

การชะละลายของสารละลายในจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังและเถ้าลอยแคลเซียมสูง Leaching Behavior of Soluble Substances in Lateritic Soil-Based Geopolymer Incorporating High-Calcium Fly Ash

ดร.เจริญชัย ฤทธิรุท (Dr.Charoenchai Ridtirud)^{1*} ดร.วรวิทย์ อุตธา (Dr.Warunvit Auttha)**

ดร.ธนพล พรหมรักษา (Dr.Thanapol Promraksa)**

(Received: August 9, 2024; Revised: September 18, 2024; Accepted: September 18, 2024)

บทคัดย่อ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งในการผลิตได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญคือการชะละลายของสารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์ ที่ผลิตจากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยมุ่งเน้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 96.46, 107.18, 110.52 และ 117.27 กก./ตร.ซม. ที่อายุการทดสอบ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 1.50 อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่สูงกว่า 3.00 ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วเกินไป ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ผลการศึกษาการชะละลายพบว่าค่า pH ของน้ำที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลดลงสูงสุดจาก 6.0 เป็น 4.3 ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 โมลาร์ และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงสูงสุดจาก 4.337 เป็น 0.965 ppt. ที่อายุการทดสอบ 28 วัน ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมอัตราส่วนของสารละลายในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน

ABSTRACT

Geopolymer is a construction material that has gained attention due to its environmental friendliness and the ability to utilize waste materials in its production. However, a significant issue is the leaching of alkaline solutions, such as sodium hydroxide, which may impact ecosystems and human health. This research aims to study the compressive strength and leaching behavior of

¹Corresponding author: Ridtirud@gmail.com

*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Assistant Professor, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

**อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Lecturer, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus.

geopolymer made from lateritic soil mixed with high-calcium fly ash, focusing on varying the concentration of sodium hydroxide and the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide. The results showed that a sodium hydroxide concentration of 12 Molar yielded the highest compressive strength, with values of 96.46, 107.18, 110.52, and 117.27 kg/cm² at 3, 7, 14, and 28 days of testing, respectively. Additionally, increasing the sodium silicate to sodium hydroxide ratio improved compressive strength, with a maximum at a 1.50 ratio. However, ratios above 3.00 resulted in rapid setting, leading to a decrease in compressive strength. The leaching study revealed that the pH of the water in which the geopolymer samples were soaked decreased from a maximum of 6.0 to 4.3 at a 12 Molar sodium hydroxide concentration, and the total dissolved solids decreased from 4.337 to 0.965 ppt at 28 days of testing. These findings highlight the importance of controlling the ratio of the solutions in geopolymer production to enhance performance and ensure safety in its application.

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ การชะละลาย ดินลูกรัง

Keywords: Geopolymer, Leaching, Lateritic soil

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งในการผลิต อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญของจีโอโพลิเมอร์คือการชะละลายของสารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อจีโอโพลิเมอร์ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง อาจเกิดการชะละลายความเปราะบางลงสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ [1-2] มาตรฐานที่เกี่ยวกับน้ำทิ้งที่มีความเป็นด่างมีการกำหนดไว้เพื่อป้องกันผลกระทบดังกล่าว เช่น มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย กำหนดค่า pH ของน้ำทิ้งให้อยู่ระหว่าง 5.5-9.0 และค่าการนำไฟฟ้าไม่เกิน 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ เพื่อป้องกันการชะละลายของด่างที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ [3] นอกจากนี้ มาตรฐานน้ำทิ้งขององค์การอนามัยโลกยังแนะนำให้ค่า pH ของน้ำดื่มควรอยู่ระหว่าง 6.5-8.5 เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพ [4] การศึกษาที่เกี่ยวข้องยังระบุว่าเมื่อสารละลายต่างจากจีโอโพลิเมอร์ชะละลายลงสู่แหล่งน้ำ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำ ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตได้ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้ายังส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ในน้ำ [5-6]

วัตถุประสงค์ของการทำวิจัยนี้คือเพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง และเพื่อศึกษาปริมาณการชะละลายของสารละลายในจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง งานวิจัยหลายชิ้นได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายต่างในกระบวนการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหานี้ [7] การศึกษาของ Provis และคณะ [6] พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีการชะละลายของด่างมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Fernández [8] ที่พบว่าการใช้สารละลายต่างที่เข้มข้นจะเพิ่มการชะละลายของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ดินลูกรังยังเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุในการผลิตจีโอโพลิเมอร์[9]

การวิจัยนี้ใช้ดินลูกรังและเถ้าลอยแคลเซียมสูงในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะทำที่อายุ 3, 7, 14, 28 วัน เพื่อประเมินความทนทานของวัสดุ และการทดสอบการชะละลายจะวัดค่า pH, conductivity และ Total Dissolved Solids (TDS) ของน้ำที่แช่ตัวอย่าง เพื่อ

ประเมินการชะละลายของสารละลายต่างจากตัวอย่าง หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างและการชะละลายของสารในจีโอโพลิเมอร์ การวิจัยนี้จะช่วยให้มีความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับปัญหาการชะละลายของสารละลายต่างในจีโอโพลิเมอร์ และสามารถหาแนวทางในการนำดินลูกรังที่หาได้งานในท้องถิ่นและแก้ไข้ปัญหาเพื่อให้วัสดุนี้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยและยั่งยืนในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง
2. เพื่อศึกษาปริมาณการชะละลายของสารละลายในจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ดินลูกรังจากพื้นที่ในจังหวัดขอนแก่น, เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

1.1 ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากพื้นที่ในจังหวัดขอนแก่น ดังแสดงใน

ภาพที่ 1

ดินลูกรังที่จะถูกตากแดดให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง

รายการทดสอบ	ดินลูกรัง
1. ความถ่วงจำเพาะ (มาตรฐาน ASTM D854) [10]	2.61
2. หางขนาดคละของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D422) [11]	
ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	56.45%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 10	39.22%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 30	32.17%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 40	31.31%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 80	27.56%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	19.45%
3. ทดสอบหาขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก (มาตรฐาน ASTM 4381) [12]	
ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.)	20.75%
ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.)	15.58%
ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index , P.I)	5.17%
4. จำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification (มาตรฐานASTM D2487) [13]	CL-ML
5. จำแนกดินโดยระบบ Unified Soil Classification (มาตรฐานASTM D3282) [14]	A-5
6. Standard Compaction Test@9.95%	1,985 kg/m ³

1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย แม่เมาะดังแสดงใน

ภาพที่ 2 มีผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ

ทางเคมีนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีปริมาณสารประกอบซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3), และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) สูง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยนี้ถูกจัดเป็นชนิด C (Class C) ตามมาตรฐาน ASTM 618 [15] เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง



ภาพที่ 1 ดินลูกรัง

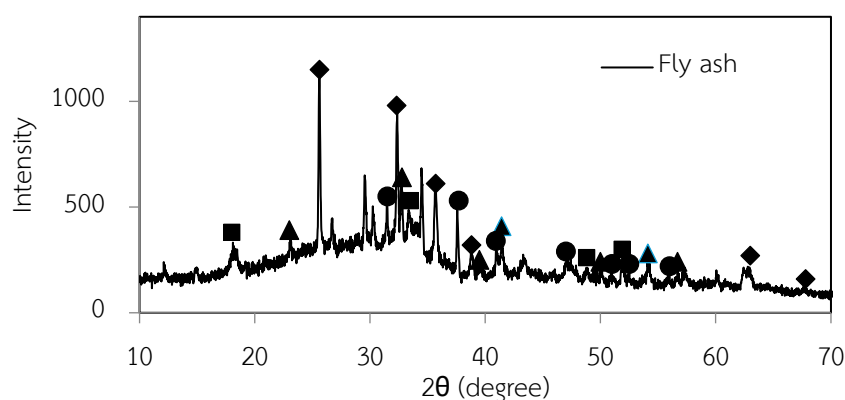


ภาพที่ 2 เถ้าลอย แม่เมาะ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย แม่เมาะ

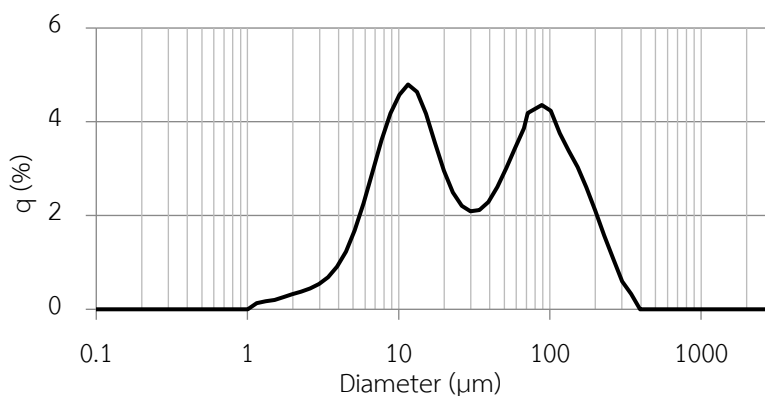
สารประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	สารประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)
CaO	27.93	TiO ₂	0.69
SiO ₂	25.23	Na ₂ O	0.48
Fe ₂ O ₃	22.06	MnO	0.19
Al ₂ O ₃	10.21	BaO	0.17
SO ₃	7.64	ZnO	0.16
K ₂ O	3.22	SrO	0.14
MgO	1	As ₂ O ₃	0.04
P ₂ O ₅	0.71	Cl	0.03

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงพีก (peaks) ที่ชัดเจนและแคบ ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกของแร่ต่างๆ เช่น ควอตซ์ (SiO_2), มัลไลต์ (Al_2O_3), เฮมาไทต์ (Fe_2O_3), และไลม์ (CaO) นอกจากนี้ ยังพบพื้นฐานที่กระจายกว้างๆ (broad humps) ในช่วงมุม 2θ ที่ 20° ถึง 30° ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นอสัณฐานของเถ้าลอย [5,16]



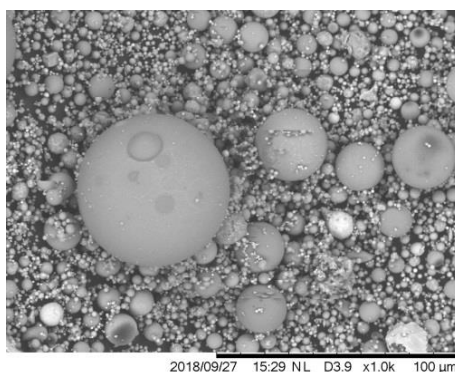
ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเถ้าลอย แม่เมาะ ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอยดังแสดงในภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่ามีช่วงขนาดอนุภาคหลักอยู่ที่ประมาณ 10 ไมครอนและ 100 ไมครอน โดยมีการกระจายตัวที่กว้าง ซึ่งบ่งชี้ถึงความหลากหลายของขนาดอนุภาคในเถ้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและเคมีของจีโอโพลิเมอร์อย่างมาก เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [17-18]



ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอย แม่เมาะ

การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะกลม (spherical) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้บ่อยในเถ้าลอย เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินที่อุณหภูมิสูงทำให้อนุภาคเกิดการหลอมเหลวและจับตัวเป็นทรงกลม อนุภาคทรงกลมช่วยให้การกระจายตัวในสารละลายต่างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อนุภาคที่มีขนาดเล็กยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างสมบูรณ์ [18]



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์อนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะด้วยเทคนิค SEM

1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

มีมวลโมเลกุล 40 กรัมต่อโมล ใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์ โดยมีขั้นตอนการเตรียมให้อยู่ในสถานะของสารละลาย เช่น การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะใช้เกร็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์เกรด 400 กรัม ละลายในน้ำกลั่นในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

1.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3)

ซึ่งมีองค์ประกอบของ Na_2O_2 , SiO_2 และ H_2O ร้อยละ 9.50, 9.00 และ 61.50 โดยมวล ตามลำดับ

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากดินลูกรังผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง

เริ่มต้นด้วยการเตรียมวัสดุตั้งต้นและชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนผสม หลังจากนั้นทำการเทเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในถังผสมและผสมกันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมดินลูกรังลงในถังผสมและผสมเป็นเวลา 3 นาที ต่อมาเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมต่ออีก 5 นาที ดังแสดงใน

ภาพที่ 6 (ก) เมื่อผสมเสร็จ นำส่วนผสมไปอัดลงในแบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [19] ดังนี้

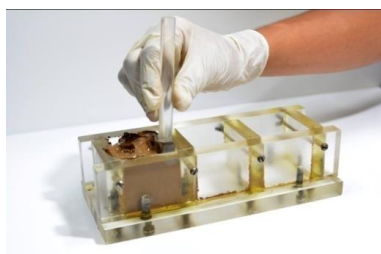
ภาพที่ 6 (ข) และปาดหน้าให้เรียบ จากนั้นพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง หลังจากครบเวลา ดังแสดงใน

ภาพที่ 6 (ค) ถอดแบบหล่อออกและห่อตัวอย่างด้วยพลาสติก ดังแสดงใน

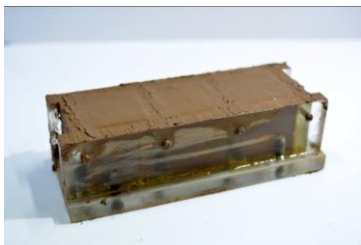
ภาพที่ 6 (ง) แล้วนำตัวอย่างเข้าตู้อบบ่มที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จนครบอายุที่กำหนด เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดและปริมาณการชะละลายของสารละลายในตัวอย่าง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

3. อัตราส่วนผสม

ในการวิจัยนี้แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุดตัวอย่างดังต่อไปนี้

3.1 ชุดตัวอย่างอุณหภูมิที่ใช้บ่ม (Series T) ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มตัวอย่าง คือ 25, 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส บ่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยประกอบด้วยสัดส่วนผสมดังนี้ ดินลูกรัง 600 กรัม เถ้าลอย 150 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ 120 กรัม และ โซเดียมซิลิเกต 120 กรัม

3.2 ชุดตัวอย่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series M) ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์ บ่มตัวอย่างที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยประกอบด้วยสัดส่วนผสมดังนี้ ดินลูกรัง 600 กรัม เถ้าลอย 150 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 120 กรัม และ โซเดียมซิลิเกต 120 กรัม

3.3 ชุดตัวอย่างอัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series S) ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ 0.33, 0.67, 1.00, 1.50

และ 3.00 ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ บ่มตัวอย่าง 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์	ดินลูกรัง (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	โซเดียมซิลิเกต (กรัม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)
0.33	600	150	60	180
0.67	600	150	96	144
1	600	150	120	120
1.5	600	150	144	96
3	600	150	180	60

4. การทดสอบ

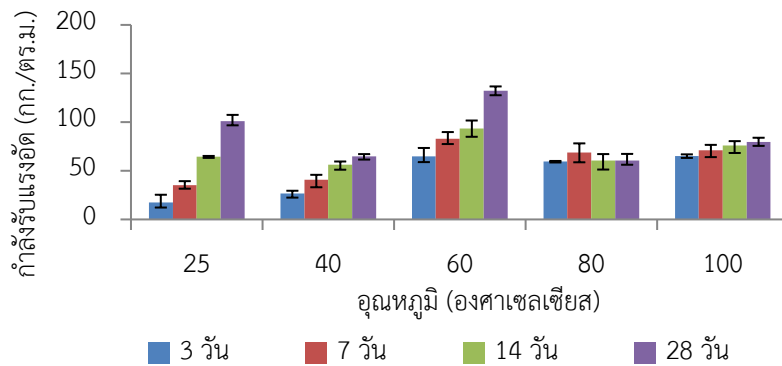
4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109[19] โดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 กรัม จากนั้นเลือกด้านของตัวอย่างที่จะทำการกดกำลังรับแรงอัดและวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงของตัวอย่าง ต่อมานำตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

4.2 การทดสอบปริมาณชะละลาย เริ่มต้นจากการทำความสะอาดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยใช้ผ้าแห้งและสะอาดเช็ดรอบผิว วัดค่า pH และค่า Total Dissolved Solids (TDS) ของน้ำก่อนการทดสอบ จากนั้นเทน้ำใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตรให้ถึงขีดบอกปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมไว้แช่ลงในบีกเกอร์เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลา นำตัวอย่างออกแล้วเทน้ำทดสอบใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร สูดท้าย วัดค่า pH และค่า TDS ของน้ำหลังการทดสอบ เมื่อนำค่า pH ของน้ำที่แช่ตัวอย่างลบกับ pH น้ำก่อนแช่จะได้ ค่า ΔpH

ผลการวิจัย

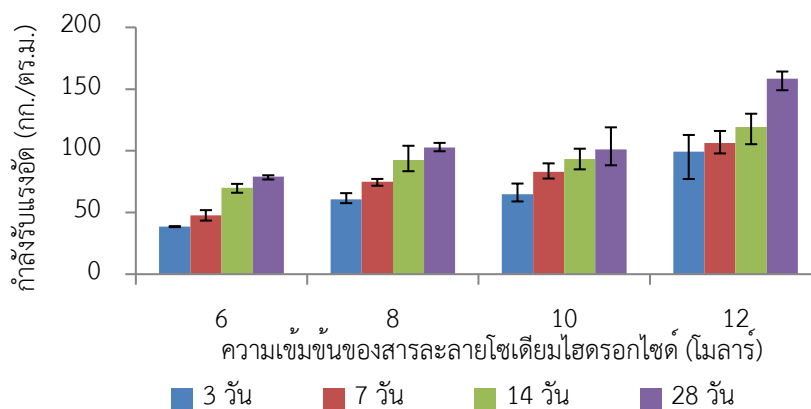
1. กำลังอัด

จากภาพที่ 7 ชุดตัวอย่างอุณหภูมิที่ใช้บ่ม (Series T) แสดงผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นจนถึง 60 องศาเซลเซียส จากนั้นกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่ออุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นถึง 80 และ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเร่งการละลายของอลูมิเนียมและซิลิกา ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง[20] ทำให้เกิดการตกผลึกและการสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงได้อย่างรวดเร็ว Li และคณะ [21] พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงช่วยเร่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาและเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่การบ่มที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดรูพรุนและข้อบกพร่องในโครงสร้าง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงในระยะยาว [22]



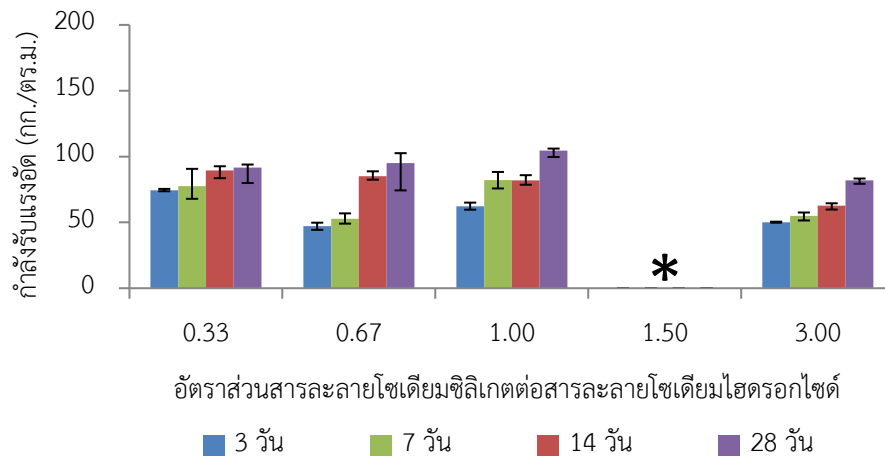
ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในการบ่ม

ภาพที่ 8 แสดงชุดตัวอย่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series M) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์ โดยที่อายุการทดสอบ 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 152.26 กก./ตร. ซม. การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการละลายของซิลิกาและอลูมิเนียมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสร้างเจล Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) ที่แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสนับสนุนโดยงานวิจัยของ Memon และคณะ [23] ที่พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรวดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

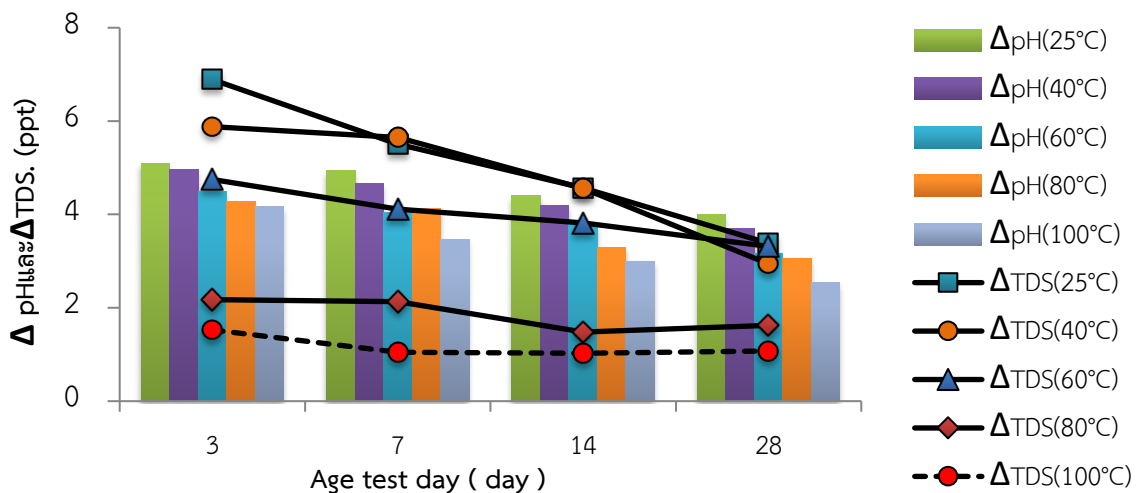
ชุดตัวอย่างอัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series S) กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยอัตราส่วน 1.00 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากการสร้างเจล N-A-S-H ที่แข็งแรง อย่างไรก็ตาม อัตราส่วน 1.50 ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วเกินไป จนไม่สามารถเข้าแบบหล่อได้ทัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Morsy และคณะ [24] ส่วนอัตราส่วน 3.00 แม้จะมีความเข้มข้นของสารละลายสูง แต่การก่อตัวไม่เร็วเท่ากับอัตราส่วน 1.50 เนื่องจากความหนาแน่นของสารละลายที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดเจล N-A-S-H ไม่เสถียร ส่งผลให้วัสดุมีความเปราะบางตามที่ Jaarsveld และคณะ [25] ระบุไว้



ภาพที่ 9 กำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
หมายเหตุ ; * เกิดการก่อตัวอย่างฉับพลันไม่สามารถเข้าแบบหล่อได้ทัน

2. การทดสอบปริมาณชะละลาย

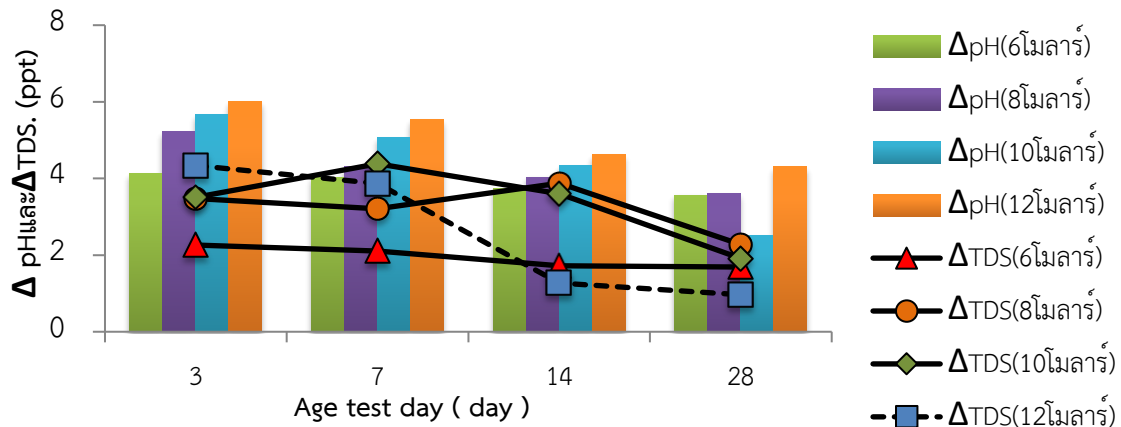
2.1 ชุดตัวอย่างอุณหภูมิที่ใช้บ่ม (Series T) ภาพที่ 10 พบว่าค่าผลต่าง pH และ TDS ลดลงตามอายุของตัวอย่างที่มากขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มทำให้การชะละลายของสารลดลง การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มช่วยเร่งกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดการสร้างเจล N-A-S-H ที่มีโครงสร้างแข็งแรง ซึ่งกับงานวิจัยของ Mo และคณะ [26] ที่ระบุว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มทำให้เกิดการโพลิเมอไรเซชันที่รวดเร็วและเกิดเจล N-A-S-H ที่มีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งช่วยลดการชะละลายของสารละลายต่างในช่วงอายุการบ่มของตัวอย่าง



ภาพที่ 10 ค่าผลต่าง pH และ Total Dissolved Solid(TDS) ของตัวแปรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง

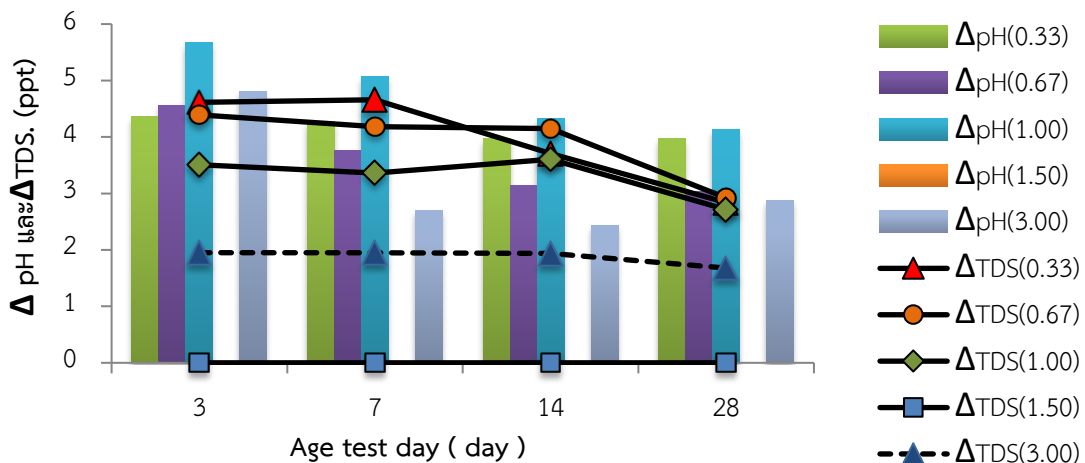
2.2 ชุดตัวอย่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series M) จากภาพที่ พบว่าค่าผลต่าง pH และ TDS มีแนวโน้มลดลงตามอายุของตัวอย่างที่มากขึ้น โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงสุดที่ 12 โมลาร์ สาเหตุเกิดจากการที่ไอโพลิเมอร์มีการสร้างเจล N-A-S-H ที่มีโครงสร้างแน่นหนาและเสถียรขึ้น ซึ่งช่วยลดการชะละลายของสารละลายต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำเสียชุมชนของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าตัวอย่างที่มีความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงสุดที่ 12 โมลาร์มีค่า TDS อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานที่กำหนด (TDS ไม่เกิน 0.5 ppt) [3] อย่างไรก็ตาม การควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังมีความสำคัญในการลดการชะละลายของสารและเพื่อให้

ค่า pH และ TDS อยู่ในระดับที่ปลอดภัยตามมาตรฐานที่กำหนด งานวิจัยของ Khale และ Chaudhary [27] สนับสนุนว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถช่วยควบคุมกระบวนการโพลีเมอไรเซชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 11 ผลต่าง pH และ TDS ของชุดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.3 ชุดตัวอย่างอัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Series S) ผลการทดสอบภาพที่ 12 พบว่าค่าผลต่าง pH และ TDS มีแนวโน้มลดลงตามอายุของตัวอย่างที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และ Van Deventer [1] ที่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตทำให้เกิดการสร้างเจล N-A-S-H อย่างรวดเร็วและมีความเสถียรสูงขึ้น และงานวิจัยของ Phair และ Van Deventer [28] ที่ระบุว่าความเข้มข้นของสารละลายที่สูงทำให้การชะละลายของสารเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงตามเวลาเนื่องจากการสร้างโครงสร้างเจลที่แข็งแรงขึ้น ผลการทดลองนี้ยังพบว่าค่า TDS อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับมาตรฐานน้ำเสียชุมชนของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งกำหนดค่าฟิออของน้ำเสียให้มีค่า TDS ไม่ควรเกิน 500 ppm (หรือ 0.5 ppt). [3]



ภาพที่ 11 ผลต่าง pH และ TDS ของชุดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตเกินกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น อัตราส่วน 1.50 และ 3.00 พบว่าการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเกินไป ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การก่อตัวอย่างรวดเร็วของเจล N-A-S-H ทำให้โครงสร้างไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง

การทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์พบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการชะละลายของสารละลายต่างเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมอัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตมีบทบาทสำคัญในการลดการชะละลายและรักษาคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีและลดความเสี่ยงต่อการชะละลายของสารละลายต่าง ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Xu H, Van Deventer JSJ. The geopolymerization of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*. 2000;59:247–66.
2. Provis JL, Van Deventer JSJ. Geopolymerization kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. *Chemical Engineering Science*. 2007;62:2318–2329.
3. Pollution Control Department, Ministry of Science. Community wastewater and wastewater treatment systems. Bangkok: Kurusapa Printing House, Ladprao; 2002.
4. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Incorporating the 1st addendum. Geneva: WHO; 2017.
5. Duxson P, Provis JL, Lukey GC, Van Deventer JSJ. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research*. 2007;37:1590–7.
6. Bakharev T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*. 2005;35:1233–46.
7. Palomo A, Grutzeck MW, Blanco-Varela M. Alkali-activated fly ashes – a cement for the future. *Cement and Concrete Research*. 1999;29:1323–9.
8. Fernández-Jiménez A, Palomo A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*. 2005;35:1984–92.

9. Cyriaque Kaze R, Naghizadeh A, Tchadjie L, Adesina A, Noel Yankwa Djoko J, Deutou Nemaleu JG, et al. Lateritic soils based geopolymer materials: A review. *Construction and Building Materials*. 2022;344:128157.
10. ASTM International. ASTM D854-23. Standard test methods for specific gravity of soil solids by the water displacement method. West Conshohocken (PA): ASTM International.
11. ASTM International. ASTM D422-63(2007). Standard test method for particle-size analysis of soils. West Conshohocken (PA): ASTM International.
12. ASTM International. ASTM D4318-17e1. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken (PA): ASTM International.
13. ASTM International. ASTM D2487-17. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken (PA): ASTM International.
14. ASTM International. ASTM D3282-15. Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. West Conshohocken (PA): ASTM International.
15. ASTM International. ASTM C618-22. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International.
16. Gao X, Yu QL, Brouwers HJH. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends. *Construction and Building Materials*. 2015;80:105–15.
17. Assi LN, Deaver EE, Ziehl P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;167:372–80.
18. Sharma PK, Singh JP, Kumar A. Effect of particle size on physical and mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019;72:1323–37.
19. ASTM International. ASTM C109/C109M-20. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). West Conshohocken (PA): ASTM International.
20. Suppiah RR, Nermoggan P, Shafiq N. Experimental investigation of the effects of temperature on the morphological characteristics of geopolymer binders. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2022;12:3303–11.
21. Li Q, Chen S, Zhang Y, Hu Y, Wang Q, Zhou Q, et al. Effect of curing temperature on high-strength metakaolin-based geopolymer composite (HMGC) with quartz powder and steel fibers. *Materials*. 2022;15:1–18.
22. Lopes A, Lopes S, Pinto I. Influence of curing temperature on the strength of a metakaolin-based geopolymer. *Materials*. 2023;16:1–12.
23. Rihan MAM, Abdalla Abdalla T. Factors influencing compressive strength in fly ash-based geopolymer concrete: a comprehensive review. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 2024;48:1–22.

24. Morsy M, Alsayed S, Al-Salloum Y, Almusallam T. Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014;39:4333–9.
25. Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Lukey GC. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*. 2002;89:63–73.
26. Mo B, Zhu H, Cui X, He Y, Gong S. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied Clay Science*. 2014;99:144–8.
27. Khale D, Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*. 2007;42:729–46.
28. Phair JW, Van Deventer JSJ. Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*. 2002;66:121–43.