บทความวิจัย

การปรับสภาพความเป็นกรดโดยใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดผสมเถ้าถ่านหิน

อมรชัย ใจยงค์ เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9791 5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.003
รับเมื่อ 2 เมษายน 2569 แก้ไขเมื่อ 28 เมษายน 2569 ตอบรับเมื่อ 25 มิถุนายน 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 12 พฤศจิกายน 2569
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับสภาพความเป็นกรดและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดร่วมกับเถ้าถ่านหิน โดยกำหนดอัตราส่วนเถ้าแกลบดำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 35:65 โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารกระตุ้นที่ความเข้มข้น 10 12 14 และ 16 โมลาร์ ทำการบ่มตัวอย่างและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 14 28 และ 56 วัน ทดสอบความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดโดยการแช่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 3 ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและความเข้มข้นของ NaOH โดยส่วนผสมที่ใช้ NaOH 14 โมลาร์ให้กำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุ นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถเพิ่มค่า pH ของสารละลายกรดได้อย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้นและคงประสิทธิภาพการปรับสภาพความเป็นกรดได้ต่อเนื่องในการทดสอบหลายรอบ โดยส่วนผสมที่ใช้ NaOH 14 โมลาร์ให้ผลดีที่สุด ทั้งนี้ ความเข้มข้น NaOH ที่สูงเกินไป (16 โมลาร์) อาจลดประสิทธิภาพการละลายของอะลูมิโนซิลิเกตและความสมบูรณ์ของกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน ส่งผลให้สมบัติด้านกำลังอัดและการปรับสภาพความเป็นกรดลดลง การศึกษาครั้งนี้พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดระยะยาวได้ดีกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ทั่วไปอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: กำลังอัด จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ การปรับสภาพความเป็นกรด เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบดำไม่ผ่านการบด

การอ้างอิงบทความ: อมรชัย ใจยงค์, เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, "การปรับสภาพความเป็นกรดโดยใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดผสมเถ้าถ่านหิน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 1–14, ม.ค.–มี.ค. 2570. เลขที่บทความ 271-038382, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.003.

Research Article

Neutralization Performance by Using Geopolymer Mortars Incorporating Unground Black Rice Husk Ash and Fly Ash

Amornchai Jaiyong, Tieng Cheewaket and Wichian Chalee*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9791 5171, E-mail: wichian@buu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.003

Received 2 April 2026; Revised 28 May 2026; Accepted 25 June 2026; Published online: 12 November 2026
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed to investigate the acid neutralization performance and compressive strength of geopolymer mortars incorporating unground black rice husk ash and fly ash at a ratio of 35:65 by weight. Sodium hydroxide (NaOH) solutions with concentrations of 10, 12, 14, and 16 M were used as alkaline activators. The specimens were cured and tested for compressive strength at the ages of 3, 14, 28, and 56 days. The acid neutralization performance was evaluated by immersing the geopolymer mortar specimens in a hydrochloric acid (HCl) solution with an initial pH of approximately 3. The results showed that the compressive strength of the geopolymer mortars increased with curing age and NaOH concentration, with the mixture activated by 14 M NaOH exhibiting the highest compressive strength at all curing ages. In addition, the geopolymer mortars rapidly increased the pH of the acidic solution during the initial stage and maintained effective acid neutralization performance throughout repeated immersion cycles, with the 14 M NaOH mixture providing the best overall performance. However, an excessively high NaOH concentration (16 M) may reduce aluminosilicate dissolution and hinder the geopolymerization process, resulting in decreased compressive strength and acid neutralization performance. The findings of this study indicate that geopolymer mortars exhibit significantly superior long-term acid neutralization performance compared with conventional cement mortars.

Keywords: Compressive Strength, Geopolymer Mortar, Acid Neutralization, Fly Ash, Unground Black Rice Husk Ash

Please cite this article as: A. Jaiyong, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Neutralization performance by using geopolymer mortars incorporating unground black rice husk ash and fly ash," *The Journal of KMUTNB*, vol. 37, no. 1, pp. 1–14, Jan.–Mar. 2027 (in Thai), Art. no. 271-038382, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.003.

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะวัสดุที่สามารถให้ความแข็งแรงเชิงกล และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาวัสดุประสานจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมจึงได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งได้อีกด้วย [1]–[3] จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต เช่น เถ้าถ่านหินหรือเถ้าชีวมวล โดยอาศัยสารละลายด่างเข้มข้นเป็นตัวกระตุ้น กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยการละลายของซิลิกา (Si) และอะลูมินาในสภาวะด่าง และการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตสามมิติที่มีความเป็นด่างสูง โครงสร้างดังกล่าวสามารถปลดปล่อยไอออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) และไอออนโลหะด่าง เช่น Na^+ และ K^+ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายกรด ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่า pH และลดความเป็นกรดของน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5]

เถ้าแกลบดำเป็นวัสดุชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา [6] และมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบดำที่ได้จากแหล่งผลิตโดยตรงมักมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะสม เช่น อนุภาคหยาบ โครงสร้างพรุน และมีการดูดน้ำสูง ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่ำ จึงมักต้องผ่านกระบวนการบดให้ละเอียดก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานจริง [7]–[9] อย่างไรก็ตามลักษณะความพรุนของเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบด อาจเป็นข้อได้เปรียบในด้านการใช้งานที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุกับสารละลาย และเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำได้

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีมีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินาสูงสามารถเกิดปฏิกิริยาในสภาวะด่างและสร้างโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นและเสถียรได้ การนำเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดมาใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหิน และกระตุ้นด้วยสารละลายด่าง จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่จำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น แต่ยังสามารถพัฒนาโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้ โดยเถ้าถ่านหินมีบทบาทในการเสริมการเกิดโครงสร้างเจลที่มีความเสถียร ขณะที่เถ้าแกลบดำช่วยเพิ่มความพรุนของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติในการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมได้

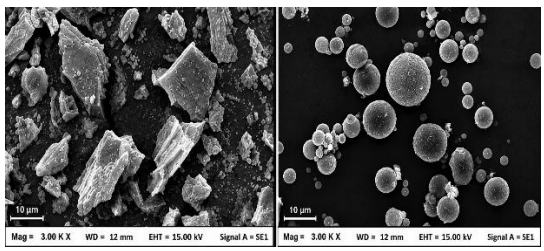
นอกจากสมบัติเชิงกลแล้วจีโอพอลิเมอร์ยังมีศักยภาพในการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำเสีย กลไกสำคัญประกอบด้วยการปลดปล่อยไอออนด่างจากจีโอพอลิเมอร์เจล การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างผิววัสดุกับสารละลาย และการแพร่ของสารละลายในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้สามารถเพิ่มค่า pH ของน้ำที่มีความเป็นกรดได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และสามารถคงสภาพความเป็นด่างได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว นอกจากนี้โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่มีเสถียรภาพยังช่วยให้วัสดุสามารถคงประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำหลายรอบได้ดีกว่าวัสดุประสานทั่วไป ซึ่งมักสูญเสียความสามารถจากการชะล้างของสารประกอบด่างเมื่อใช้งานในสภาวะกรด [4], [5], [10]

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดร่วมกับเถ้าถ่านหินสำหรับการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำมากกว่าสมบัติเชิงกล โดยเลือกใช้อัตราส่วนเถ้าแกลบดำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 35:65 โดยน้ำหนัก โดยอ้างอิงจากผลการทดลองเบื้องต้นร่วมกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินในสัดส่วนสูงขึ้นช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันได้ดีขึ้น ขณะที่การเพิ่มเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดในปริมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ไม่ลดสมบัติเชิงกลมากเกินไป ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น วัสดุฉาบผิวบ่อพักน้ำเสีย หรือโครงสร้างบ่อพักตื้นสำหรับปรับสภาพความเป็นกรดในขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดในขั้นตอนถัดไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การสร้างชุดข้อมูล

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดและเถ้าถ่านหิน โดยกำหนดอัตราส่วนเถ้าแกลบดำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 35:65 โดยน้ำหนัก เถ้าแกลบดำมีลักษณะเป็นอนุภาคหยาบ ผิวไม่สม่ำเสมอ และมีความพรุนสูง โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.07 และมีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 48.1 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าแกลบจากภาพถ่าย SEM ตามรูปที่ 1 (ก) พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมมุมและมีผิวขรุขระ ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณของซิลิกาออกไซด์สูงถึงร้อยละ 90 ถือเป็นสมบัติทางเคมีที่ดีในการนำไปใช้งาน



(ก) เถ้าแกลบดำ (ข) เถ้าถ่านหิน

รูปที่ 1 ภาพถ่ายกำลังสูงของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบด

ในเชิงวิศวกรรม ไม่ว่าจะใช้สำหรับทำวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์หรือใช้สำหรับเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของเถ้าแกลบดำ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่เผาได้สมบูรณ์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและอยู่ในรูปอสัณฐาน ดังนั้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นสารปอซโซลาน ส่วนที่เหลือจะเป็นออกไซด์ของธาตุอื่น และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition; LOI) เท่ากับร้อยละ 4.71 ซึ่งถือว่าไม่สูงมากและเหมาะสมในการนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม

เถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และมีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก พิจารณาภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหิน ตามรูปที่ 1 (ข) พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน ผิวค่อนข้างเรียบ และมีขนาดคละกัน ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพที่ดีของเถ้าถ่านหินที่ใช้เป็นวัสดุประสานในทางวิศวกรรม สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_2 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 ซึ่งไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 จึงจัดอยู่ในกลุ่มเถ้าถ่านหินชนิด Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [11] ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์

สารกระตุ้นด่างที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปเกล็ดนำมาละลายในน้ำกลั่นเพื่อเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 12 14 และ 16 โมลาร์ และปล่อยให้เย็นลงในสภาวะอุณหภูมิห้องก่อนนำไปใช้ผสม ส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 36 และมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ SiO_2/Na_2O ประมาณ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เถ้าถ่านหิน (F)	เถ้าแกลบดำ (R)
Silicon Dioxide (SiO_2)	34.10	90.0
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	19.90	0.50
Iron Oxide (Fe_2O_3)	16.91	2.00
Calcium Oxide (CaO)	18.75	0.50
Magnesium Oxide (MgO)	-	0.20
Potassium Oxide (K_2O)	0.69	-
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.38	1.50
Loss On Ignition (LOI)	0.11	4.71
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	70.91	92.5

2.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.70 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.72 และโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.75

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

การศึกษานี้เตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุตั้งต้น โดยใช้โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเถ้าแกลบดำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 35:65 และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เป็น 10 12 14 และ 16 โมลาร์ โดยคงที่อัตราส่วน Si/Al และกำหนดอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 2.0 รวมทั้งอัตราส่วนสารละลายด่างต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2:81 โดยน้ำหนัก ส่วนมวลรวมใช้ทรายละเอียดแม่น้ำ อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพื่อเป็นส่วนผสมเปรียบเทียบ สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ (กรัม)					
	เถ้าแกลบดำ (R)	เถ้าถ่านหิน (F)	ทราย	สารละลาย NaOH	Na_2SiO_3	NaOH (M)
R_10-M	290.5	5395	2283	323	642	10
R_12-M	290.5	5395	2283	323	642	12
R_14-M	290.5	5395	2283	323	642	14
R_16-M	290.5	5395	2283	323	642	16

2.3.2 การทดสอบ

หล่อตัวอย่างจีโอพอลิมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 (ก) ตามส่วนผสมในตารางที่ 2 บ่มตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2 (ข)) และบ่มในอากาศต่อที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 14 28 และ 56 วัน โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [12]



(ก) การหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์



(ข) บ่มตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



(ค) การวัดค่า pH ของสารละลาย HCl หลังแช่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

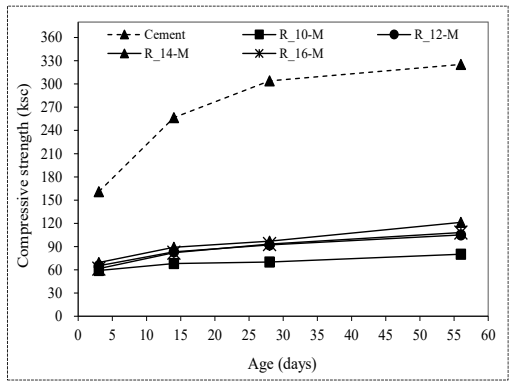
การทดสอบความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลาย HCl ที่เตรียมให้มีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 3 เพื่อจำลองสภาวะน้ำเสียที่มีความเป็นกรด โดยแบ่งเป็นการทดสอบระยะสั้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพการปรับสภาพความเป็นกรดในระยะสั้น ใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จำนวน 1 ก้อน แช่ในสารละลายกรด HCl ปริมาตร 5 10 และ 15 ลิตร โดยวัดค่า pH ของสารละลายที่เวลา 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2 (ค) ทั้งนี้ ในแต่ละช่วงเวลาทำการวัดค่า pH เฉลี่ย 5 ครั้ง นอกจากนั้นได้ทำการทดสอบระยะยาวต่อเนื่อง เพื่อประเมินการใช้งานซ้ำ โดยวัดค่า pH หลังแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปลี่ยนสารละลายกรดใหม่และทำซ้ำต่อเนื่อง 15 รอบ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

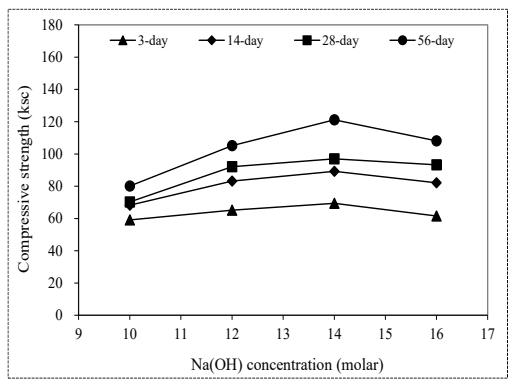
3.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในอากาศ โดยมีอัตราการเพิ่มสูงในช่วง 14 วันแรก และอัตราการเพิ่มลดลงหลังจากนั้น ทั้งนี้ เป็นผลจากวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินมีการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงต้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น เมื่อพิจารณากลไกการให้กำลังของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังกล่าวพบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่พบในการศึกษาที่ผ่านมา [5], [13] การศึกษาครั้งนี้ใช้ปริมาณของเถ้าถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจึงส่งผลให้มีอิทธิพลต่อกำลังอัดมากกว่าเถ้าแกลบดำ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์กับมอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ไฮโดรลิกพบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ค่อนข้างมาก

แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินยังไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับงานโครงสร้าง เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ ดังรูปที่ 4 พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้นไม่เกิน 14 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงถึง 16 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 10 12 14 และ 16 โมลาร์ มีกำลังอัด ที่อายุ 56 วัน เท่ากับ 80.1 105.1 121.2 และ 108.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH ช่วยส่งผลให้เกิดการชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบดำที่มากขึ้นและทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของซิลิเกตและอลูมิเนียมในเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบทำให้เกิดเจลที่แข็งแรงมากขึ้น [14] อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้น NaOH สูงเกิน 14 โมลาร์ พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากการก่อตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง [4] ดังนั้นการเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายด่างที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญต่อการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความสมบูรณ์และสามารถรับแรงอัดได้สูง นอกจากนี้ความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไปยังส่งผลให้การละลายของซิลิกาและอะลูมิเนียม (Al) จากเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบดำลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดและความหนาแน่นของสารละลาย NaOH ที่เข้มข้นทำให้กระบวนการชะละลายไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่ [15]–[16]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาในการบ่มของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน

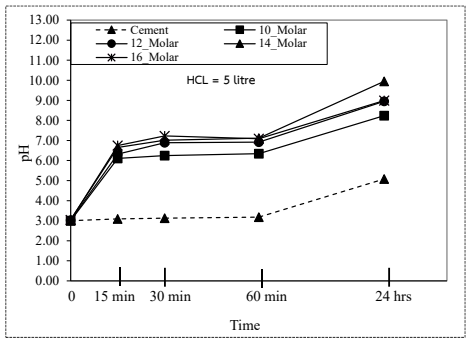
ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน

ส่วนผสม	กำลังอัด (กก/ซม^2)			
	3 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
R_10-M	59.1	68.2	70.2	80.1
R_12-M	65.2	83.2	92.1	105.1
R_14-M	69.4	89.2	97.0	121.2
R_16-M	61.6	82.1	93.3	108.1
Cement	161.0	256.6	304.0	325.2

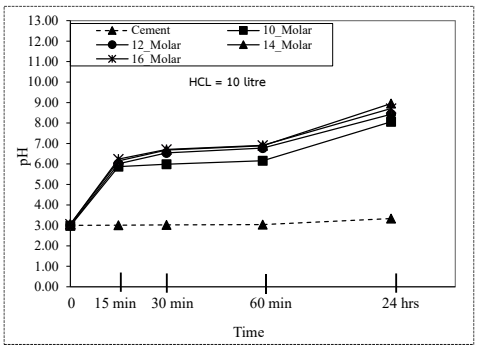
3.2 การปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำโดยใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำ

3.2.1 การปรับสภาพความเป็นกรดในระยะสั้น

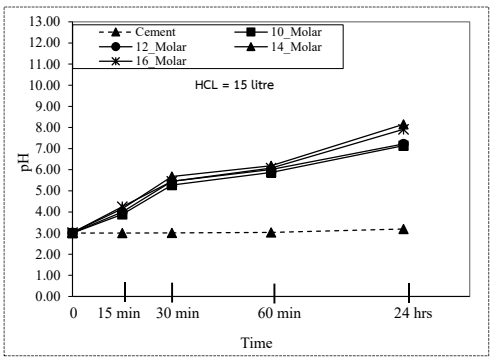
เมื่อพิจารณาการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหิน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลาย HCl เข้มข้นเริ่มต้นที่มี pH เท่ากับ 3 หลังจากแช่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จำนวน 1 ก้อน ต่อปริมาตรของสารละลาย HCl ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5 10 และ 15 ลิตร ที่ระยะเวลาหลังแช่ถึง 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5 (ก)–(ค) ตามลำดับ ผลการศึกษาในภาพรวมพบว่าวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำ ให้ผลในการลดความเป็นกรดของสารละลาย HCl ได้ดีกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอย่างชัดเจน โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำมีผลต่อการเพิ่มค่า pH ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในช่วง 15 นาทีแรกค่อนข้างสูง จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาแช่นานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากปริมาณของสารละลายเบสที่อยู่ในจีโอพอลิเมอร์ในช่วงเริ่มต้นมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง และสามารถปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดี หลังจากนั้นปริมาณของสารละลายดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง เพราะถูกนำไปใช้ในการปรับสภาพกรด จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรดของสารละลาย HCl ลดลง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาแช่มอร์ต้าร์ในสารละลายกรดกับค่า pH ของสารละลาย HCl ที่มีความชันลดลงเมื่อเวลาแช่นานขึ้น และมีแนวโน้มเหมือนกันในทั้ง 3 อัตราส่วนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อปริมาตรของสารละลาย HCl (5 10 และ 15 ลิตร)



(ก) จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อนต่อ HCl 5 ลิตร



(ข) จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อนต่อ HCl 10 ลิตร



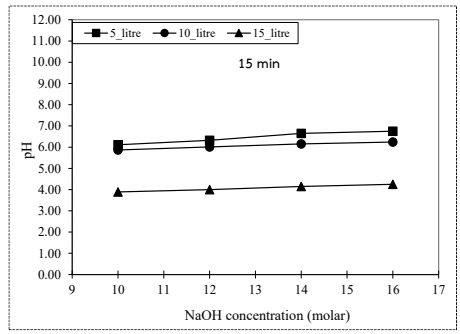
(ค) จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อนต่อ HCl 15 ลิตร

รูปที่ 5 ผลของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ที่มีค่า pH = 3

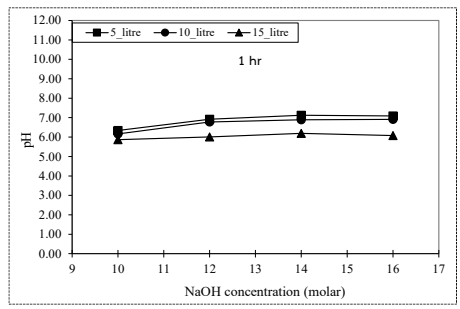
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ดังรูปที่ 6 พบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความ

เข้มข้นสูงขึ้นส่งผลต่อการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ได้ดีขึ้น และลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงกว่า 14 โมลาร์ ในช่วงต้นของการทดสอบหลังแช่ตัวอย่าง 15 นาที ดังรูปที่ 6 (ก) พบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นชัดเจนตามความเข้มข้นของ NaOH โดยจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ NaOH เข้มข้น 16 โมลาร์ ให้ค่า pH สูงที่สุด แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ใช้ NaOH เท่ากับ 14 โมลาร์ ให้ค่า pH ใกล้กับกลุ่ม 16 โมลาร์ ดังรูปที่ 6 (ข) และมีแนวโน้มปรับค่า pH สูงขึ้นมากกว่ากลุ่มที่ใช้ NaOH เท่ากับ 16 โมลาร์ เมื่ออายุแช่ถึง 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 6 (ค) พบว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลายในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากมีปริมาณไอออนของด่าง (OH^-) และไอออนโซเดียม (Na^+) ที่สามารถปล่อยออกจากโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ได้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายกรดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในระยะเวลาเริ่มต้น [17]

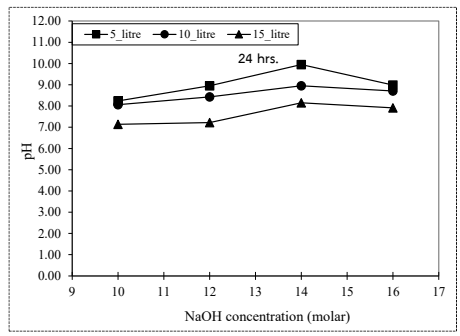
อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาการแช่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสารละลาย HCl นานขึ้นพบว่ากลุ่มที่ใช้ NaOH ความเข้มข้น 14 โมลาร์ มีแนวโน้มให้ค่า pH สูงกว่ากลุ่ม 16 โมลาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายด่างที่สูงเกินไปอาจไม่เหมาะสมต่อการปรับสภาพความเป็นกรด ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากการเกิดโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่สมบูรณ์ หรือเกิดการก่อตัวของสารประกอบบางชนิด เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งรบกวนกระบวนการพอลิเมอไรเซชันส่งผลให้โครงสร้างมีความไม่ต่อเนื่อง และเกิดการชะล้างของไอออนด่างได้ง่าย [14] ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลาย NaOH



(ก) แช่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อน ในสารละลาย HCl เป็นเวลา 15 นาที



(ข) แช่จีโอโพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อน ในสารละลาย HCl เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



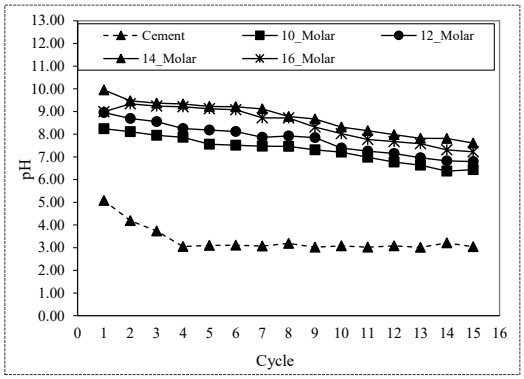
(ค) แช่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อน ในสารละลาย HCl เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินต่อการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ที่มีค่า pH = 3

ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการปรับสภาพความเป็นกรดในระยะยาว โดยจากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 14 โมลาร์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถให้ทั้งประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดในช่วงเริ่มต้น และการคงประสิทธิภาพในระยะยาวได้อย่างดี เมื่อพิจารณาปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อปริมาณของสารละลาย HCl ที่มีผลต่อการปรับสภาพความเป็นกรดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ (รูปที่ 6) พบว่าประสิทธิภาพของการปรับสภาพความเป็นกรดลดลง เมื่อใช้ในสารละลายกรดที่มีปริมาตรมากขึ้น ทั้งนี้ เนื่องมาจากปริมาณของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ลดลง (พื้นผิวของมอร์ต้าร์ลดลง) ต่อปริมาณสารละลายกรดที่มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวสัมผัสของจีโอพอลิเมอร์กับไอออน H^+ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่และทั่วถึง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ซิลิเกต และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติในการลดความเป็นกรดของสารละลายลดลงได้ จากการศึกษาที่ผ่านมา [5], [14] พบว่านอกจากพื้นผิวสัมผัสภายนอกของวัสดุจีโอพอลิเมอร์กับสารละลายกรดที่มีผลชัดเจนต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพกรดของน้ำแล้ว ความพรุนของเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ก็ส่งผลชัดเจนต่อการปรับสภาพความเป็นกรด โดยการใช้จีโอพอลิเมอร์ในงานคอนกรีตพรุนมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำเสียลงได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ในคอนกรีตทั่วไป

3.2.2 การทดสอบซ้ำแบบหลายรอบ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และจำนวนรอบการทดสอบ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ 1 ก้อน ต่อสารละลาย HCl 5 ลิตร ดังรูปที่ 7 พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินผสมเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดสามารถเพิ่มค่า pH ของสารละลายกรดได้อย่างดีในรอบแรก โดยค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปล่อยไอออนด่างจากจีโอพอลิเมอร์ในระยะเริ่มต้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในรอบถัดไปพบว่าค่า pH หลังการแช่มีแนวโน้มลดลงในอัตราที่ต่ำตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแม้การปรับสภาพกรดมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนรอบ แต่จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ยังคงสามารถเพิ่มค่า pH ของสารละลายกรดได้อย่างต่อเนื่องในทุกรอบการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการคงสภาพความเป็นด่างของวัสดุในระยะยาว แนวโน้มดังกล่าวเกิดจากการปล่อยไอออนด่างจากโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งในรอบแรกจะมีการปลดปล่อยไอออน OH^- และไอออนด่าง เช่น Na^+ ในปริมาณสูง ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [4], [17] แต่เมื่อใช้งานซ้ำ ปริมาณไอออนที่สามารถปลดปล่อยได้จะลดลง เนื่องจากเกิดการชะล้างขององค์ประกอบที่ละลายได้ออกจากจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตของจีโอพอลิเมอร์ยังคงมีความเสถียร และสามารถปล่อยไอออนด่างได้ในระดับหนึ่งในรอบถัด ๆ ไป ทำให้วัสดุยังคงมีความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดได้ต่อเนื่อง [5] แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการชะล้างของไอออน (Ion Leaching) อาจมีผลต่อความคงทนการนำวัสดุกลับมาใช้ซ้ำ และการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ซึ่งควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม นอกจากนี้ลักษณะความพรุนของเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบด มีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและอาจทำให้การแพร่ของสารละลายเข้าสู่ภายในโครงสร้างวัสดุ ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับจำนวนรอบการทดสอบ

ไอออนได้ นอกจากนั้นพบว่าความสามารถในการปรับสภาพกรดของจีโอพอลิเมอร์ในทุกความเข้มข้นของ NaOH ใกล้เคียงกันโดยเฉพาะเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 14 โมลาร์ ซึ่งให้ค่า pH สูงกว่ากลุ่มอื่นและต่อเนื่องในรอบถัดไป ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากการเกิดโครงสร้างเจลที่มีความหนาแน่นและต่อเนื่อง ส่งผลให้การปล่อยไอออนด่างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ความเข้มข้น 10 และ 12 โมลาร์ ให้ผลในการลดความเป็นกรดของ HCl ต่ำกว่ากลุ่มที่ความเข้มข้นของ NaOH สูง เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์และโครงสร้างมีความพรุนสูง ทำให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้งานซ้ำ ส่วนความเข้มข้น 16 โมลาร์ แม้ให้ค่า pH สูงในระยะแรกแต่โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดการชะล้างของด่างได้ง่ายในระยะยาว จึงทำให้การปรับสภาพกรดลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ NaOH เข้มข้น 14 โมลาร์ ชัดเจนขึ้นในรอบหลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อความสามารถในการปรับสภาพกรดของจีโอพอลิเมอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก พบว่ามอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์มีความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์อย่างชัดเจน โดยค่า pH ของสารละลายหลังการแช่ 15 รอบ อยู่ในช่วงประมาณ 3–4 ตลอดการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ไม่สามารถปรับสภาพความเป็นกรดในระยะยาวได้ ซึ่งเกิดจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของซีเมนต์ ถึงแม้ว่าจะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีสภาพเป็นด่าง แต่สารดังกล่าวสามารถถูกกรดทำปฏิกิริยาและชะล้างออกได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดลดลงอย่างรวดเร็วได้

การศึกษาครั้งนี้พบว่ากำลังอัดและความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชัน โดยส่วนผสมที่ใช้ NaOH 14 โมลาร์ ให้ผลดีที่สุดทั้งด้านกำลังอัด และการปรับสภาพกรดสะท้อนถึงโครงสร้างเจลที่มีความต่อเนื่อง สามารถปลดปล่อยไอออนด่างได้ดี อย่างไรก็ตามความพรุนของเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดแม้อาจลดกำลังอัดแต่ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสและการแพร่ของสารละลาย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปรับสภาพความเป็นกรด

การใช้เถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ลดลง เนื่องจากลักษณะอนุภาคที่หยาบและมีความพรุนสูงก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นลดความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ และชะลอกระบวนการละลายของซิลิกา และอะลูมินาที่จำเป็นต่อการเกิดจีโอพอลิเมอไรเซชัน อย่างไรก็ตาม การผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินซึ่งมีอนุภาคละเอียด และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงช่วยเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุประสานให้มีความเชื่อมแน่นมีความแข็งแรง และลด

พรุนในเนื้อวัสดุได้ดีขึ้นทำให้สามารถลดข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกลของเถ้าแกลบดำได้บางส่วน ขณะเดียวกันความพรุนของเถ้าแกลบดำที่ไม่ผ่านการบดอาจเป็นข้อได้เปรียบต่อการใช้งานด้านการปรับสภาพความเป็นกรด เนื่องจากช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสและการแพร่ของสารละลายเข้าสู่โครงสร้างวัสดุ ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาจากวัสดุผสมดังกล่าวยังคงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อมได้ แม้จะมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ทั่วไปก็ตาม

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าแกลบดำผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่เกิน 14 โมลาร์ โดยให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน เท่ากับ 121.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ความเข้มข้น 14 โมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเป็น 16 โมลาร์

การปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถเพิ่มค่า pH ได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และประสิทธิภาพลดลงเมื่อปริมาตรสารละลายกรดต่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของ NaOH ที่ 14 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรดดีที่สุด นอกจากนี้การทดสอบแบบหลายรอบพบว่าประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามจำนวนรอบของการใช้งาน แต่ยังคงสามารถปรับสภาพความเป็นกรดได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ซึ่งให้ผลดีที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ธรรมดา พบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลาย HCl ได้ดีกว่าอย่างชัดเจน โดยมอร์ต้าร์ซีเมนต์ไม่สามารถเพิ่มค่า pH ได้ ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จึงมีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานปรับสภาพน้ำเสีย โดยเหมาะสำหรับงานที่ไม่เน้นการรับแรงเชิงกลสูง เช่น งานฉาบพื้นผิวที่สัมผัสกับน้ำเสียที่เป็นกรด หรือบ่อพักน้ำเสียเบื้องต้น นอกจากนั้นควรมีการศึกษาต่อเนื่องเกี่ยวกับการชะล้างของไอออน ความคงทนระยะยาว และการใช้งานซ้ำของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อประเมินความเหมาะสมต่อการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567” เลขที่สัญญา ววน. 73/2567

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Cheewaket and W. Chalee, “Improvement of compressive strength of mortar from unground palm oil fuel ash,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 1, pp. 1–10, Jan.–Mar. 2026 (in Thai), Art. no. 261-018036, doi: 10.14416/j.kmutnb.2025.12.002.

[2] T. Pitikhunpongsuk and S. Prawerathang, “Potential uses of cement-mixed sugar cane bagasse ash in substitution materials for road construction works,” *Engineering Journal of Research and Development*,

vol. 31, no. 2, pp. 93–103, Apr.–Jun. 2020 (in Thai).

[3] P. Sornchomkaew, D. Intarabut, and P. Pongsopha, "Improvement of lateritic soil with oil palm ash, dust stone, and cement to develop road surface materials," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–12, Oct.–Dec. 2025 (in Thai), Art. no. 254-027632, doi: 10.14416/j.kmutnb.2024.11.003.

[4] W. Chalee, T. Cheewaket, and R. Somna, "Neutralisation of acidic wastewater using geopolymer binders from palm oil fuel ash and fly ash," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 19, no. 1, 2026, doi: 10.1080/19397038.2026.2627685.

[5] P. Chindaprasirt, P. Jitsangiam, W. Chalee, and U. Rattanasak, "Case study of the application of pervious fly ash geopolymer concrete for neutralization of acidic wastewater," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, 2021, Art. no. e00770, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00770.

[6] B. Nanda, J. Mishra, and S. K. Patro, "Synthesis of rice husk ash based alkaline activators for geopolymer binder systems: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 91, 2024, Art. no. 109694, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109694.

[7] K. A. Buyondo, P. W. Olupot, J. B. Kirabira, and A. A. Yusuf, "Optimization of production parameters for rice husk ash-based geopolymer cement using response surface methodology," *Case Studies in Construction Materials,* vol. 13, 2020, Art. no. e00461, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00461.

[8] T. Cheewaket and W. Chalee, "Utilization of Rice Husk Ash-based Geopolymer in Hollow Load-bearing Concrete Masonry Block," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 199–210, 2019 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.005.

[9] Saloni, Parveen, T. M. Pham, Y. Y. Lim, S. Pradhan, Jatin, and J. Kumar, "Performance of rice husk ash-based sustainable geopolymer concrete with ultra-fine slag and corn cob ash," *Construction and Building Materials*, vol. 279, 2021, Art. no. 122526, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122526.

[10] K. Chen, W.-T. Lin, and W. Liu, "Effect of NaOH concentration on properties and microstructure of a novel reactive ultra-fine fly ash geopolymer," *Advanced Powder Technology*, vol. 32, no. 8, pp. 2929–2939, 2021, doi: 10.1016/j.apt.2021.06.008.

[11] ASTM C618-19, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

[12] ASTM C109/C109M-21, *Standard Test Method*

for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, 2021.

[13] P. Chindaprasirt and W. Chalee, "Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site," *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 303–310, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.010.

[14] X. Liu, J. Jiang, H. Zhang, M. Li, Y. Wu, L. Guo, W. Wang, P. Duan, W. Zhang, and Z. Zhang, "Thermal stability and microstructure of metakaolin-based geopolymer blended with rice husk ash," *Applied Clay Science*, vol. 196, Art. no. 105769, 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105769.

[15] K. Kaur, J. Singh, and M. Kaur, "Compressive strength of rice husk ash-based geopolymer: The effect of alkaline activator," *Construction and Building Materials*, vol. 169, pp. 188–192, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.200.

[16] B. Nanda, J. Mishra, and S. K. Patro, "Synthesis of rice husk ash-based alkaline activators for geopolymer binder systems: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 91, 2024, Art. no. 109694, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109694.

[17] D. Das and P. K. Rout, "Effect of NaOH concentration on the mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer," *Biointerface Research in Applied Chemistry*, vol. 15, no. 1, 2025, Art. no. 13, doi: 10.33263/BRIAC151.013.