



การศึกษาเบื้องต้นวัสดุเชื่อมประสานกระดูกด้วยต่างสมรรถนะสูงจากแก้วลอยแคลเซียมสูง ซิลิกาฟุ่ม และแก้วตะกรันเหล็ก

ดาร์กร อินทรบุตร* บุชิต มาให้ และ ปิติ สุคนธสุขกุล

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภัทรชัย พงศ์โสภา

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ธนากร ภูเงินข้า

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ

สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 5309 8657 อีเมล: darrakorn.in@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.005

รับเมื่อ 28 มิถุนายน 2564 แก้ไขเมื่อ 6 กันยายน 2564 ตอบรับเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 20 กันยายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการแทนที่ซิลิกาฟุ่มและแก้วตะกรันเหล็กในวัสดุเชื่อมประสานกระดูกด้วยต่างจากแก้วลอยแคลเซียมสูงต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล โดยการแทนที่แก้วลอยด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนักของแก้วลอย และการแทนที่แก้วลอยด้วยแก้วตะกรันเหล็กร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนักของแก้วลอย ในการศึกษาจะแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 และ 12 โมลาร์ ขณะที่ทุกส่วนผสมจะใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 โดยดำเนินการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ (ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ และระยะเวลาในการทำงาน) และการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระดูกด้วยต่าง ผลการทดสอบพบว่า ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์มีค่าลดลง ขณะที่ระยะเวลาในการทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการแทนที่ซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ซิลิกาฟุ่มถึงร้อยละ 2.5 หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของการแทนที่แก้วตะกรันเหล็กส่งผลให้ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์และระยะเวลาการก่อตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่แก้วตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่แก้วตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุเชื่อมประสานกระดูกด้วยต่างสมรรถนะสูง แก้วลอยแคลเซียมสูง แก้วตะกรันเหล็ก ซิลิกาฟุ่ม ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ กำลังรับแรงอัด

การอ้างอิงบทความ: ดาร์กร อินทรบุตร, บุชิต มาให้, ปิติ สุคนธสุขกุล, ภัทรชัย พงศ์โสภา, ธนากร ภูเงินข้า และ สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ, "การศึกษาเบื้องต้นวัสดุเชื่อมประสานกระดูกด้วยต่างสมรรถนะสูงจากแก้วลอยแคลเซียมสูง ซิลิกาฟุ่ม และแก้วตะกรันเหล็ก," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, หน้า 1-13, เลขที่บทความ 234-095184, ต.ค.-ธ.ค. 2566.



Preliminary Study on High Performance Alkali-activated Material from Fly Ash, Silica Fume and Ground Granulated Blast-furnace Slag

Darrakorn Intarabut*, Buchit Maho 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

Phattharachai Pongsopha

Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage, Pathum Thani, Thailand

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

* Corresponding Author, Tel. 08 5309 8657, E-mail: darrakorn.in@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.005

Received 28 June 2021 ; Revised 6 September 2021 ; Accepted 15 November 2021; Published online: 20 September 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents the effect of silica fume (SF) and ground granulated blast-furnace slag (SL) replacement in high-calcium fly ash alkali-activated materials on physical and mechanical properties. The fly ash (FA) was replaced by SF and SL at the rates of 0–10% by weight of FA, and 0–50% by weight of FA, respectively. The liquid alkaline-to-binder ratio and NaOH concentration were varied from 0.35–0.45 and 8–12 M, respectively. The sand-to-binder ratio was fixed at 1.25 whereas that of the Na_2SiO_3 -to-NaOH was fixed at 1.0. The experimental series consisted of workability test (relative slump, setting time) and compressive strength of alkali-activated materials. Test results indicated that the relative slump tended to decrease; however, the setting time tended to increase with increasing SF replacement. The compressive strength of alkali-activated materials increased with the 2.5 percent SF replacement and then decreased with the SF increased amount. Use of SL to replace FA tended to decrease both relative slump and setting time; however, strength development tended to increase as the amount of SL replacement increased.

Keywords: High-performance Alkali-activated Material, High Calcium Fly Ash, Ground Granulated Blast-furnace Slag, Silica Fume, Relative Slump, Compressive Strength

Please cite this article as: D. Intarabut, B. Maho, P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, T. Phoo-ngernkham, and S. Hanjitsuwan, "Preliminary study on high performance alkali-activated material from fly ash, silica fume and ground granulated blast-furnace slag," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–13, ID. 234-095184, Oct.-Dec. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันงานก่อสร้างส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีการใช้ความร้อนและเชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณสูง นำไปสู่การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณสูง [1] ดังนั้น งานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีแนวคิดในพัฒนาวัสดุคอนกรีตให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงหรือไม่ใช้เลย จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] พบว่า การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมีสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ดี อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด ดังนั้นการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์จึงได้รับการศึกษา โดยในปัจจุบันวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถพัฒนาและมีสมบัติด้านกำลังเพียงพอต่อการใช้งานก่อสร้าง คือ วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่าง [3]

วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา และกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในการทำปฏิกิริยาจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าคอนกรีตปกติประมาณร้อยละ 9 [4]

ปฏิกิริยาของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ 1) ระบบวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงในวัสดุตั้งต้น ผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้จะประกอบไปด้วยสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) เป็นหลัก และ 2) ระบบวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างที่มีองค์ประกอบของ

แคลเซียมต่ำในวัสดุตั้งต้น ผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้จะประกอบไปด้วยสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) เป็นหลัก [5]

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา [6]–[8] พบว่า วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีสมบัติเชิงกลเทียบเคียงกับระบบของปูนซีเมนต์ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและซัลเฟตสูง ในประเทศไทย นิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่าง แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างไม่สูงมากเมื่อบ่มในอุณหภูมิปกติเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าตะกั้นเหล็ก [9] ซึ่งการเติมสารผสมเพิ่มในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอย เช่น ยิปซัม ซิลิกาฟูม และแคลเซียม สามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างได้ ดังแสดงในรายงานวิจัยที่ผ่านมา [10] โดยมีการใช้ซิลิกาฟูมกับเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อกระตุ้นให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่าง [11] นอกจากนี้จากงานวิจัยของ ปริญญา [12] รายงานว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์ในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ในระบบ อีกทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการคลายความร้อนจากปฏิกิริยายังช่วยเร่งปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่าง

จากการที่นักวิจัยได้มีความพยายามพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างให้สามารถใช้ในภาคสนามของงานก่อสร้างและเป็นที่ยอมรับจากภาคเอกชนมากขึ้น จึงได้มีการศึกษาวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างสมรรถนะสูงซึ่งวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างสมรรถนะสูงนั้น เป็นวัสดุที่มีการไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง กำลังรับแรงที่สูงมากกว่า 60 เมกะปาสคาล และมีความทนทานต่อสิ่งแวดล้อม จากงาน

วิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เถ้าลอยและเถ้าตะกรันเหล็กเป็นวัสดุตั้งต้นเสริมด้วยเส้นใยเหล็กไฮบริดในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์สมรรถนะสูงพบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง แต่มีค่าการยุบตัวที่ลดลงเนื่องจากมีปริมาณเส้นใยเหล็กที่สูงขึ้น [13]

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษากำลังรับแรงอัด และความสามารถในการทำงานได้ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุพอซโซลาน สองชนิด คือ ซิลิกาฟูม และเถ้าตะกรันเหล็ก โดยพิจารณาปัจจัยของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบที่ได้รับจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นวัสดุวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างสมรรถนะสูงในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยเถ้าลอย (FA) ซิลิกาฟูม (SF) และเถ้าตะกรันเหล็ก (SL) โดยเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ 2.61 ขณะที่ซิลิกาฟูมและเถ้าตะกรันเหล็กมีความถ่วงจำเพาะ 2.25 และ 2.90 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เป็นหลัก และมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 61.81 และปริมาณ CaO สูงที่ร้อยละ 26.76 ดังนั้นเถ้าลอยจัดอยู่ใน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-15 [14] ขณะที่เถ้าตะกรันเหล็กมีส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบ CaO ส่วนซิลิกาฟูมมีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลัก ขณะที่มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย คือ ทราย (RS) ซึ่งมีมอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.85 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยกับซิลิกาฟูม และเถ้าลอยกับเถ้าตะกรันเหล็กดังแสดงในตารางที่ 2 โดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ในเถ้าลอยที่ร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก และแทนที่เถ้าตะกรันเหล็ก

ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าตะกรันเหล็กในเถ้าลอยไม่เท่ากันเนื่องจากผู้วิจัยต้องการควบคุมอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาไม่ให้เกิน 4.00 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์วัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างตามรายงานวิจัยของ Chindaprasit และคณะ [15]

ในการศึกษาจะดำเนินการแปรผันปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ และ 12 โมลาร์ และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/b) เท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ ซึ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้เป็นสารละลายต่างมีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 16.3 SiO_2 ร้อยละ 34.2 และ H_2O ร้อยละ 49.5 โดยทุกอัตราส่วนผสมจะใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0

สำหรับขั้นตอนการผสม เริ่มด้วยการชั่งส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2 แล้วนำไปผสมแห้งในเครื่องโม่แบบ Pan Mixer เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในส่วนผสมแล้วทำการผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที และตามด้วยการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงแล้วทำการผสมอีกครั้งให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (%)	เถ้าตะกรันเหล็ก (%)	ซิลิกาฟูม (%)
SiO_2	31.85	32.3	88.3
Al_2O_3	15.89	15.4	1.17
Fe_2O_3	14.07	0.6	4.76
CaO	26.76	39	0.48
MgO	3.66	7.2	-
K_2O	1.95	0.4	-
N_2O	1.95	0.7	-
SO_3	2.45	1.2	-
LOI	0.17	0.7	-
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	60.92	48.3	99.52

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าตะกรันเหล็ก

สัญลักษณ์	เถ้าลอย (%)	ซิลิกาฟูม (%)	เถ้าตะกรันเหล็ก (%)	CaO/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
FA100	100	-	-	0.61	2.76
2.5SF	97.5	2.5	-	0.58	2.91
5.0SF	95.0	5.0	-	0.55	3.08
7.5SF	92.5	7.5	-	0.52	3.25
10.0SF	90.0	10.0	-	0.49	3.43
20SL	80	-	20	0.67	2.78
30SL	70	-	30	0.69	2.79
40SL	60	-	40	0.72	2.80
50SL	50	-	50	0.75	2.82

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การทดสอบค่าการยุบตัวสัมพัทธ์

ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ดำเนินการทดสอบตามวิธี Mini Slump Test ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [16] เริ่มต้นด้วยการเทมอร์ตาร์ลงในกรวยคว่ำโดยแบ่งระดับการเทออกเป็นสองชั้น และทำการอัดแน่นด้วยการกระทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น เสร็จแล้วจึงทำการปาดหน้าให้เรียบทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงทำการยกกรวยโดยปล่อยให้ตัวอย่างไหลแบบอิสระ และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลแผ่ของตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งต้น โดยการใช้อัตราการทดสอบตามวิธี Mini Slump Test ในงานวิจัยนี้เนื่องด้วยต้องการพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นที่ใช้พิจารณาความสามารถในด้านการไหลและการอัดแน่นด้วยตัวเอง

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างเหลวลงแบบหล่อขนาด 50 × 50 × 50 มิลลิเมตร แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และทำการถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง หลังจากการหล่อตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

อีกครั้ง และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ดำเนินการเตรียมตัวอย่างและทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13 [17]

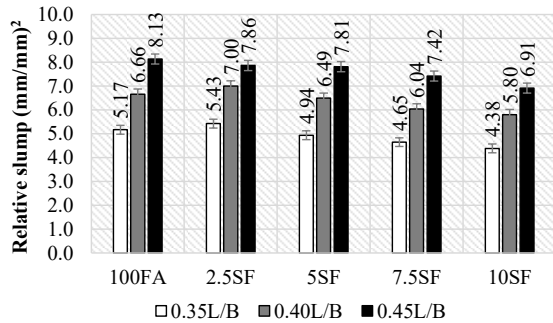
2.3.3 การทดสอบระยะเวลาในการทำงาน

การทดสอบระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 [18] ทดสอบโดยใช้เข็มมาตรฐานแบบไวแคตเช่นเดียวกันกับการทดสอบระยะเวลาในการทำงานของซีเมนต์เพสต์ การวัดระยะเวลาในการทำงาน คือ ระยะเวลาที่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ปลดปล่อยไปในซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้น เหลวปกติหลังจากนั้นเข็มจมลงในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์ 25 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 30 วินาที และการก่อดำเนินการเกิดขึ้นเมื่อเข็มไวแคตไม่สามารถจมลงในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างได้

3. ผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของการแทนที่ซิลิกาฟูม

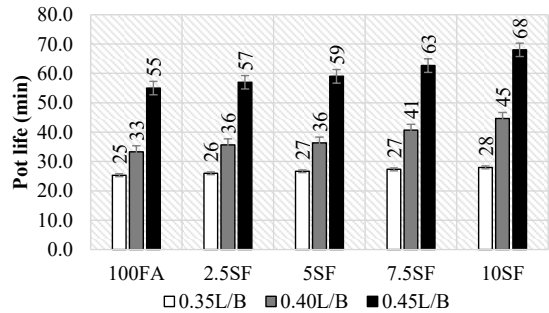
รูปที่ 1 แสดงค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างควบคุม 100FA เทียบกับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมสำหรับ 2.5SF, 5.0SF, 7.5SF และ 10SF ผลการทดสอบพบว่า การยุบตัวสัมพัทธ์ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 2.5 มีค่าประมาณร้อยละ 5.1–15.8 และค่าการยุบตัวสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อการแทนที่ซิลิกาฟูมมากกว่าร้อยละ 2.5 โดยมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 2.6–4.4, ร้อยละ 9.3–10 และร้อยละ 12.9–15.3 สำหรับส่วนผสม 5.0SF, 7.5SF และ 10SF ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่า ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมมีแนวโน้มลดลง โดยคิดเป็นร้อยละ 3.3, 3.9, 8.7 และ 15 สำหรับ 2.5SF, 5.0SF, 7.5SF และ 10SF ตามลำดับ



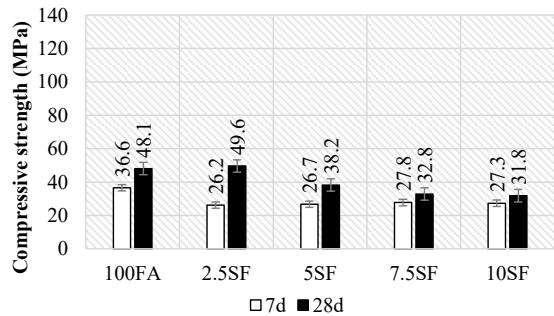
รูปที่ 1 ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

รูปที่ 2 แสดงระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างพบว่า ค่าระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์มีค่าระหว่าง 25–28, 33–44 และ 55–68 นาที สำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าระยะเวลาในการทำงาน (Pot Life) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในระบบลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของปริญญา และคณะ [12] รายงานไว้ว่าระยะเวลาในการทำงานช่วงต้นและการก่อตัวช่วงปลายของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์ลดลงตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ซิลิกาฟุ่มในเถ้าลอยหมายถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาภายในระบบของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่าง ส่งผลให้สามารถชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ ดังรายงานผลการวิจัยที่ผ่านมาของชุตานัก และคณะ [19]

รูปที่ 3 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มเมื่อแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานพบว่า การแทนที่ซิลิกาฟุ่มในเถ้าลอยร้อยละ 2.5 ช่วยปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างได้เล็กน้อยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างควบคุม (100FA) ประมาณ



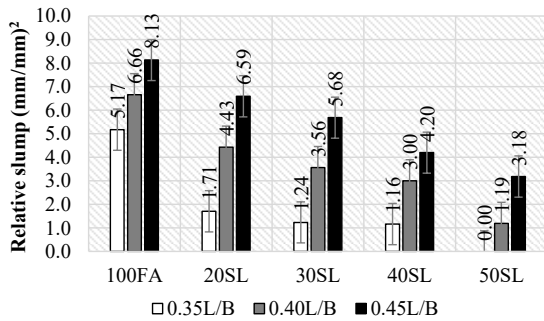
รูปที่ 2 ระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์



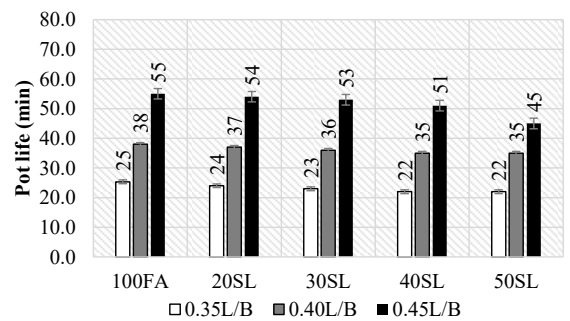
รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

ร้อยละ 3.3 หลังจากนั้นเมื่อการแทนที่ซิลิกาฟุ่มในเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 2.5 พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงประมาณร้อยละ 20.5, 31.7 และ 33.8 สำหรับส่วนผสมของ 5.0SF, 7.5SF และ 10SF ตามลำดับ

จากอิทธิพลการแทนที่ซิลิกาฟุ่มในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถสรุปได้ว่าการแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 2.5 ในทุกส่วนผสมมีค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ ระยะเวลาในการทำงานได้มีค่าที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเกณฑ์ในการพัฒนาเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่กระตุ้นด้วยต่างสมรรถนะสูง



รูปที่ 4 การยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์



รูปที่ 5 ระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

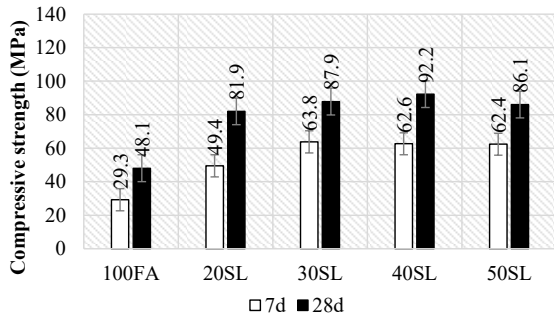
3.2 อิทธิพลของการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็ก

รูปที่ 4 แสดงค่าการยุบตัวสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างควบคุม 100FA กับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 (20SL, 30SL, 40SL, 50SL) พบว่าการยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 18.9–66.9 ร้อยละ 30.1–76.6 ร้อยละ 48.3–77.6 และร้อยละ 60.9–100 สำหรับการใส่เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ โดยการลดลงของค่าการยุบตัวของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็ก อาจเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าตะกรันเหล็กสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและ/หรืออะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ภายในระบบ [20] ส่งผลให้มีค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลง

รูปที่ 5 แสดงค่าระยะเวลาในการทำงานโดยเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างควบคุม 100FA กับ 20SL, 30SL, 40SL, 50SL พบว่า ค่าระยะเวลาในการทำงานมีค่าระหว่าง 22–25 นาทีสำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, ระหว่าง 35–38 นาที สำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และระหว่าง 45–55 นาทีสำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 จาก

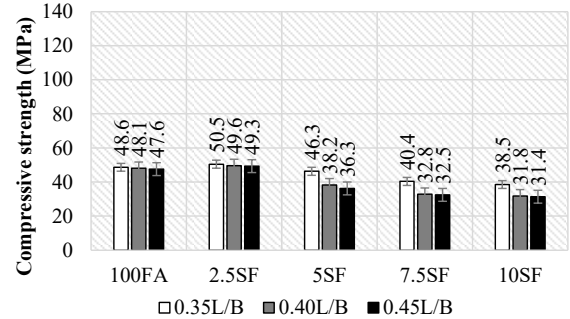
ผลการทดสอบสรุปได้ว่า ระยะเวลาในการทำงานมีค่าลดลงตามการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็ก อาจเนื่องจากการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กที่มากขึ้นช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ให้เร็วขึ้นตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานของปริญญา และคณะ [12] รายงานไว้ว่า ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและการก่อตัวระยะปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าตะกรันเหล็ก พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นโดยประมาณร้อยละ 69, 118, 114 และ 113 สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามลำดับ และประมาณร้อยละ 70.3, 82.7, 91.8 และ 79 สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 6 พบว่า การแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กในเถ้าลอยร้อยละ 50 ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กในเถ้าลอยร้อยละ 40 การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์

กระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์เนื่องจากการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กในเถ้าลอยเป็นการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ภายในระบบส่งผลทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาและสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้น [21] จึงทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของธนากร และคณะ [22] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงช่วยให้มีการพัฒนากำลังอัดดีขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วัน จะมีค่ามากขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ทำนองเดียวกับพฤติกรรมของระบบซีเมนต์ปกติ นอกจากนี้พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วันของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยผสมเถ้าตะกรันเหล็กจะมีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดจากอายุการบ่ม 7 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างควบคุม (100FA) อาจเนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาภายในระบบของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยผสมเถ้าตะกรันเหล็กและแนวโน้มของการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากกว่า [22]

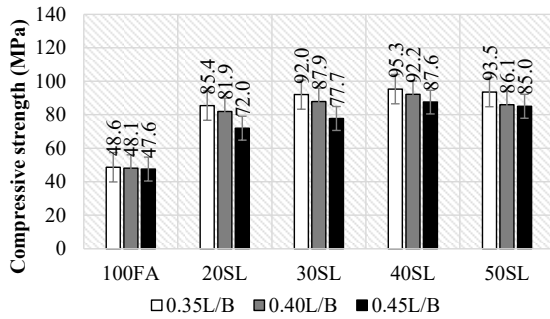


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้งที่ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 28 วัน

จากอิทธิพลของการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กในวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถสรุปได้ว่า การแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 20 ในทุกส่วนผสม มีค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ ระยะเวลาในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัดมีค่าที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่กระตุ้นด้วยต่างสมรรถนะสูงในอนาคต

3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

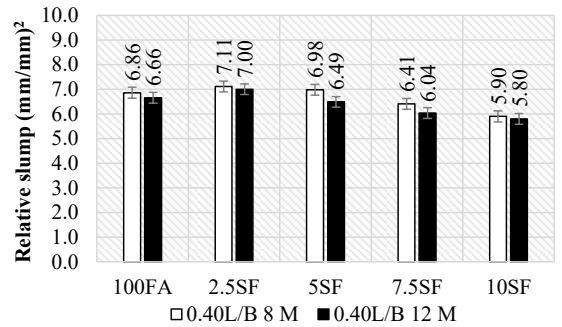
รูปที่ 7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้งเมื่อแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ้งร้อยละ 5 มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 0, 17.4 และ 21.7 สำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 8 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กเมื่อแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบของการแทนที่ซิลิกาฟุ้ง



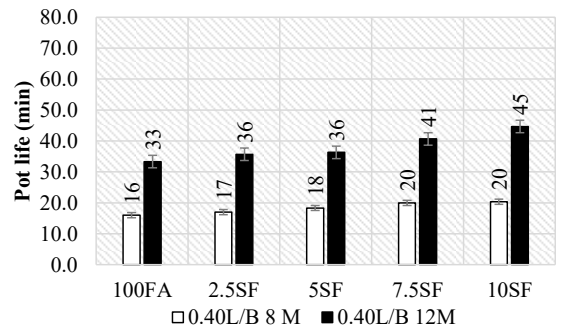
รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้ลรอยแทนที่ด้วยแก้ตะกรันเหล็กที่ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากแก้ลรอยแทนที่ด้วยแก้ตะกรันเหล็กร้อยละ 30 มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 0, 4.5 และ 15.5 สำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ผ่านมาของธีรวัฒน์ และคณะ [23] ที่ได้รายงานไว้ว่า กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของระบบซีเมนต์ นอกจากนี้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น หมายถึง ปริมาณของไฮเดียมไอออนส่วนเกินภายในระบบมากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง [23]

ส่วนปัจจัยของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานต่อการยุบตัวสัมพัทธ์ (รูปที่ 2 และ 5) และค่าระยะเวลาในการทำงาน (รูปที่ 3 และ 6) พบว่า อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงค่าการยุบตัวสัมพัทธ์และค่าระยะเวลาในการทำงาน ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์ทั้งการแทนที่ซิลิกาฟุ่มและแก้ตะกรันเหล็ก การที่ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของเหลวมากขึ้นภายในระบบวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างทำนองเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของระบบซีเมนต์



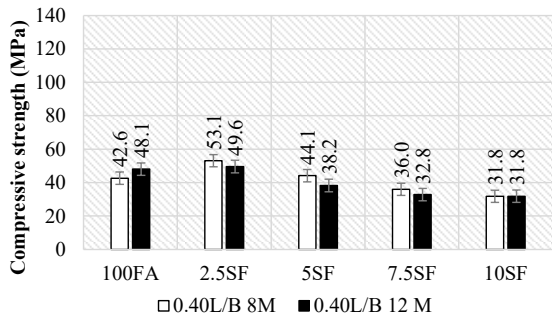
รูปที่ 9 การยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างแก้ลรอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



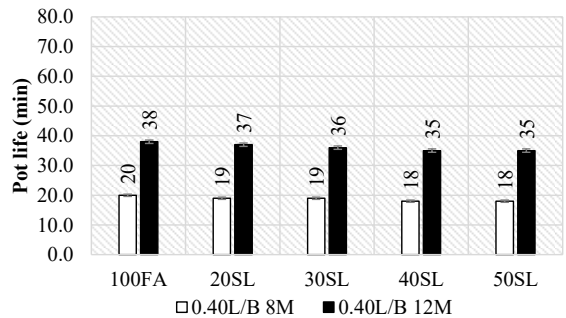
รูปที่ 10 ค่าระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้ลรอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

3.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์

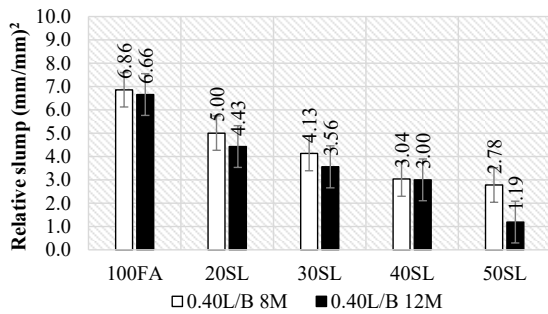
รูปที่ 9 และ 12 แสดงค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากแก้ลรอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มหรือแก้ตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นค่าการยุบตัวสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจะมีความหนืด



รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้วลอยแทนที่ด้วยแก้วตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



รูปที่ 13 ค่าระยะเวลาในการทำงานของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้วลอยแทนที่ด้วยแก้วตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



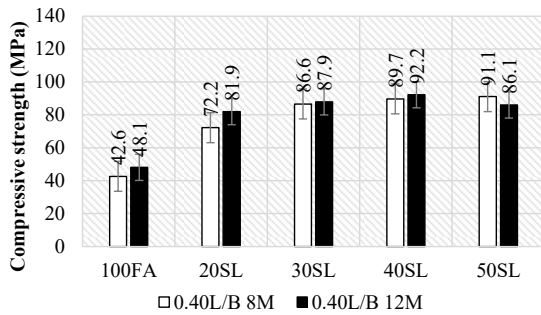
รูปที่ 12 การยุบตัวสัมพัทธ์ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้วลอยแทนที่ด้วยแก้วตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

มากขึ้นจึงส่งผลต่อการไหลตัวของมอร์ตาร์ ขณะที่รูปที่ 10 และ 13 แสดงค่า ค่าระยะเวลาในการทำงาน ของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างจากแก้วลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มหรือแก้วตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากแก้วลอยผสมซิลิกาฟุ่มหรือแก้วตะกรันเหล็กได้ ซึ่งสารละลาย NaOH ในระบบวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมีหน้าที่ชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นออก

มาทำปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาในการชะละลายมากขึ้นตามไปด้วย [24]

รูปที่ 11 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากแก้วลอยแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 8-12 โมลาร์ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงความสามารถในการชะละลายซิลิกาจากซิลิกาฟุ่มได้มากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณซิลิกาส่วนเกินในระบบ ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยลง พฤติกรรมการลดลงของกำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างที่มีการใช้ซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมสอดคล้องกับรายงานวิจัยของปริญญ และคณะ [15]

ขณะที่รูปที่ 14 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุ้นด้วยต่างมอร์ตาร์จากแก้วลอยแทนที่ด้วยแก้วตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่



รูปที่ 14 กำลังรับอัดของวัสดุเชื่อมประสานกระตุนด้วยต่างจากเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 50 ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อพิจารณาเปรียบกับการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 40 เมื่อพิจารณาปัจจัยความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ต่ำกว่า จะมีความสามารถละลายแคลเซียมออกไซด์ได้มากกว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงกว่า ทำนองเดียวกัน ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงกว่าจะมีความสามารถละลายซิลิกาและอะลูมินาได้มากกว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ต่ำกว่า ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ จึงมีโอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและ/หรืออะลูมินากับแคลเซียมออกไซด์และเกิดเป็นผลผลิตภายในระบบมากขึ้น [25] เมื่อพิจารณาการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ จะมีการละลายซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นออกมาทำปฏิกิริยาได้มากและเกิดเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) และอยู่ร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) [25] ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามปริมาณการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กจนถึงร้อยละ 40 ขณะที่การแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 50 กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเนื่องด้วยการละลายแคลเซียมออกไซด์ถูกขัดขวางและอีกทั้งส่วนเกินของความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์

ไอออนเป็นสาเหตุทำให้มีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของอะลูมิโนซิลิเกตเจลส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง [26]

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ในวัสดุเชื่อมประสานกระตุนด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่อแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ขณะที่การใช้เถ้าตะกรันเหล็กแทนที่ในร้อยละ 50 ส่งผลให้ค่าการยุบตัวสัมพัทธ์ มีค่าลดลงถึงร้อยละ 100 เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

2) ค่าระยะเวลาในการทำงาน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่วัสดุเชื่อมประสานกระตุนด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยซิลิกาฟุ่ม ขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าตะกรันเหล็กส่งผลให้ระยะเวลาในการทำงานมีค่าลดลงเล็กน้อย

3) ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 เมื่อแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 2.5 หลังจากนั้นแนวโน้มลดลง โดยที่ปริมาณการแทนที่ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 พบการลดลงร้อยละ 33.8 ขณะที่การแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดี เมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กที่เพิ่มขึ้นโดยตลอด เมื่อแทนที่เถ้าตะกรันเหล็กร้อยละ 40 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 91.8

4) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ค่า การยุบตัวสัมพัทธ์ มีค่าลดลง ค่าระยะเวลาในการทำงาน มีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นทั้งในการแทนที่วัสดุเชื่อมประสานกระตุนด้วยต่างจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยซิลิกาฟุ่ม และเถ้าตะกรันเหล็ก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ รหัสทุนสัญญาเลขที่ KMUTNB-PHD-62-06



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, 2007, pp. 447-496.
- [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] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymeric systems, terminology," in *Proceedings of Geopolymer Second International Conference, Saint-Quentin*, 1999, pp. 9-39.
- [4] L.K. Turner and F.G. Collins, "Carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2\text{-e}$) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 125-130, 2013.
- [5] 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.
- [6] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 658-670, 2005.
- [7] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1224-1232, 2005.
- [8] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, and M. W. Grutzeck, "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 7, pp. 997-1004, 1999.
- [9] 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*, vol. 13, no. 1, 2020.
- [10] A. L. I. Allahverdi, E. N. Kani, and M. Yazdanipour, "Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement," *Directory of Open Access Journals*, vol. 55, no. 1, pp. 68-78, 2011.
- [11] P. Chindaprasirt, P. Paisitsrisawat, and U. Rattanasak, "Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-Activated composite," *Advanced Powder Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 1087-1093, 2014.
- [12] P. Chindaprasirt, T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwand, S. Horpibulsuke, A. Poowancumf, 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, 2018.
- [13] 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.
- [14] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Po26olan for Use in Concrete*, ASTM C618-15, 2015.

- [15] P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ 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.
- [16] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM C1437-20, 2020.
- [17] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-13, 2013.
- [18] *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-19, 2019.
- [19] C. Detphan, S. Detphan, K. Chompoovong, T. Phoongernkham, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt, "Mechanical properties of high-calcium fly ash geopolymer with nano-SiO₂ particle sizes," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 36–46, 2021 (in Thai).
- [20] P. Nath and P. K. Sarker, "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition," *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 163–171, 2014.
- [21] T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Pangdaeng, and T. Sinsiri, "Properties of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive," *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 2, pp. 214–220, 2013.
- [22] T. Phoo-Ngernkham, Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap, and P. Chindapasirt, "Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 2202–2210, 2017.
- [23] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindapasirt, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Computers and Concrete*, vol. 9, no. 6, pp. 427–437, 2012.
- [24] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, and P. Chindapasirt, "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.
- [25] C. Li, H. Sun, and L. Li, "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 9, pp. 1341–1349, 2010.
- [26] J. W. Phair, J. S. J. V. Deventer, and J. D. Smith, "Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 8, pp. 2925–2934, 2000.