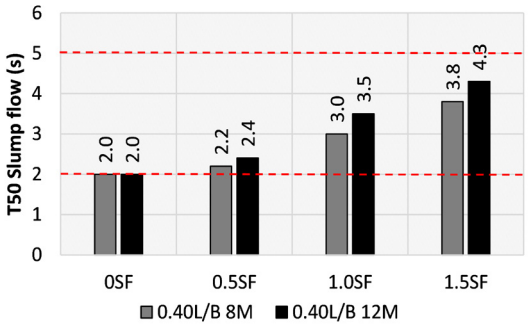
3. ผลการทดลอง

3.1 ความสามารถในการทำงาน

จากรูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบการไหลแผ่ของ FRAAM) เสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร L/B เท่ากับ 0.40 พบว่าการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 825 795



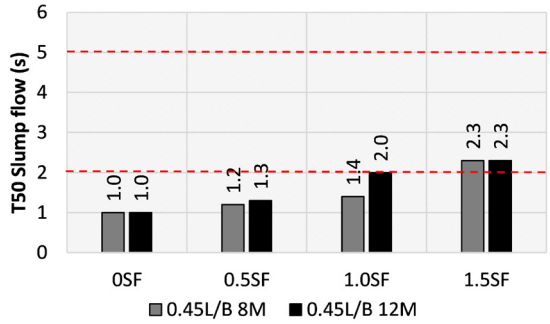
รูปที่ 4 การไหลแผ่ของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.45



รูปที่ 5 ระยะเวลาในการไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40

756 และ 737.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ขณะที่ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ จะมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 797 781.5 754 และ 735 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขณะที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าการไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 895.5 887.5 875 และ 835 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และขณะที่ความเข้มข้น NaOHเท่ากับ 12 โมลาร์ จะมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 846 830.5 794 และ 786 มิลลิเมตร ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงผลระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบ T50 เซนติเมตรของ FRAAM ที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตรพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการไหลมีค่ามากขึ้น ซึ่งมี



รูปที่ 6 ระยะเวลาในการไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.45

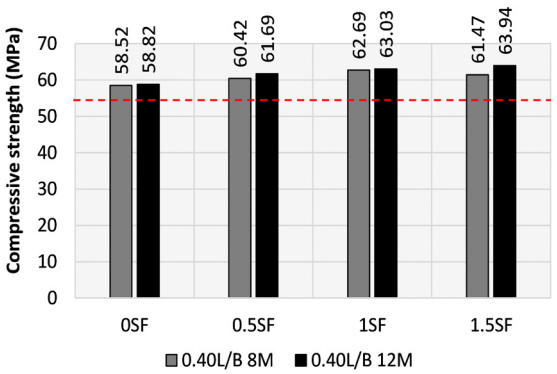
ค่าระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบเท่ากับ 2.0 2.2 3.0 และ 3.8 วินาที ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ขณะที่ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ มีระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบเท่ากับ 2.0 2.2 3.5 และ 4.3 วินาที ตามลำดับขณะ L/B เท่ากับ 0.45 มีค่าระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบ เท่ากับ 1.0 1.2 1.4 และ 2.3 วินาที ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ มีระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบ เท่ากับ 1.0 1.3 2.0 และ 2.3 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6

การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการทำงานตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากมีของเหลวใน FRAAM เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกันกับอัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำของระบบซีเมนต์ การลดลงของความสามารถในการทำงานตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากเส้นใยเหล็กมีพื้นผิวที่สูงทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวที่สูงระหว่างเส้นใยเหล็กและวัสดุประสานทำให้เกิดการขัดขวางในการทำงานได้ของเส้นใยใน FRAAM [18], [28], [29] เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้น NaOH พบว่า ความเข้มข้น NaOHเท่ากับ 8 โมลาร์ มีค่าความสามารถในการทำงานดีกว่าความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะมีความหนืดมากขึ้น [30] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และความเข้มข้น NaOH ที่ต่ำสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานของ FRAAM ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากมาตรฐาน EFNARC (2002) พบว่า FRAAM ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (80FA20SL/12/0.40) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโดยที่มีค่าการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 650–800 มิลลิเมตร และมีค่าระยะเวลาในการทำงานได้อิสระในแนวราบระหว่าง 2–5 วินาทีในทุกส่วนผสม (เสริมเส้นใยเหล็ก 0–1.5%) ซึ่งมีความเหมาะสมในการทำการทดสอบความคงทนของสัดส่วนผสม FRAAM ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ในอนาคต

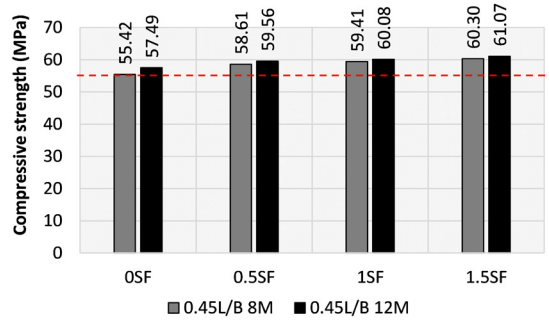
3.2 กำลังรับแรงอัด

3.2.1 อิทธิพลของการเสริมเส้นใยเหล็ก

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของการเสริมเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงอัดของ FRAAM ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร L/B เท่ากับ 0.40 พบว่า สามารถรับกำลังอัดได้ 58.52 60.42 62.69 และ 61.47 เมกะปาสคาล ตามลำดับสำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ส่วนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 58.82 61.69 63.03 และ 63.94 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ขณะL/B เท่ากับ 0.45 (รูปที่ 8) สามารถรับกำลังอัดได้ 55.42 58.61 59.41 และ 60.30 เมกะปาสคาล ตามลำดับสำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 57.49 59.56 60.08 และ 61.07 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก เนื่องจากปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถช่วยชะลอการขยายตัวของรอยร้าวของจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่เสริมเส้นใย [17] ในกรณีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงหลังจากที่ปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 1.5 นั้น อาจเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ และเกิดความพรุนทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง [31], [32]



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดและปริมาณเส้นใยเหล็ก L/B เท่ากับ0.40



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดและปริมาณเส้นใยเหล็ก L/B เท่ากับ 0.45

3.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

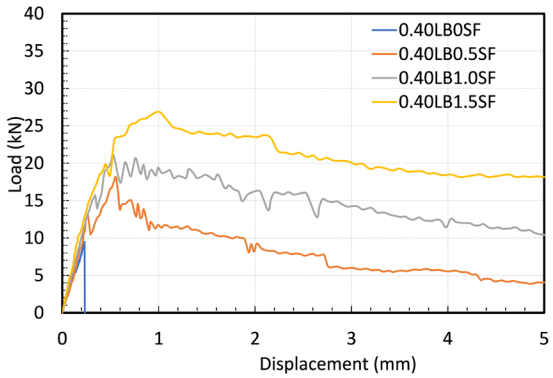
จากผลการทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า FRAAM ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจาก 0.40 เป็น 0.45 โดยมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 1.9–5.3 ขณะที่ใช้ความเข้มข้น NaOHเท่ากับ 12 โมลาร์ มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 2.3–4.7 เนื่องจากอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นจะมีพฤติกรรมทำนองเดียวกันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของระบบปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเกณฑ์ของกำลังรับแรงอัดที่ต้องการสำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่พบว่า FRAAM มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐานของ คอนกรีตกำลังสูง ACI 363R [24] ในทุกส่วนผสม

3.2.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย

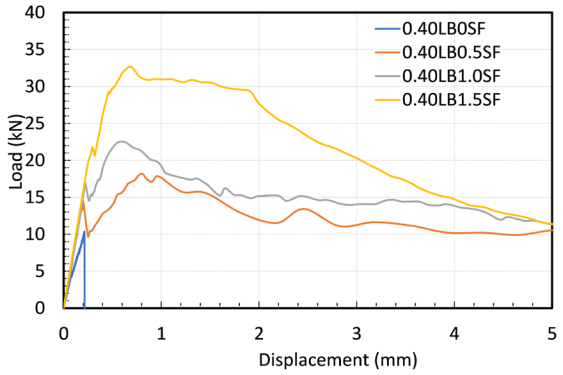
จากผลการทดสอบการแปรผันความเข้มข้น NaOH ดังรูปที่ 7 และ 8 ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น NaOH ที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 0.5–3.9 ขณะที่ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 1.1–3.6 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น NaOH เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้น NaOH สูงขึ้นจะมีความสามารถในการชะละลายซิลิกา และอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชั่นได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 5–6 เห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากอาจเนื่องจากความเข้มข้น NaOH ที่ไม่ได้แตกต่างกันมากส่งผลทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไม่มากอย่างมีนัยสำคัญ [33]

3.3 พฤติกรรมการดัด

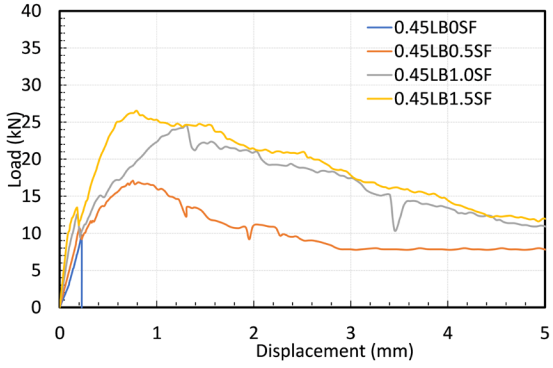
พฤติกรรมการดัดของ FRAAM ที่มีความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 และ 12 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.45 และมีอัตราส่วนเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 9–12 พบว่า FRAAM มีการรับแรงในช่วงแรกในลักษณะขึ้นเป็นเส้นตรงอย่างเป็นสัดส่วนเนื่องจากเป็นผลของการรับแรงของ FRAAM จนกระทั่งการรับแรงมีการเพิ่มขึ้นจน FRAAM เกิดรอยแตกร้าวแรกซึ่งเกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่าค่าโมดูลัสการแตกร้าว ซึ่งส่งผลให้เกิดการรับแรงมีการลดลงอย่างทันที หลังจากนั้นจะมีการรับแรงที่มากกว่าจุดที่เกิดรอยแตกร้าวช่วงต้น การที่กำลังการรับแรงของ FRAAM สามารถรับแรงหลังจากเกิดรอยแตกร้าวในช่วงต้นได้นั้นเกิดจากความต้านทานแรงหลังจากการแตกร้าวซึ่งเป็นผลมาจากการที่เส้นใยเหล็กใน FRAAM ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี ทำหน้าที่รับแรงหลังจาก FRAAM ที่เกิดการแตกร้าว จนเมื่อสามารถรับแรงได้จนถึงจุดสูงสุด FRAAM ยังคงมีการรับแรงที่ลดลงและค่าการแอ่นตัวที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแอ่นตัวที่เพิ่มมากขึ้น และทำให้เส้นใยเหล็กหลุดออกจากจีโอพอลิเมอร์ [17]



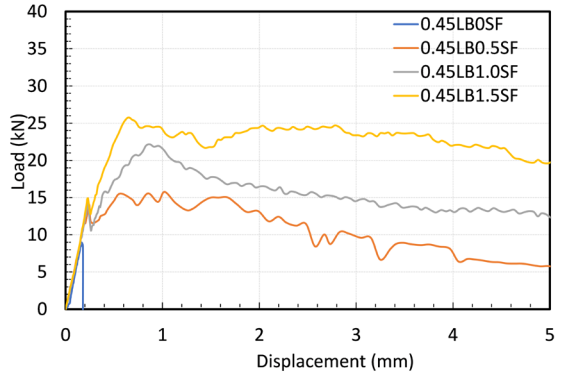
รูปที่ 9 แรงดัดและค่าการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40 และ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์



รูปที่ 11 แรงดัดและค่าการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40 และ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์



รูปที่ 10 แรงดัดและค่าการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.45 และ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์

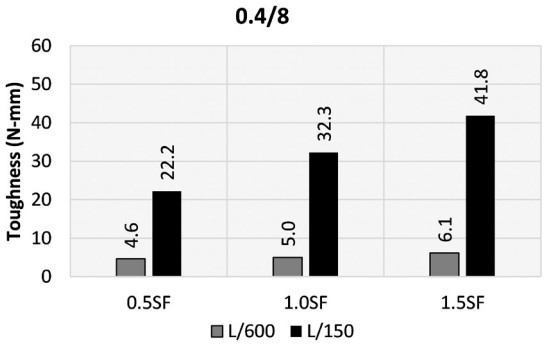


รูปที่ 12 แรงดัดและค่าการแอ่นตัวของ FRAAM L/Bเท่ากับ 0.45 และ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

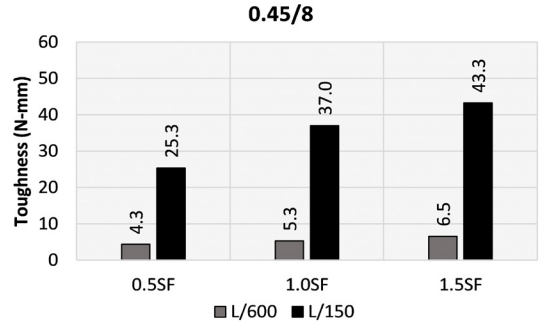
ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงสูงสุดช่วงแรกและช่วงที่ 2 ของการเสริมเส้นใยเหล็ก และร้อยละการลดลงของแรงในจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็ก จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5–1.5 โดยปริมาตร ทั้งในช่วงแรงดัดสูงสุดช่วงระยะต้นและระยะที่สอง โดยส่วนใหญ่ในทุกส่วนผสมมีค่าแรงดัดช่วงที่ 2 สูงกว่าช่วงที่ 1 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้น NaOH พบว่า ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์ มีค่าแรงดัดช่วงที่ 2 เพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 0–97 ขณะที่ความเข้มข้นเท่ากับ 12 โมลาร์ มีค่าแรงดัดช่วงที่ 2 เพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 13–73 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์ การเสริมเส้นใยสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงได้หลังการแตกร้าวได้สูงกว่า 12 โมลาร์ อาจเนื่องจาก 12 โมลาร์ มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงอาจทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีทำให้มีค่าการแรงดัดสูงสุดในช่วงแรกมีค่าที่สูงกว่า 8 โมลาร์ ซึ่งอาจสรุปได้ว่าค่าแรงดัดที่สูงขึ้นนั้นเกิดจากการรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าวได้จากการเสริมเส้นใยเหล็กในจีโอพอลิเมอร์ [34] นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีค่าการลดลงของแรงดัดหลังการแตกร้าวระหว่างร้อยละ 7–24 ขณะที่ 12 โมลาร์ มีค่าการลดลงของแรงดัดหลังการแตกร้าวระหว่างร้อยละ 5–33

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดัดสูงสุดช่วงแรกและช่วงที่ 2 ของการเสริมเส้นใยเหล็ก

สัญลักษณ์	แรงดัดสูงสุดช่วงแรก (kN)	การลดลงของแรง		แรงดัดสูงสุดช่วงที่ 2	
		kN	%	kN	%
8/0.40/0SF	9.45	-		-	
8/0.40/0.5SF	13.11	10.49	20%	13.14	0%
8/0.40/1.0SF	15.67	13.98	11%	21.05	34%
8/0.40/1.5SF	19.85	18.40	7%	26.87	35%
8/0.45/0SF	9.71	-		-	
8/0.45/0.5SF	10.63	9.24	13%	17.08	61%
8/0.45/1.0SF	12.56	9.49	24%	24.52	95%
8/0.45/1.5SF	13.46	11.14	17%	26.53	97%
12/0.45/0SF	10.32	-		-	
12/0.40/0.5SF	14.43	9.74	33%	18.18	26%
12/0.40/1.0SF	16.97	14.57	14%	22.44	32%
12/0.40/1.5SF	21.80	20.63	5%	32.65	50%
12/0.45/0SF	8.96	-		-	
12/0.45/0.5SF	13.96	11.17	20%	15.76	13%
12/0.45/1.0SF	14.39	10.61	26%	22.14	54%
12/0.45/1.5SF	14.91	12.82	14%	25.78	73%



รูปที่ 13 ความเหนียวและระยะการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40 และ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์

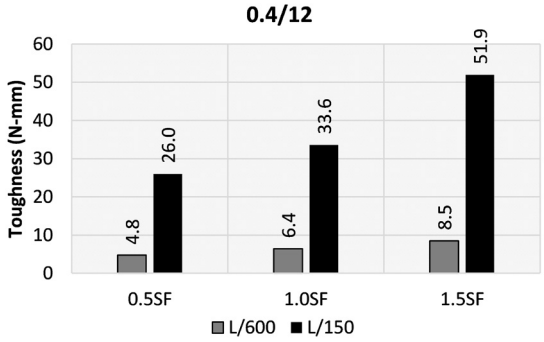


รูปที่ 14 ความเหนียวและระยะการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.45 และ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์

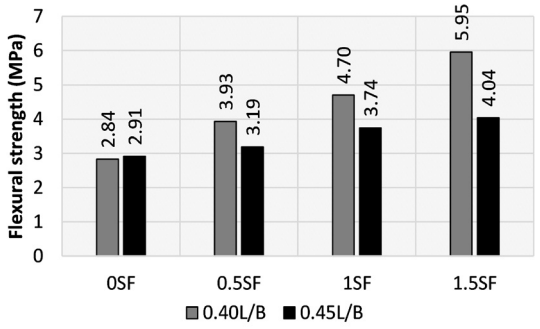
3.4 ความเหนียว

จากผลการศึกษาความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM C1609 [22] พบว่า ความเหนียวของ FRAAM ที่มีความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร มีความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว L/600 เท่ากับ 4.6 5.0 6.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N-mm) ตามลำดับ และที่ระยะแอ่นตัว L/150 เท่ากับ 22.2 32.3 และ 41.8 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 13 และ L/B เท่ากับ 0.45 มีความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว L/600 เท่ากับ 4.3 5.3 และ 6.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และที่ระยะแอ่นตัว L/150 เท่ากับ 25.3 37.0 และ 43.3 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 ความเหนียวของ FRAAM ที่มีความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่ระยะแอ่นตัว L/600 เท่ากับ 4.8 6.4 และ 8.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และที่ระยะแอ่นตัว L/150 เท่ากับ 26.0 33.6 และ 51.9 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15 และ L/B เท่ากับ 0.45 มีความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว L/600 เท่ากับ 4.9 5.4 และ 6.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และที่ระยะแอ่นตัว L/150 เท่ากับ 26.5 33.1 และ 41.7 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16

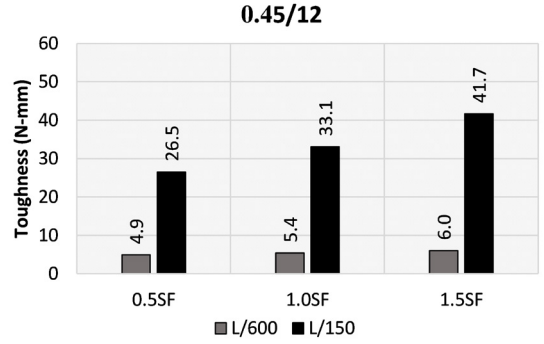
จากผลการศึกษาพบว่า ความเหนียวของ FRAAM ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 13–16 ที่ระยะแอ่นตัว (L/150) นั้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กสามารถพัฒนาความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้อย่าง



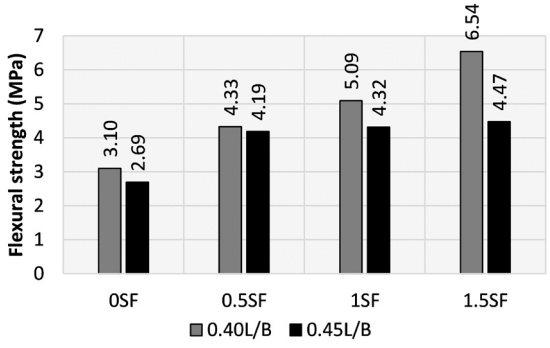
รูปที่ 15 ความเหนียวและระยะการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.40 และ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์



รูปที่ 17 กำลังรับแรงดัดของ FRAAM NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์



รูปที่ 16 ความเหนียวและระยะการแอ่นตัวของ FRAAM L/B เท่ากับ 0.45 และ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์



รูปที่ 18 กำลังรับแรงดัดของ FRAAM NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

มีประสิทธิภาพเนื่องจากค่าความเหนียวสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ของการรับแรงดัดและค่าการแอ่นตัวโดยที่ระยะการแอ่นตัว L/150 มีการแอ่นตัวที่สูงและการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มพื้นที่ใต้กราฟมากขึ้น จึงส่งผลให้ความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาตรเส้นใยเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะการแอ่นตัว (L/600) ความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ปริมาตรต่าง ๆ นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดการแอ่นตัวต่ำทำให้พื้นที่ใต้กราฟนั้นมีค่าน้อย จึงทำให้การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กซึ่งส่งผลในการเพิ่มกำลังรับแรงดัดสามารถเพิ่มความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้ค่าความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นมีค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาตรเส้นใยเหล็ก [17]

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของ NaOH พบว่า มีค่าความเหนียวไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงดัดหลังการแตกร้าวที่มีค่าใกล้เคียงกัน และมีความเข้มข้น NaOH ที่ไม่แตกต่างกันมากนักทำนองเดียวกันกับกำลังรับแรงอัด [33]

3.5 กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดัดคงค้าง

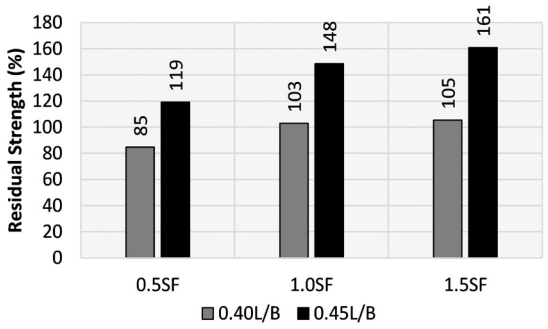
3.5.1 กำลังรับแรงดัด

รูปที่ 17 และ 18 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของ FRAAM ขณะที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร ที่ใช้ความเข้มข้น NaOH

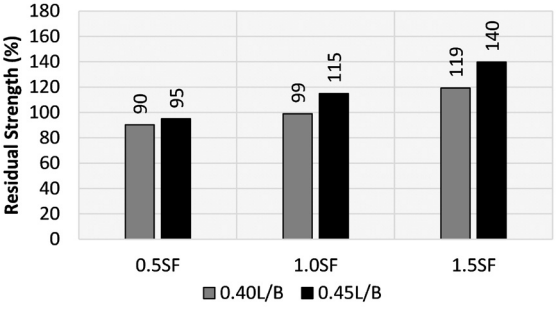
เท่ากับ 8 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 สามารถรับแรงดัดได้ 2.84 3.93 4.70 และ 5.95 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และ L/B เท่ากับ 0.45 สามารถรับแรงดัดได้ 2.91 3.19 3.74 และ 4.04 เมกะปาสคาล ขณะที่ใช้ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 สามารถรับแรงดัดได้ 3.10 4.33 5.09 และ 6.54 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อ L/B เท่ากับ 0.45 สามารถรับแรงดัดได้ 2.69 4.19 4.32 และ 4.47 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดของ FRAAM เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เติมเข้าไป แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของ FRAAM มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้น NaOH พบว่า กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8.8–52.3 สำหรับ 8 โมลาร์ ขณะที่ 12 โมลาร์ มีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 28.4 ถึง 52.6

3.5.2 กำลังรับแรงดัดคงค้าง

จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของ FRAAM ดังรูปที่ 19 และ 20 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดคงค้างของ FRAAM ขณะที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร ที่ใช้ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีกำลังรับแรงดัดคงค้างเท่ากับ 85% 103% และ 105% ตามลำดับ และ L/B เท่ากับ 0.45 มีค่ากำลังรับแรงดัดคงค้างเท่ากับ 119% 148% และ 161% ตามลำดับ ขณะที่ใช้ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่ากำลังคงค้างเท่ากับ 95% 115% และ 140% ตามลำดับ และ L/B เท่ากับ 0.45 มีค่ากำลังคงค้างเท่ากับ 4.26% 94.88% 114.87% และ 139.68% พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดคงค้างของ FRAAM เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานส่งผลให้ค่ากำลังดัดคงค้างของ FRAAM เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่เพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็ก หรือเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน จะทำให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังในการยึดเกาะเส้นใยเพิ่มขึ้น ดังนั้นกำลังรับแรงดัดคงค้างจึงเพิ่มขึ้น [17] ขณะที่ความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นมีค่ากำลังรับแรงดัดคงค้างมีลดลงเล็กน้อย ขณะที่การลดลงของกำลังรับแรงดัดคงค้างนั้นอาจเนื่องจากที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์ นั้นมีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่า 8 โมลาร์ [15] แต่มีกำลังดัดสูงสุดหลังจากการแตกร้าวที่ใกล้เคียงกันส่งผลให้ร้อยละการคงค้างของกำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงขึ้น



รูปที่ 19 กำลังรับแรงดัดคงค้างของ FRAAM NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์



รูปที่ 20 กำลังรับแรงดัดคงค้างของ FRAAM NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

4. สรุป

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าการไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระลดลงตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าลดลงประมาณ

ร้อยละ 7–11 สำหรับความเข้มข้นNaOHเท่ากับ 8 โมลาร์ และร้อยละ 7–8 สำหรับความเข้มข้นNaOHเท่ากับ 12 โมลาร์

2) ค่าระยะเวลาในการไหลแผ่ในแนวราบแบบอิสระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 90–130 สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ และร้อยละ 115–130 สำหรับความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

3) ค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 ค่ากำลังรับแรงดัดร้อยละ 110

4) ค่าความเหนียว และกำลังรับแรงดัดคงค้างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นสูงจาก 1.15–51.95 และมีค่ากำลังดัดคงค้างมากขึ้นถึงร้อยละ 160.9

5) FRAAM ที่ความเข้มข้น NaOH 12 โมลาร์ อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.40 มีความสามารถในการทำงาน และคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานที่กำหนดในทุกส่วนผสม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาเอก ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 รหัสทุนสัญญาเลขที่ บว.(วช.) /02/2565

เอกสารอ้างอิง

[1] B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer, “Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” *Climate change 2007*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 447–496, 2007.

[2] S. Detphan, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, C. Detphan, and P. Chindaprasirt, “Portland cement containing fly ash, expanded perlite, and plasticizer for masonry and plastering mortars,” *International Journal of GEOMATE*, vol 15, no. 48, pp. 107–113, 2018.

[3] T. Phoo-Ngernkham, C. Phiangphimai, N Dam rongwiriyanupap, S. Hanjitsuwan, J. Thum rongvut, 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,* 2018.

[4] T. Phoo-Ngernkham, C. Phiangphimai, D. Intarabut, S. Hanjitsuwan, N Damrongwiriyanupap, L. Y. Li, and P. Chindaprasirt, “Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue,” *Construction and Building Materials*, vol. 247, pp. 118543, 2020.

[5] F. Puertas, B. González-Fonteboa, I. González Taboada, M. M. Alonso, G Torres-Carrasco, and F. Martínez-Abella, “Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behavior,” *Cement and concrete composites*, vol. 85, pp. 22–31, 2018.

[6] F. Pacheco-Torgal, D. Moura, Y. Ding, and S. Jalali, “Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 9, pp. 3732–3745, 2011.

[7] Y.J. Patel, and N. Shah, “Development of self-compacting geopolymer concrete as a sustainable construction material,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 6, pp. 412–421, 2018.

[8] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes and S.

Jalali, "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products," *Construction and Building Material*, vol. 22, no. 7, pp. 1305–1314, 2008.

[9] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 43, pp. 125–130, 2013.

[10] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1305–1314, 2008.

[11] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 658–670, 2005.

[12] S. Sasui, G. Kim, J. Nam, T. Koyama, and S. Chansomsak, "Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH + Na_2SiO_3," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 1, pp. 59, 2020.

[13] A. Rafeet, R. Vinai, M. Soutsos, and W. Sha, "Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs)," *Cement and Concrete Research*, vol. 122, pp. 118–135, 2019.

[14] N. Marjanović, M. Komljenović, Z. Baščarević, V. Nikolić, and R. Petrović, "Physical mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends," *Ceramics International*, vol. 41, no. 1, pp. 1421–1435, 2015.

[15] R. M. Hamidi, Z. Man, and K. A. Azizli, "Concentration of NaOH and the effect on the properties of fly ash based geopolymer," *Procedia Engineering*, vol. 148, pp. 189–193, 2016.

[16] M. Olivia and H. Nikraz, "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 36 , pp. 191–198, 2012.

[17] P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, P. Chin daprasirt, and S. Songpiriyakij, "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 37–44, 2018.

[18] X. Gao, Q. L. Yu, R. Yu, and H. J. H. Brouwers, "Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites," *Materials and Structures*, vol. 50, no. 2, 2017.

[19] E. Mohseni, "Assessment of Na_2SiO_3 to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites," *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp 904–911, 2018.

[20] Q. Meng, C. Wu, H. Hao, J. Li, P. Wu, Y. Yang, and Z. Wang, "Steel fibre reinforced alkali-activated geopolymer concrete slabs subjected to natural gas explosion in buried utility tunnel," *Construction and Building Materials*, vol. 246, pp. 118447, 2020.

[21] P. Zhang, K. Wang, J. Wang, J. Guo, S. Hu, and Y. Ling, "Mechanical properties and prediction of fracture parameters of geopolymer/

alkali-activated mortar modified with PVA fiber and nano-SiO_2," *Ceramics International*, vol. 46, pp. 20027–20037, 2020.

[22] Y. Liu, Z. Zhang, C. Shi, D. Zhu, and N. Li, Y. Deng, "Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): influence of steel fiber on mechanical properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 112 , pp. 103670, 2020.

[23] EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting. Concrete," *Association House*, Surrey, UK, 2002.

[24] ACI Committee 363, "High-Strength Concrete (ACI 363R)," *Symposium Paper*, vol. 228, pp 79–80, 2005.

[25] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C494/C494M-17, 2017.

[26] *Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens*, BS EN 12390-3, 2019.

[27] *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*, ASTM C1609/C1609M-12, 2019.

[28] S. Grunewald, "Performance-based design of self compacting fibre reinforced concrete," Doctoral Thesis, Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 2004.

[29] I. Markovic, *High-performance hybrid-fibre concrete development and utilization*. Netherland: Delft University of Technology, 2006.

[30] E. C. Osoka, and C. I. O. Kamalu, "Effect of sodium hydroxide concentration on kinetic parameters during gelatinization," *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 5–8, 2010.

[31] M. Ibraheem, F. Butt, R. M. Waqas, K. Hussain, R. F. Tufail, N. Ahmad, K. Usanova, and M. A. Musarat, "Mechanical and microstructural characterization of quarry rock dust incorporated steel fiber reinforced geopolymer concrete and residual properties after exposure to elevated temperatures," *Materials*, vol. 14, no. 22, pp. 6890, 2021.

[32] S. Jamnam, B. Maho, A. Techaphatthanakon, C. Ruttanapun, P. Aemlaor, H. Zhang, and P. Sukontasukkul, "Effect of graphene oxide nanoparticles on blast load resistance of steel fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 343, pp. 128139, 2022.

[33] M. M. Al-mashhadani and O. Canpolat, "Effect of various NaOH molarities and various filling materials on the behavior of fly ash based geopolymer composites," *Construction and Building Materials*, vol. 262, pp. 120560, 2020.

[34] S. Deepa Raj, R. Abraham, N. Ganesan, and D. Sasi, "Fracture properties of fibre reinforced geopolymer concrete," *International Journal of Scientific and Engineering Research*. vol. 4, no. 5, pp. 75–80, 2013.