



# วัสดุประสานตั้งต้นและอัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ Binder Materials and Mix Proportion of Geopolymer

อาบีเต็ง ฮาวา<sup>1\*</sup> กฤติยา อ่องวุฒิวัฒน์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครราชสีมา ราชชนรินทร์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 96000

รับบทความ 20 กันยายน 2565  
แก้ไขบทความ 23 กุมภาพันธ์ 2566  
ตอบรับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2566

## บทคัดย่อ

การเติบโตด้านความต้องการซีเมนต์คอนกรีตทั่วโลกสร้างความกังวลต่อการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ในขณะที่วัสดุจีโอพอลิเมอร์แสดงให้เห็นถึงทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับซีเมนต์คอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงกลุ่มวัสดุผสมจีโอพอลิเมอร์สำหรับวัสดุก่อสร้างที่เป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา ตะกรันเหล็ก และเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน จีโอพอลิเมอร์ผสมจากวัสดุประสานตั้งต้นที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน ดังนี้ วัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราयोต์วัสดุประสาน และหินต่อวัสดุประสาน การทบทวนนี้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบปริมาณและทำความเข้าใจผลกระทบของตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้นสำหรับกำลังอัดในงานวิจัยที่ผ่านมา การทบทวนยังได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับช่องว่างการวิจัยในสาขานี้เพื่อส่งเสริมการวิจัยด้านจีโอพอลิเมอร์ในอนาคต

**คำสำคัญ :** จีโอพอลิเมอร์; เถ้าลอย; ดินขาวเผา; ตะกรันเหล็ก; เถ้าปาล์มน้ำมัน

\* ผู้ประพันธ์หลัก E-mail : [abideng.hawa@gmail.com](mailto:abideng.hawa@gmail.com)



# วัสดุประสานตั้งต้นและอัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ Binder Materials and Mix Proportion of Geopolymer

Abideng Hawa<sup>1\*</sup> Krittiya Ongwuttiwat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Amphoe Mueang Narathiwat, Narathiwat Province 96000

Received 20 September 2022

Revised 23 February 2023

Accepted 28 February 2023

## Abstract

The growth of demand for cement concrete around the world concerns the destruction of natural resources. Geopolymer materials show promise as a sustainable alternative to cement concrete. Pozzolan materials such as fly ash, metakaolin, slag, and palm oil ash have different chemical compositions. Various binder to alkaline, sodium silicate to sodium hydroxide, sand to the binder, and stone to binder mixed to geopolymer. Outstanding reviews papers undertaken to quantify and understand the effects of the variable mentioned for compressive strength in the literature. The review also provides insights into research gaps in this field to promote geopolymer research in the future.

**keyword** : geopolymer; fly ash; metakaolin; slag; palm oil ash

---

\* Corresponding author E-mail : [abideng.hawa@gmail.com](mailto:abideng.hawa@gmail.com)

## 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างหลักในงานโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เช่น สะพาน ถนนคอนกรีต ท่าเรือ สนามกีฬา สนามบิน เป็นต้น รวมถึงอาคาร บ้านเรือน โรงแรม ที่อยู่อาศัยอื่น ๆ ด้วยการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และการเพิ่มจำนวนของประชากรทำให้มีความต้องการสิ่งก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นในทุกปี โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาส่งผลให้ต้องมีการใช้ปูนซีเมนต์เป็นจำนวนมาก ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์ต้องมีการทำลายธรรมชาติอย่างมาก และยิ่งไปกว่านั้นในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $CO_2$  มากถึงร้อยละ 5-8 ของการปล่อยก๊าซทั้งหมด [1] ในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะต้องปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.6-1 ตัน [2] ในปี ค.ศ. 2050 มีการคาดการณ์กันว่าทั่วโลกมีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 5,400 ล้านตัน [3] เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ จึงได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุประสานที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุซีโอพอลิเมอร์

ซีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่สามารถผลิตจากวัสดุเหลือทิ้ง ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าปูนซีเมนต์ [4] ซีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์จะสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และคอนกรีตร้อยละ 80-90 [5] ยิ่งไปกว่านั้นปัจจุบันได้มีการใช้ของเหลือทิ้งจากการรีไซเคิลสิ่งก่อสร้างมาเป็นมวลรวม แสดงให้เห็นว่าซีโอพอลิเมอร์ที่ใช้มวลรวมที่เป็นของเหลือทิ้งยังจะเป็นการผลิตคอนกรีตเขียวมากขึ้น วัสดุประสานตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตซีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุธรรมชาติ เช่น ดินขาวหรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น แก้วลอย ตะกรันเหล็ก และอุตสาหกรรมไฟฟ้าชีวมวล เช่น แก้วกลบ แก้วปาล์ม น้ำมัน แก้วชานอ้อย แก้วไม้ เป็นต้น ทั้งในแบบวัสดุหลักและวัสดุผสม ซีโอพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดี [6] มีความต้านทานกรดได้ดี [7]

รูปแบบโครงสร้างทางเคมีของวัสดุประสานซีโอพอลิเมอร์เป็นอสัณฐานซิลิกาและอลูมินา ที่ได้จากวัสดุตั้งต้นที่บดละเอียดรวมเข้ากับสารอัลคาไลน์ เกิดปฏิกิริยาคีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เกี่ยวเนื่องกับการถ่ายโอนซิลิกาจากวัสดุไปเป็นอะลูมิโนซิลิเกตเจล [8] กำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์ถูกพัฒนาด้วยกระบวนการพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ของซิลิกาและอลูมินาในสารอัลคาไลน์ [9] การวิจัยเกี่ยวกับซีโอพอลิเมอร์นักวิจัยสนใจเลือกใช้วัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น แก้วลอย ดินขาวเผาตะกรันเหล็ก เป็นต้น

การศึกษาเกี่ยวกับซีโอพอลิเมอร์นอกจากจะศึกษาด้านชนิดของวัสดุประสานตั้งต้นแล้ว ยังศึกษาด้านตัวแปรอื่น ดังนี้ ลักษณะการบ่ม ระยะเวลาการบ่ม [10, 11] อัตราส่วนวัสดุประสานตั้งต้นต่อสารอัลคาไลน์ [11] โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ [12, 13] ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ [14, 15] เหล่านี้ล้วนมีผลต่อสมบัติของซีโอพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก

วัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตซีโอพอลิเมอร์ที่มีการศึกษาวิจัยในปัจจุบันทั่วโลกนิยมใช้แก้วลอย ดินขาวเผาตะกรันเหล็ก และได้มีการเพิ่มทางเลือกมากขึ้นในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อย่างแก้วปาล์ม น้ำมัน ศึกษาผลกระทบจากวัสดุประสานตั้งต้น อัตราส่วนวัสดุประสานตั้งต้นต่อสารอัลคาไลน์ โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราयोต่อวัสดุประสานตั้งต้น และหินต่อวัสดุประสานตั้งต้น ส่งผลต่อกำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์ การใช้วัสดุประสานตั้งต้นที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อกำลังอัดจากองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ )

## 2. คุณลักษณะของวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตซีโอพอลิเมอร์

### 2.1 แก้วลอย

## Review article

2(1), 44-61

แก้วลอยเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก และในบางแหล่งมีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ในปริมาณสูง แก้วลอยส่วนใหญ่มีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] ที่มีผลรวมของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 และ 70 จัดอยู่ในระดับ C และ F ตามลำดับ ทั้งนี้แก้วลอยต้องมีขนาดอนุภาคละเอียดจึงจะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี [17] เมื่อมีการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคแก้วลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม [18]

### 2.2 ดินขาวเผา

ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้นของดินขาวเผา ดินขาวเป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แทบไม่มีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ อย่างไรก็ตามถึงแม้ดินขาวจะมีองค์ประกอบทางเคมีทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  อยู่ปริมาณมาก แต่ก็ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่จะให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงได้ จำเป็นที่ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงในช่วง 650 – 800 องศาเซลเซียส [19] เพื่อให้ผลึกดินขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ [20] โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผาประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 50-55 และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 40-45 [21-23]

### 2.3 ตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นผลผลิตจากโรงงานถลุงเหล็ก ตะกรันเหล็กมีลักษณะเป็นอสัณฐานและลักษณะทางกายภาพเป็นเหลี่ยมมุม มีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 39.8 อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 11.2 แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 34.4 และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ร้อยละ 7.6 [24]

### 2.4 แก้วปาล์มน้ำมัน

แก้วปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานปาล์มและยังเป็นวัสดุของเสียอีกด้วย แก้วปาล์มน้ำมันพบมากในประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันและมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกี่ยวกับปาล์มน้ำมัน เช่น ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย และประเทศไทย เป็นต้น แก้วปาล์มน้ำมันมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักและมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะไม่เข้าข่ายหรือเป็นวัสดุหลัก อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะใช้แก้วปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุหลักในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งผลการศึกษาในประเทศมาเลเซียแสดงให้เห็นว่าแก้วปาล์มน้ำมันนั้นสามารถใช้เป็นวัสดุผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้โดยไม่ต้องมีการผสมวัสดุชนิดอื่นที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [11]

## 3. การทบทวนการศึกษาวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์

วัสดุประสานตั้งต้นของการผลิตจีโอพอลิเมอร์โดยใช้แก้วลอย ดินขาวเผา ตะกรันเหล็ก และแก้วปาล์มน้ำมัน ได้มีการดำเนินการศึกษาแยกแยะ รวบรวม อภิปรายงานวิจัยที่ผ่านมาพร้อมทั้งวิเคราะห์และสรุปผลต่าง ๆ ดัง Table 1 การใช้วัสดุประสานตั้งต้นแต่ละชนิดให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันโดยเฉพาะด้านกำลัง อันเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก ในกรณีของแก้วลอยที่นิยมใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นของจีโอพอลิเมอร์ องค์ประกอบทางเคมีมีความแตกต่างกันที่อย่างชัดเจน ทั้งปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  และโดยเฉพาะ  $\text{CaO}$  นั้นจะเป็นตัวแบ่ง Class ของแก้วลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] และเป็นที่น่าสังเกตว่าแก้วลอยที่มี  $\text{CaO}$  สูงจะมี  $\text{SiO}_2$  น้อยเมื่อเทียบกับแก้วลอยที่มี  $\text{CaO}$  น้อย ซึ่งมีความแตกต่างกับดินขาวเผาที่องค์ประกอบทางเคมีค่าใกล้เคียงกันทุกแหล่งทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในขณะที่ตะกรันเหล็กมี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก มีข้อสังเกตในประเด็นของอัตราส่วนตะกรันเหล็กต่อสารอัลคาไลน์ที่ใช้มากกว่าวัสดุ

Review article

2(1), 44-61

Table 1 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนผสม การทดสอบ และค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

วัสดุ	ตัวอย่าง	อ้างอิง	องค์ประกอบหลักทางเคมี					ประเภทวัสดุตั้งต้น	อัลคาไลน์/วัสดุตั้งต้น	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	ทราย/วัสดุตั้งต้น	หิน/วัสดุตั้งต้น	การยู่ตัว	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ความหนาแน่น	SEM	XRD	กำลังอัด 28 วัน (MPa)	
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O													
แก้วลอย	เพสต์	[25]	52.5	30.2	2.94	0.82	2.1	1 (F)	0.4	2.5				✓			✓		32.5	
	เพสต์	[26]	36.1	18.1	19.1	16.2	1.8	1 (C)	0.18	1.5				✓	✓	✓	✓	✓	114.2	
	เพสต์	[27]	34.1	16.5	14.0	24.3	2.5	1 (C)	0.4	1				✓			✓	✓	57.4	
	เพสต์	[28]	46.9	19.6	17.4	5.6	2.0	1 (F)	0.45	2.0				✓			✓	✓	53.9	
			42.8	30.0	5.0	12.1	0.6	1 (C)											47.7	
	มอร์ตาร์	[29]	38.1	26.5	8.5	16.5	1.1	1 (C)	0.5	8	2			✓		✓	✓	✓	35-80	
	มอร์ตาร์	[30]	60.6	25.8	2.9	4.2	1.8	1 (F)	0.56	1	2.75				✓	✓				46.9
			36.2	19.9	11.9	14.2	2.4	1 (C)												48.5
	มอร์ตาร์	[31]	62.2	27.2	3.2	2.0	0.9	1 (F)	0.71	2.7	3			✓			✓	✓	50	
	มอร์ตาร์	[32]	25.0	13.2	15.0	30.0	1.8	1 (C)	0.83	2	2			✓			✓		29.8-32.1	
คอนกรีต	[33]	58.6	23.6	7.4	3.1	1.6	1 (F)	0.4	2.5	1.33	3.30	✓	✓			✓	✓	40		
คอนกรีต	[34]	36.2	15.5	14.2	22.6	1.6	1 (C)	0.45	1	1.38	2.55		✓	✓				64		
คอนกรีต	[35]	71.5	9.20	2.4	6.7	-	1 (F)	0.5	1.5	1.5	3.5	✓	✓		✓	✓		21.5		
คอนกรีต	[36]	32.1	19.9	16.9	18.8	2.4	1 (C)	0.59	2.5	1.5	2.8		✓			✓		23.4-32.2		
คอนกรีต	[37]	50.8	26.9	13.5	2.1	0.6	1 (F)	0.36	2.5	1.6	2.9		✓			✓		39		
ดินขาวเผา	เพสต์	[38]	53.0	43.8	0.4	-	0.2	1	1.11	6.7				✓			✓	✓	35	

Review article

2(1), 44-61

วัสดุ	ตัวอย่าง	อ้างอิง	องค์ประกอบหลักทางเคมี					ประเภท วัสดุ ตั้งต้น	อัลคาไลน์/ วัสดุตั้งต้น	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH	ทราย/ วัสดุตั้ง ต้น	หิน/ วัสดุตั้ง ต้น	การ ยู่ตัว	กำลัง อัด	การดูด ซึมน้ำ	ความ หนาแน่น	SEM	XRD	กำลัง อัด 28 วัน (MPa)
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O												
	มอร์ตาร์	[39]	53.0	44.0	0.5	0.2	0.2	1	0.4	2.5	1.6			✓	✓		✓	✓	55
	มอร์ตาร์	[40]	56.1	40.2	0.8	0.2	0.5	1	0.91	2	2.4			✓			✓		50
	มอร์ตาร์	[41]	50.3	41.0	1.1	0.3	4.1	1	0.83	2.5	3			✓			✓	✓	65-75
	คอนกรีต	[42]	57.8	35.0	1.7	1.1	1.2	1	0.77	2.5	1.6	3.9		✓					32.3
	คอนกรีต	[43]	57.8	35.0	1.7	1.1	1.2	1	0.77	2.5	1.6	3.9		✓					32.3
	คอนกรีต	[44]	51.0	42.6	2.1	1.3	0.3	1	0.91	1.5	1.5	3.2	✓	✓	✓	✓			45.9
	คอนกรีต	[45]	51.0	42.6	2.1	1.3	0.3	1	0.59	1.4	1.4	1.9		✓					46.9
	คอนกรีต	[46]	54.0	31.7	4.9	-	4.0	1	1	1.5	2.4	2.4		✓	✓	✓			32.7
	คอนกรีต	[47]	52.3	39.8	1.3	1.8	0.1	1	0.53	2.0	0.9	1.4	✓	✓			✓		40
ตะกรัน เหล็ก	มอร์ตาร์	[48]	36.5	4.7	0.1	38.7	0.1	1	0.4	2.5	1.5			✓			✓		56.6
	คอนกรีต	[49]	33.8	14.9	0.4	38.8	1.4	1	0.28	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1.9	3.1	✓	✓			✓		56.4-83.3
	คอนกรีต	[50]	35.8	14.1	0.9	36.5	1.2	1	0.56	2.5	2.4	2.75		✓			✓		30
	คอนกรีต	[50]	35.8	14.1	0.9	36.5	1.2	1	0.42	2.4	1.6	2.1		✓			✓		40
แก้ว ปาล์ม น้ำมัน	เพสต์	[51]	47.4	3.5	6.2	11.8	-	1	0.77	2.5				✓		✓	✓	✓	32.8
	มอร์ตาร์	[52]	64.2	3.7	6.3	5.8	1.0	1	0.5	2.5	1.5			✓		✓	✓	✓	12
	มอร์ตาร์	[53]	66.9	6.4	5.7	5.6	5.2	1	0.5	2.5	1.8			✓			✓	✓	18-30

## Review article

2(1), 44-61

ประสานตั้งต้นอื่น ๆ ในส่วนของแก้วปาล์มนั้นมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักและมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเชื่อว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก ไม่สามารถมีเพียงตัวใดตัวหนึ่ง แต่ด้วยข้อมูลการวิจัยจำนวนมากและความพยายามที่ต้องการใช้วัสดุชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะวัสดุเหลือทิ้ง ทำให้มีการศึกษาถึงการนำแก้วปาล์มน้ำมันในการเป็นวัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เริ่มเกิดขึ้น

จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม่ว่าจะเป็นการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ต้องมีการวิเคราะห์ด้านกำลังอัดเป็นหลัก ส่วนการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการศึกษาวิจัย นอกจากนั้นการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จะมีการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning electron microscope -SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ (X-Ray diffraction-XRD) เพื่อตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ และลักษณะทางกายภาพของเนื้อจีโอพอลิเมอร์ รูปร่าง รูปร่างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา

## 4. องค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนผสม และผลทดสอบ

### 4.1 แก้วลอย

แก้วลอยเป็นวัสดุประสานตั้งต้นที่เป็นที่นิยมในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม กล่าวคือมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ นอกจากนั้นแก้วลอยบางพื้นที่จะมีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ปริมาณมากทำให้แก้วลอยจัดอยู่ใน class C อย่างไรก็ตามปริมาณของ  $\text{CaO}$  ที่สูงส่งผลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุน้อย จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่น่าสังเกตว่าแก้วลอย class C

ที่มี  $\text{CaO}$  สูง จะมี  $\text{SiO}_2$  น้อยกว่าแก้วลอย class F Nuaklong และคณะ [54] ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบถึงการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอยแคลเซียมสูงกับแคลเซียมต่ำ พบว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์แก้วลอยที่มีแคลเซียมสูงมีระยะเวลาก่อตัวน้อยกว่าแก้วลอยที่มีแคลเซียมน้อยอย่างชัดเจน ในขณะที่กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน แต่แก้วลอยที่แคลเซียมสูงมีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุบ่ม 90 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่กรดซัลฟูริกพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแก้วลอยที่แคลเซียมสูงมีการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอยแคลเซียมต่ำ

เมื่อพิจารณาในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นที่น่าสังเกตว่าผลวิจัยของ Zerzouri และคณะ [25] การใช้แก้วลอยที่ค่า  $\text{CaO}$  ต่ำมาก (ร้อยละ 0.82) มีผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แก้วลอยที่มี  $\text{CaO}$  ปริมาณสูงตั้ง [26-28] ในขณะที่การผลิตมอร์ตาร์ด้วยการอัดแรงดันสามารถให้กำลังที่สูงอย่างชัดเจน อัตราส่วนที่เหมาะสมของแก้วลอยต่อสารอัลคาไลน์จะอยู่ในช่วง 2.0-2.5 และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1.0-2.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนเช่นเดียวกันกับการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต ดังนั้นจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1.0-2.5 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมมากที่สุด

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติที่ดีของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยเฉพาะสมบัติด้านกำลังนั้นยังต้องคำนึงถึงสัดส่วนของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบด้วย เพราะเป็นวัสดุหลักของการผลิตคอนกรีต จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเมื่อต้องการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) อยู่ระหว่าง 2.0-3.0 เท่าของน้ำหนัก

Review article

2(1), 44-61

ถั่วลอถอย แต่เมื่อต้องการผสมเป็นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วนทรายมีปริมาณลดลงอยู่ในช่วง 1.3-1.6 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีการใช้หินเข้ามาผสมในปริมาณ 2.5-3.3 เท่าโดยน้ำหนักของถั่วลอถอย

อย่างไรก็ตาม อิทธิพลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์ถั่วลอถอยยังต้องพิจารณาจากความละเอียดของถั่วลอถอย ซึ่งจากศึกษาของ Jamka และคณะ [55] ที่ทำการศึกษอิทธิพลของความละเอียดของถั่วลอถอยต่อกำลังอัด พบว่าการใช้ถั่วลอถอยที่มีความละเอียดมากทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าถั่วลอถอยที่มีความละเอียดน้อย ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดที่ใช้ถั่วลอถอยที่ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 1.6, 9.8, 16.72, 37.18 และ 80.32 โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบลนเท่ากับ 542, 430, 367, 327 และ 265 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อผ่านการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้เท่ากับ 62, 57.62, 39.22, 33.45 และ 27.89 เมกะพาสคัลด้วยความละเอียดที่มากขึ้นส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลที่มีผลอย่างชัดเจนคือลักษณะการบ่ม เช่น การบ่มที่อุณหภูมิห้อง การบ่มร้อนเป็นต้น และยังรวมถึงระยะเวลาการบ่ม Noushini และคณะ [56] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่ม และระยะเวลาบ่ม ของจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลอถอย ใช้เงื่อนไขการบ่มที่อุณหภูมิ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากที่อายุ 1 วัน ถึงอายุ 28 วัน ในขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิสูงสามารถให้ค่ากำลังอัดได้ดีตั้งแต่ช่วงแรกเริ่ม โดยที่อุณหภูมิบ่ม 75 องศาเซลเซียส และใช้เวลาบ่ม 24 ชั่วโมง สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุด และจากศึกษาของ Sajan และคณะ [57] พบว่ามีการศึกษาเป็นไปในลักษณะเดียวกัน การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการ

บ่มที่อุณหภูมิ 20, 40 และ 80 องศาเซลเซียส ดัง Figure 1 และเป็นที่น่าสนใจว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกำลังอัดสูงที่อายุช่วงปลาย โดยที่อายุช่วงต้นมีค่ากำลังอัดน้อย ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อจีโอพอลิเมอร์ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขึ้นไปกำลังอัดจะมีค่าสูงตั้งแต่อายุช่วงต้น ถั่วลอถอยแคลเซียมสูงสามารถใช้อุณหภูมิต่ำในการบ่ม เนื่องจาก CaO ที่มีปริมาณสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

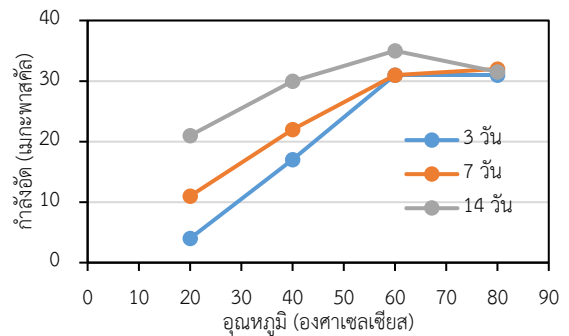


Figure 1 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์เพสต์ [57]

4.2 ดินขาวเผา

ดินขาวเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นสีขาวละเอียด เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะมีสีชมพูอ่อน ๆ ดินขาวเผามีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม ซึ่งมี SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในปริมาณสูงเหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต้องอยู่ในรูปของอสัณฐานถึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ไม่สามารถอยู่ในรูปของผลึก การเผาดินขาวจะมีผลต่อความเป็นผลึก นักวิจัยได้ทำการศึกษาดินขาวที่เหมาะสมในการเผาดินขาว ซึ่งพบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ดินขาวเผาที่เหมาะสมต่อการผลิตจีโอพอลิเมอร์ [58] Wang และคณะ [59] ได้มีการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีความ



Review article

2(1), 44-61

แน่น กำลังอัด และกำลังอัดสูงกว่า จาก Table 1 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าดินขาวเผาประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  มากถึงประมาณร้อยละ 50-58 และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณร้อยละ 35-44 และมีองค์ประกอบทางเคมีชนิดอื่น ๆ ปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเถ้าลอย จากงานวิจัยที่ผ่านมาอัตราส่วนผสมดินขาวเผาต่อสารอัลคาไลน์จะอยู่ในช่วง 1.0-1.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าการใช้เถ้าลอย ในขณะที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ NaOH มีค่าใกล้เคียงกันกับจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย เช่นเดียวกับกับอัตราส่วนทรายต่อดินขาวเผา และหินต่อดินขาวเผา พบว่าอัตราส่วนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกับเถ้าลอย ซึ่งพอจะสรุปเป็นนัยได้ว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาอัตราส่วนที่เหมาะสมของทรายและหินเมื่อเทียบกับวัสดุประสานตั้งต้นทั้งสองของการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต และจากการศึกษาของ Hawa และคณะ [6] เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มร้อนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวเผา พบว่าการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากที่ระยะเวลาบ่มอากาศ 2 ชั่วโมง ไปจนถึง 28 วัน แต่เมื่อมีการบ่มร้อนนาน 2 และ 4 ชั่วโมง กำลังอัดที่ได้มีค่าสูงตั้งแต่อายุ 2 ชั่วโมง โดยเมื่อเวลาบ่มอากาศถึง 28 วัน ค่ากำลังอัดยังมีค่าใกล้เคียงที่อายุ 2 ชั่วโมง มีความเป็นไปได้ว่าการใช้ดินขาวเผาที่มีความละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ตั้งแต่วัยต้นและความเป็นอันตรฐานของสารประกอบหลักของดินขาวเผารวมถึงขั้นตอนการผสมสารอัลคาไลน์ที่เกิดความร้อนสูงในขณะที่ผสม ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ออนผสมวัสดุ

#### 4.3 ตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุเหลือทิ้งของกระบวนการผลิตเหล็ก เกิดจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน กับซิลิกอนและอลูมินาจากเหล็กและถ่านโค้ก เมื่อกระทบความเย็นเกิดการแข็งตัว แล้วนำตะกรันเหล็กไปบด

ให้ละเอียดเหมือนการบดเม็ดปูน จาก Table 1 ตะกรันเหล็กมี  $\text{SiO}_2$  และ CaO เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่มีปริมาณร้อยละ 34-36 และ 36-39 ตามลำดับ ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละพื้นที่ และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนตะกรันเหล็กต่อสารอัลคาไลน์ที่ 2.4-3.6 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและดินขาวเผาพบว่า มีอัตราส่วนที่สูงกว่า เนื่องจากตะกรันเหล็กมีค่าความถ่วงจำเพาะ (3.10 [60]) สูงกว่าเถ้าลอยและดินขาวเผา ทำให้ต้องใช้ปริมาณตะกรันเหล็กปริมาณมากกว่าถึงจะทำให้เกิดการเคลือบมวลรวมได้อย่างทั่วถึง ในขณะที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ NaOH ทรายต่อสารอัลคาไลน์ และหินต่อสารอัลคาไลน์มีค่าใกล้เคียงกันกับเถ้าลอยและดินขาวเผา

ตะกรันเหล็กส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นรวมกับวัสดุอื่น เช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยอย่างเดียวจะเกิดปฏิกิริยาได้ต่ำกว่า และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของผลึก [61] โดยส่วนใหญ่การผสมตะกรันเหล็กจะผสมกับเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำเพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณมากในตะกรันเหล็ก การมีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณน้อยทำให้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องการการบ่มที่อุณหภูมิสูงถึงสามารถให้กำลังได้ที่อายุ 28 วัน ดังนั้นการผสมตะกรันเหล็กสามารถเอาชนะข้อเสียเปรียบข้างต้น อย่างไรก็ตาม การผสมตะกรันเหล็กมีปริมาณที่เหมาะสมต่อสมบัติของระยะเวลาก่อตัวความสามารถทำงานได้ สมบัติทางกลและความทนทาน โดยเฉพาะสมบัติด้านกำลังอัด Hojati and Radlition [62] ทำการศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกรันเหล็กร้อยละ 10, 15 และ 20 พบว่าการใช้ตะกรันเหล็กร้อยละ 20 สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุดโดยการบ่มอากาศ Chithambaram และคณะ [63] ทำการเพิ่มปริมาณตะกรันเหล็กมากขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และพบว่าการใช้ตะกรันเหล็กร้อยละ 30 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดได้ดี

Review article

2(1), 44-61

ที่สุด และจากการตรวจสอบด้านโครงสร้างระดับจุลภาค แสดงให้เห็นถึงความแน่นเป็นของเนื้อเดียวกันของจีโอพอลิเมอร์ และจากงานวิจัยอื่น ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าการแทนที่ ตะกรันเหล็กร้อยละ 20-30 ในเถ้าลอยส่งผลให้ได้ค่ากำลังอัดที่ดี [64-66] ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มร้อน

4.4 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันสามารถจัดให้อยู่ในวัสดุพอลิโอสถาน ชนิดหนึ่ง เนื่องจากผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของ  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  ยังอยู่ในปริมาณสูงดัง Table 1 เป็นที่ยอมรับในการแทนที่ในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มสมบัติของ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น เช่น ด้านกำลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงการใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้น ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์พบว่า การที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี  $SiO_2$  ปริมาณมาก ในขณะที่มีปริมาณ  $Al_2O_3$  อยู่เล็กน้อย จึงไม่เป็นผลดีมากนักต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์โดยเฉพาะด้าน กำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย และดินขาวเผา ในขณะที่ตะกรันเหล็กมี CaO ปริมาณสูงซึ่งจะส่งผลดีต่อกำลังของ จีโอพอลิเมอร์ ผลขององค์ประกอบทางเคมีที่มีสัดส่วนของ  $SiO_2$  กับ  $Al_2O_3$  แตกต่างกันมากนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในการใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการแทนที่บางส่วนในดินขาวเผาหรือใช้วัสดุประสานชนิดอื่นเข้ามาแทนที่ซึ่งจะทำให้ สมบัติดีขึ้น Hawa และคณะ [6] ได้มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาเพื่อใช้ในงานซ่อมแซมคอนกรีต ใน การศึกษาครั้งนี้ได้มีการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเข้ากับดินขาวเผาโดยการแทนที่บางส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดย น้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง และการยึดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยผล การทดสอบแสดงให้เห็นว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ส่งผลให้กำลังอัดดีขึ้นเมื่อใช้การบ่มร้อน 2 ชั่วโมง แต่การ หดตัวแบบแห้งมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน และที่ น่าสังเกตว่าผลการทดสอบ

ความสามารถในการยึดหยุ่นมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ดิน ขาวล้วนเป็นอย่างมากประมาณ 5 เท่า Hawa และคณะ [67] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน น้ำที่ใช้ผสมจีโอพอลิเมอร์ พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานตั้งต้นเท่ากับ 0.45 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่อัตราส่วน น้ำเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ในทุกปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ ผสม นอกจากนี้การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังสามารถลดการ สูญเสียกำลังและน้ำหนักเมื่อแช่ในกรดซัลฟูริก และเมื่อ ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน ว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ส่งผลดีต่อกำลังอัดด้วย เนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่แน่นมีรูพรองจำนวนน้อยดัง Figure 2

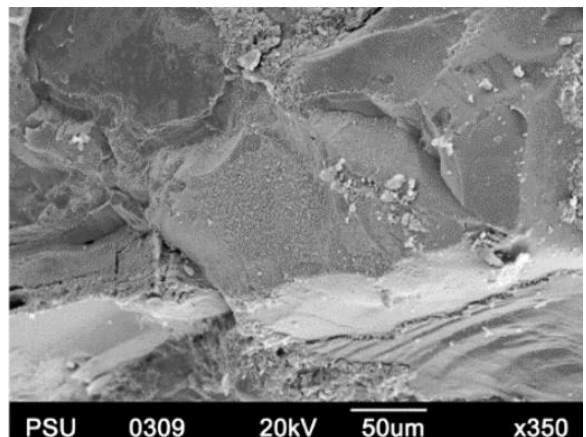


Figure 2 โครงสร้างระดับจุลภาคจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 [67]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพยายามศึกษาการใช้ เฉพาะเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุตั้งต้น ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ โดยที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี  $SiO_2$  ปริมาณมาก แต่มี  $Al_2O_3$  ปริมาณน้อยมากดัง Table 1 สัดส่วนของ  $SiO_2/Al_2O_3$  ไม่เหมาะสม ส่งผลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์ แต่ด้วยการที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณมากในประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ที่ปลูกปาล์มน้ำมันจำนวนมากและ ยังมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้เกิด ของ เหลือทิ้ง (Waste) จำนวนมาก โดยเฉพาะทางภาคใต้ของ

## Review article

2(1), 44-61

ประเทศไทย ทำให้ได้มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันโดยผสมรวมกับผงอลูมินาเพื่อเพิ่มปริมาณของ  $Al_2O_3$  Hawa [11] ได้มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงสมบัติด้วยผงอลูมินาใช้กากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวม การใช้ผงอลูมินาร้อยละ 5 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อกากเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 1.4 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดที่ 18.99 เมกะพาสคัล ที่อายุ 28 วัน การผสมอลูมินาสามารถช่วยด้านกำลังได้อย่างชัดเจน จากการศึกษาที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี  $SiO_2$  เป็นหลักถึงร้อยละ 56.84 แต่มี  $Al_2O_3$  เพียงร้อยละ 1.06 การเพิ่มผงอลูมินาเป็นการเพิ่มสัดส่วนของ  $Al_2O_3$  ซึ่งส่งผลดีต่อกำลัง และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดที่ละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดน้อยกว่า ซึ่งความละเอียดส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ กล่าวคือเถ้าที่มีความละเอียดจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้ทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

## 5. สรุป

การรวบรวมงานวิจัยจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุประสานตั้งต้นเถ้าลอย ดินขาวเผา ตะกรันเหล็ก และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งและวัสดุธรรมชาติ ว่าด้วยองค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนผสมวัสดุประสานตั้งต้นต่อสารอัลคาไลน์ โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราयोต์วัสดุประสานตั้งต้น หินต่อวัสดุประสานตั้งต้น ที่มีผลต่อกำลังอัดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) วัสดุประสานตั้งต้นที่มี  $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$  ในปริมาณมาก สามารถให้กำลังอัดได้ดี และเมื่อมี CaO สูงจะช่วยให้กำลังอัดดีตั้งแต่ช่วงต้น ในขณะที่วัสดุประสานตั้งต้นที่มี  $SiO_2$  เพียงอย่างเดียวจำเป็นต้องมีการเพิ่ม  $Al_2O_3$  จากวัสดุอื่น ในปัจจุบันถึงแม้จะมีการผสมวัสดุอื่นเข้าไปเพื่อเพิ่มสัดส่วนของ  $Al_2O_3$  แต่ผลการทดสอบกำลังยังได้ค่าไม่สูงนัก

2) อัตราส่วนผสมวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยจะอยู่ในช่วง 2.0-2.5 โดยน้ำหนักใกล้เคียงกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ประมาณ 2.0 ดินขาวเผามีอัตราส่วนที่ลดลงอยู่ในช่วง 1.0-1.7 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ตะกรันเหล็กมีอัตราส่วนอยู่ในช่วง 2.4-3.6 เนื่องจากที่ปริมาตรเท่ากันตะกรันเหล็กมีน้ำหนักมากกว่าวัสดุอื่น ๆ

3) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่เป็นสารกระตุ้นของจีโอพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 1.0-2.5 โดยน้ำหนัก ในทุกวัสดุประสานตั้งต้นที่ใช้

4) เมื่อต้องการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วนผสมของทรายต่อวัสดุประสานตั้งต้น และหินต่อวัสดุประสานตั้งต้น โดยน้ำหนัก ควรอยู่ในช่วง 1.3-1.8 และ 2.0-3.5 ตามลำดับ

ในอนาคตอาจจะมีการศึกษาวัสดุอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมไว้ข้างต้นสามารถใช้เป็นแนวทางของอัตราส่วนผสมเพื่อผลิตจีโอพอลิเมอร์ต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Habert, G., De Lacaillerie, J.D.E., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
- [2] Peng, J.X., Huang, L., Zhao, Y.B., Chen, P. & Zeng, L. (2013). Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. *Advanced*

Review article

2(1), 44-61

- Materials Research, 610-613, 2120–2128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.2120>
- [3] Tam, C., Taylor, M. & Gielen, D. (2006). Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions from the global cement industry, 2006, IEA-WBCSD workshop.
- [4] Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>
- [5] Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, 6(2), 263–278.
- [6] Hawa, A., Tonnayopas, D., Prachasaree, W., & Taneerananon, P. (2013). Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer for Rapid Road Repair. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 764180. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/764180>
- [7] Hawa, A., Tonnayopas, D., Prachasaree, W., & Taneerananon, P. (2013). Investigation the effects of oil palm ash in metakaolin based geopolymer. *Ceramics-Silikaty*, 57(4), 319-327.
- [8] Mohajerani, A., Suter, D., Jeffrey-Bailey, T., Song, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Law, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(3), 493–515. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>
- [9] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal Thermal Analysis*. 37, 1633–1656.
- [10] Rabie, M., Irshidat, R.M., & Al-Nuaimi, N. (2022). Ambient and heat-cured geopolymer composites: mix design optimization and life cycle assessment. *Sustainability*, 14, 4942. 17 pages. <https://doi.org/10.3390/su14094942>
- [11] Hawa, A. (2022). Strength and microstructural of geopolymer mortar from palm oil ash containing aluminapowder with palm oil clinker aggregate. *Engineering and Applied Science Research*, 49(6), 731-743. <https://doi:10.14456/easr.2022.71>
- [12] Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y., & Almusallam, T. (2014). Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 4333-4339. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1093-8>
- [13] Degirmenci, F.N. (2017). Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on durability of geopolymer mortars containing natural and artificial pozzolans. *Ceramics-Silikaty*, 61(4), 340-350. <https://doi:10.13168/cs.2017.003>
- [14] Patankar, S.V., Ghugal, Y.M., & Jamkar, S.S. (2014). Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar. *Indian Journal*

Review article

2(1), 44-61

- of Materials Science, 6 pages, 938789. <https://doi.org/10.1155/2014/938789>
- [15] Abdullah, A., Hussin, K., Abdullah, M.M.A.B., Yahya, Z., Sochacki, W., Razak, R.A., Bloch, K., & Fansuri, H. (2021). The effects of various concentrations of NaOH on the inter-particle gelation of a fly ash geopolymer aggregate. *Materials*, 14(5), 1111. <https://doi:10.3390/ma14051111>
- [16] ASTM C618-19, (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [17] Patankar, S.V., Jamkar, S.S., & Ghugal, Y.M. (2013). Effect of fineness of fly ash on flow and compressive strength of geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, 87(4), 57-61.
- [18] อาบีเต็ง ฮาวา ปรีชา สะแลแม ชุลกีฟลี มามะ ชุลกีฟลี เตมะ และวรพจน์ ประสาเสรี. (2565). สมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยที่ใช้เศษยางรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียด วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 45(1), 125-144. <https://doi:10.14456/kmuttrd.2022.8>
- [19] Elimbi, A., Tchakoute, H.K., & Njopwouo, D. (2011). Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2805-2812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055>
- [20] Albidah, A.S. (2021). Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: A review. *Ceramics International*, 47(11), 14923-14943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.127>
- [21] Jamil, N. H., Abdullah, M. M. A. B., Pa, F. C., Mohamad, H., Ibrahim, W. M. A. W., Chairapa, J. (2020). Influences of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14922-14932. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.045>
- [22] Tiffo, E., Mbah, J. B. B., Belibi, P. D. B., Djobo, J. N. Y., & Elimbi, A. (2020). Physical and mechanical properties of unheated and heated kaolin based-geopolymers with partial replacement of aluminium hydroxide. *Materials Chemistry and Physics*, 239, AN. 122103. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122103>
- [23] Liang, G., Zhu, H., Li, H., & Guo, H. (2021). Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin - based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 293, 123486, 11 pages. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123486>
- [24] Mayhoub, O.A., Nasr, E.A.R., Ali, Y., & Kohail, M. (2021). Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.013>

**Review article**

**2(1), 44-61**

- [25] Zerzouri, M., Alehyen, S., Hamzaoui, R., Ziyani, L., & Loukili, A. (2021). Durability of Moroccan fly ash-based geopolymer binder. *Materials Letters*, 304, 13673. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130673>
- [26] Shee-Ween, O., Cheng-Yong, H., Yun-Ming, L., Abdullah, M.M.A.B., Ngee, H.L., Chan, L.W.L., Wan-En, O., Jaya, N.A., & Yong-Sing, N. (2021). Cold-pressed fly ash geopolymers: effect of formulation on mechanical and morphological characteristics. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3028-3046. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.084>
- [27] Payakaniti, P., Chuewangkam, N., Yensano, R., Pinitsoontorn, S., & Chindapasirt, P. (2020). Changes in compressive strength, microstructure and magnetic properties of a high-calcium fly ash geopolymer subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 265, 120650. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120650>
- [28] Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y., & Huang, B. (2020). A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122500>
- [29] Qian, L.P., Wang, Y.S., Alrefaei, Y., & Dai, J.G. (2020). Experimental study on full-volume fly ash geopolymer mortars: Sintered fly ash versus sand as fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121445>
- [30] Nuaklong, P., Wongsa, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., & Chindapasirt, P. (2019). Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate. *Heliyon*, 5(9), e02513. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02513>
- [31] Shill, S.K., Al-Deen, S., Ashraf, M., & Hutchison, W. (2020). Resistance of fly ash based geopolymer mortar to both chemicals and high thermal cycles simultaneously. *Construction and Building Materials*, 239, 117886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117886>
- [32] Chindapasirt, P. & Rattanasak, U. (2017). Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2317-2324. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.06.013>
- [33] Moghaddam, S.C., Madandoust, R., Jamshidi, M., & Nikbin, I.M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*, 281, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571>
- [34] Wongkvanklom, A., Posi, P., Kampala, A., Kaewngao, T., & Chidapasirt, P. (2021). Beneficial utilization of recycled asphaltic

Review article

2(1), 44-61

- concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00615. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00615>
- [35] Ghafoor, M.T., Khan, Q.S., Qazi, A.U., Sheikh, M.N., & Hadi, M.N.S. (2021). Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 273, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- [36] Chindapasirt, P. & Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and Building Materials*, 63, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.010>
- [37] Sarker, P.K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.059>
- [38] Segura, I.P., Jensen, P.A., Damo, A.J., Ranjbar, N., Jensen, L.S., & Canut, M. (2022). Influence of sodium-based activators and water content on the fresh and hardened properties of metakaolin geopolymers. *SN Applied Sciences*, 4, 283. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05167-w>
- [39] Saif, M.S., El-Hariri, M.O.R., Sarie-Eldin, A.I., Tayeh, B.A., & Farag, M.F. (2022). Impact of Ca+ content and curing condition on durability performance of metakaolin-based geopolymer mortars. *Case Studies in Construction and Materials*, 16, e00922. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00922>
- [40] Tanyildizi, H., Ziada, M., Uysal, M., Güngör, N.D., & Coskun, A. (2022). Comparison of bacteria-based self-healing methods in metakaolin geopolymer mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00895. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00895>
- [41] Hawa, A., Tonayopas, D., & Prachasaree, W. (2013). Performance evaluation and microstructure characterization of metakaolin-based geopolymer containing oil palm ash. *Scientific World Journal*, 2013, 857586. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/857586>
- [42] Eisa, M.S., Fahmy, E.A., & Basiouny, M.E. (2022). Using metakaolin-based geopolymer concrete in concrete pavement slabs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 1. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00601-1>
- [43] Eisa, M.S., Basiouny, M.E., & Fahmy, E.A. (2022). Drying shrinkage and thermal expansion of metakaolin-based geopolymer concrete pavement reinforced with biaxial geogrid. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01415. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01415>
- [44] Albidah, A., Alsaif, A., Abadel, A., Abbas, H., & Al-Salloum, Y. (2022). Role of recycled vehicle

Review article

2(1), 44-61

- tires quantity and size on the properties of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2593-2607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.103>
- [45] Albidah, A., Altheeb, A., Alrshoudi, F., Abadel, A., Abbas, H., & Al-Salloum, Y. (2020). Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete. *Structures*, 27, 1582-1593. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.048>
- [46] Moradikhrou, A.B., Esparham, A., & Avanaki, M.J. (2020). Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 251, 118965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118965>
- [47] Abbas, R., Khereby, M.A., Ghorab, H.Y., & Elkhoshkhany, N. (2020). Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 669-687. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01811-4>
- [48] Al-Husseinawi, F.N., Atherton, W., Al-Khafaji, Z., Sadique, M., & Yaseen, Z.M. (2022). The Impact of Molar Proportion of Sodium Hydroxide and Water Amount on the Compressive Strength of Slag/Metakaolin (Waste Materials) Geopolymer Mortar. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 5910701. <https://doi.org/10.1155/2022/5910701>
- [49] Ou, Z., Feng, R., Mao, T., & Li, N. (2022). Influence of mixture design parameters on the static and dynamic compressive properties of slag-based geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 53, 104564. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104564>
- [50] Oyebisi, S., Olutoge, F., Kathirvel, P., Oyaotuderekumor, I., Lawanson, D., Nwani, J., Ede, A., & Kaze, R. (2022). Sustainability assessment of geopolymer concrete synthesized by slag and corncob ash. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01665. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01665>
- [51] Salih, M.A., Ali, A.A.A., & Farzadnia, N. (2014). Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste. *Construction and Building Materials*, 65, 592-603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.031>
- [52] Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U.J., Simon, H., Metselaar, H.S.C., & Jumaat, M.Z. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 65, 144-121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.064>
- [53] Salami, B.A., Johari, Z.A., & Maslehuddin, M. (2016). Impact of added water and superplasticizer on early compressive strength of selected mixtures of palm oil fuel ash-based engineered geopolymer composites.



Review article

2(1), 44-61

- Construction and Building Materials, 109, 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.033>
- [54] Nuaklong, P., Wongsu, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., Chindaprasirt, P. (2019). Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate. *Heliyon*, 5, e02513. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02513>
- [55] Jamkar, S.S., Ghugal, Y.M., & Patankar, S.V. (2013). Effect of fly ash fineness on workability and compressive strength of geopolymer concrete. *Indian Concrete Journal*, 87(4), 57-62.
- [56] Noushini, A. & Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210>
- [57] Sajan, P., Jiang, T., Lau, C., Tan, G., & Ng, Kan. (2021). Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer. *Cleaner Materials*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100002>
- [58] Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 43(2), 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.003>
- [59] Wang, M.R., Jia, D.C., He, P.G., & Zhou, Y. (2010). Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer. *Materials Letters*, 64(22), 2551-2554. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.08.007>
- [60] Oyebisi, S., Olutoge, F., Kathirvel, P., Oyaotuderekumor, I., Lawanson, D., Nwani, J., Edi, A., & Kaze, R. (2022). Sustainability assessment of geopolymer concrete synthesized by slag and corncob ash. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01665. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01665>
- [61] Kumar, A., & Kumar, R. (2011). Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, 37, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.03>
- [62] Hojati, M., & Radlin, A. (2017). Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements. *Construction and Building Materials*, 150, 808-816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.04>
- [63] Chithambaram, S.J., Kumar, S., & Prasad, M.M. (2020). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 213, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.051>

*Review article*

*2(1), 44-61*

- [64] Nath, P. & Sarker, P.K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- [65] Ismail, N., & El-hassan, H. (2018). Development and characterization of fly ash – slag blended geopolymer mortar and lightweight concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 1–14, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002209).
- [66] Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G., & Lu, P. (2019). Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Composite Part B Engineering*, 164, 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
- [67] Hawa, A., Tonnayopas, D., and Prachasaree, W. (2017). Effect of water-to-powder ratios on the compressive strength and microstructure of metakaolin based geopolymers. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24, 499-506.