

วัสดุประสานตั้งต้นและอัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ Binder Materials and Mix Proportion of Geopolymer

อาบีเต็ง ฮาวา^{1*} กฤติยา อ่องวุฒิมิวัฒน์¹

¹หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ 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 จีโอพอลิเมอร์ผสมจากวัสดุประสานตั้งต้นที่มีอัตราส่วนผสมต่างกัน ดังนี้ วัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราयोต์วัสดุประสาน และหินต่อวัสดุประสาน การทบทวนนี้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบปริมาณและทำความเข้าใจผลกระทบของตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้นสำหรับกำลังอัดในงานวิจัยที่ผ่านมา การทบทวนยังได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับช่องว่างการวิจัยในสาขานี้เพื่อส่งเสริมการวิจัยด้านจีโอพอลิเมอร์ในอนาคต

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์; เถ้าลอย; ดินขาวเผา; ตะกรันเหล็ก; เถ้าปาล์มน้ำมัน

* ผู้ประพันธ์หลัก E-mail : abideng.hawa@gmail.com



วัสดุประสานตั้งต้นและอัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ Binder Materials and Mix Proportion of Geopolymer

Abideng Hawa^{1*} Krittiya Ongwuttiwat¹

¹Infrastructure 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

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 ที่สามารถนำมาใช้ผลิตวัสดุซีโพลิเมอร์

ซีโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่สามารถผลิตจากวัสดุเหลือทิ้ง ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าปูนซีเมนต์ [4] ซีโพลิเมอร์ซีเมนต์จะสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และคอนกรีตร้อยละ 80-90 [5] ยิ่งไปกว่านั้นปัจจุบันได้มีการใช้ของเหลือทิ้งจากการรีไซเคิลสิ่งก่อสร้างมาเป็นมวลรวมแสดงให้เห็นว่าซีโพลิเมอร์ที่ใช้มวลรวมที่เป็นของเหลือทิ้งยังจะเป็นการผลิตคอนกรีตเขียวมากขึ้น วัสดุประสานตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตซีโพลิเมอร์เป็นวัสดุธรรมชาติ เช่น ดินขาวหรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น แก้วลอย ตะกรันเหล็ก และอุตสาหกรรมไฟฟ้าชีวมวล เช่น แก้วแกลบ แก้วปาล์มน้ำมัน แก้วชานอ้อย แก้วไม้ เป็นต้น ทั้งในแบบวัสดุหลักและวัสดุผสม ซีโพลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดี [6] มีความต้านทานกรดได้ดี [7]

รูปแบบโครงสร้างทางเคมีของวัสดุประสานซีโพลิเมอร์เป็นอนุพันธ์ซิลิกาและอลูมินา ที่ได้จากวัสดุตั้งต้นที่บดละเอียดรวมเข้ากับสารอัลคาไลน์ เกิดปฏิกิริยาซีโพลิเมอร์ไรเซชัน เกี่ยวเนื่องกับการถ่ายโอนซิโไอไลจากวัสดุไปเป็นอะลูมิโนซิลิเกตเจล [8] กำลังอัดของซีโพลิเมอร์ถูกพัฒนาด้วยการบวกรวมการพอลิ คอนเดนเซชัน

(Polycondensation) ของซิลิกาและอลูมินาในสารอัลคาไลน์ [9] การวิจัยเกี่ยวกับซีโพลิเมอร์นักวิจัยสนใจเลือกใช้วัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น แก้วลอย ดินขาวเผาตะกรันเหล็ก เป็นต้น

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

วัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตซีโพลิเมอร์ที่มีการศึกษาวิจัยในปัจจุบันทั่วโลกนิยมใช้แก้วลอย ดินขาวเผาตะกรันเหล็ก และได้มีการเพิ่มทางเลือกมากขึ้นในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อย่างแก้วปาล์มน้ำมัน ศึกษาผลกระทบจากวัสดุประสานตั้งต้น อัตราส่วนวัสดุประสานตั้งต้นต่อสารอัลคาไลน์ โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทราวยต่อวัสดุประสานตั้งต้น และหินต่อวัสดุประสานตั้งต้น ส่งผลต่อกำลังอัดของซีโพลิเมอร์ การใช้วัสดุประสานตั้งต้นที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อกำลังอัดจากองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

2. คุณลักษณะของวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตซีโพลิเมอร์

2.1 แก้วลอย

แก้วลอยเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก และในบางแหล่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูง แก้วลอยส่วนใหญ่มีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] ที่มีผลรวมของ $SiO_2+Al_2O_3+$ และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 และ 70 จัดอยู่ในระดับ C และ F ตามลำดับ ทั้งนี้แก้วลอยต้องมีขนาดอนุภาคละเอียดจึงจะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี [17] เมื่อมีการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคแก้วลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม [18]

2.2 ดินขาวเผา

ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้นของดินขาวเผา ดินขาวเป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แทบไม่มีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ อย่างไรก็ตามถึงแม้ดินขาวจะมีองค์ประกอบทางเคมีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 อยู่ปริมาณมาก แต่ก็ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่จะเกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงได้ จำเป็นที่ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงในช่วง 650 – 800 องศาเซลเซียส [19] เพื่อให้ผลึกดินขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ดีในการผลิตซีอิโพลีเมอร์ [20] โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผาประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 50-55 และ Al_2O_3 ร้อยละ 40-45 [21-23]

2.3 ตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นผลผลิตจากโรงงานถลุงเหล็ก ตะกรันเหล็กมีลักษณะเป็นอสัณฐานและลักษณะทางกายภาพเป็นเหลี่ยมมุม มีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 39.8 อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 34.4 และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 7.6 [24]

2.4 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานปาล์มและยังเป็นวัสดุของเสียอีกด้วย เถ้าปาล์มน้ำมันพบมากในประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันและมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกี่ยวกับปาล์มน้ำมัน เช่น ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย และประเทศไทย เป็นต้น เถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักและมี Al_2O_3 เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะไม่เข้าข่ายหรือเป็นวัสดุหลัก อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุหลักในการผลิตซีอิโพลีเมอร์ ซึ่งผลการศึกษาในประเทศมาเลเซียแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นสามารถใช้เป็นวัสดุผลิตซีอิโพลีเมอร์ได้โดยไม่ต้องมีการผสมวัสดุชนิดอื่นที่มี Al_2O_3 [11]

3. การทบทวนการศึกษาวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตซีอิโพลีเมอร์

วัสดุประสานตั้งต้นของการผลิตซีอิโพลีเมอร์โดยใช้เถ้าลอยดินขาวเผา ตะกรันเหล็ก และเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้มีการดำเนินการศึกษาแยกแยะ รวบรวม อภิปรายงานวิจัยที่ผ่านมาพร้อมทั้งวิเคราะห์และสรุปผลต่าง ๆ ดัง Table 1 การใช้วัสดุประสานตั้งต้นแต่ละชนิดให้ผลการทดสอบที่ต่างกันโดยเฉพาะด้านกำลัง อันเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก ในกรณีของเถ้าลอยที่นิยมใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นของซีอิโพลีเมอร์ องค์ประกอบทางเคมีมีความแตกต่างกันแต่ละพื้นที่อย่างชัดเจน ทั้งปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO และโดยเฉพาะ CaO นั้นจะเป็นตัวแบ่ง Class ของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] และที่น่าสังเกตว่าเถ้าลอยที่มี CaO สูงจะมี SiO_2 น้อยเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่มี CaO น้อย ซึ่งมีความแตกต่างกับดินขาวเผาที่องค์ประกอบทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกันทุกแหล่งทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในขณะที่ตะกรันเหล็กมี SiO_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก มีข้อสังเกตในประเด็นของอัตราส่วนตะกรันเหล็กต่อสารอัลคาไลน์ที่ใช้มากกว่าวัสดุประสานตั้งต้นอื่น ๆ ในส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักและมี Al_2O_3 ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเชื่อว่าการผลิตซีอิโพลีเมอร์จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก ไม่สามารถมีเพียงตัวใดตัวหนึ่งแต่ด้วยข้อมูลการวิจัยจำนวนมากและความพยายามที่ต้องการใช้วัสดุชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะวัสดุเหลือทิ้ง ทำให้มีการศึกษาถึงการใส่เถ้าปาล์มน้ำมันในการเป็นวัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตซีอิโพลีเมอร์เริ่มเกิดขึ้น

จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม่ว่าจะเป็นการผลิตซีอิโพลีเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ต้องมีการวิเคราะห์ด้านกำลังอัดเป็นหลัก ส่วนการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการศึกษาวิจัย นอกจากนั้นการศึกษาซีอิโพลีเมอร์จะมีการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning electron microscope -SEM) และการวิเคราะห์ องค์ประกอบแร่ (X-Ray diffraction-XRD) เพื่อตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปฏิกิริยาซีอิโพลีเมอร์ และลักษณะทางกายภาพของเนื้อซีอิโพลีเมอร์ รูปร่าง รูปร่างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา

Review article

2(1), 39-53

Table 1 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนผสม การทดสอบ และค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

วัสดุ	ตัวอย่าง	อ้างอิง	องค์ประกอบหลักทางเคมี					ประเภทวัสดุตั้งต้น	อัลคาไลน์/วัสดุตั้งต้น	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	ทราย/วัสดุตั้งต้น	หิน/วัสดุตั้งต้น	การยุบตัว	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ความหนาแน่น	SEM	XRD	กำลังอัด 28 วัน (MPa)	
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ 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	
	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	

วัสดุ	ตัวอย่าง	อ้างอิง	องค์ประกอบหลักทางเคมี					ประเภทวัสดุตั้งต้น	อัลคาไลน์/วัสดุตั้งต้น	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	ทราย/วัสดุตั้งต้น	หิน/วัสดุตั้งต้น	การยู่ตัว	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ความหนาแน่น	SEM	XRD	กำลังอัด 28 วัน (MPa)
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O												
	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
ตะกรันเหล็ก	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 ₂ SiO ₃	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
									0.42	2.4	1.6	2.1							40
แก้วปาล์ม 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

4. องค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนผสม และผล การทดสอบ

4.1 แก่ลอลอย

แก่ลอลอยเป็นวัสดุประสานตั้งต้นที่เป็นที่นิยมในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม กล่าวคือมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้แก่ลอลอยบางพื้นที่จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปริมาณมากทำให้แก่ลอลอยจัดอยู่ใน class C อย่างไรก็ตามปริมาณของ CaO ที่สูงส่งผลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุน้อย จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่น่าสังเกตว่าแก่ลอลอย class C ที่มี CaO สูง จะมี SiO_2 น้อยกว่าแก่ลอลอย class F **Nuaklong และคณะ [54]** ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบถึงการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากแก่ลอลอยแคลเซียมสูงกับแคลเซียมต่ำ พบว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์แก่ลอลอยที่มีแคลเซียมสูงมีระยะเวลาก่อตัวน้อยกว่าแก่ลอลอยที่มีแคลเซียมน้อยอย่างชัดเจน ในขณะที่กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน แต่แก่ลอลอยที่แคลเซียมสูงมีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุบ่ม 90 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่กรดซัลฟริกพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแก่ลอลอยที่แคลเซียมสูงมีการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากแก่ลอลอยแคลเซียมต่ำ

เมื่อพิจารณาในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นที่น่าสังเกตว่าผลวิจัยของ **Zerzouri และคณะ [25]** การใช้แก่ลอลอยที่ค่า CaO ต่ำมาก (ร้อยละ 0.82) มีผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แก่ลอลอยที่มี CaO ปริมาณสูงดัง **[26-28]** ในขณะที่การผลิตมอร์ตาร์ด้วยการอัดแรงดันสามารถให้กำลังที่สูงอย่างชัดเจน อัตราส่วนที่เหมาะสมของแก่ลอลอยต่อสารอัลคาไลน์จะอยู่ในช่วง 2.0-2.5 และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1.0-2.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนเช่นเดียวกันกับการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต ดังนั้นจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1.0-2.5 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมมากที่สุด

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติที่ดีของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยเฉพาะสมบัติด้านกำลังนั้นยังต้องคำนึงถึงสัดส่วนของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบด้วย เพราะเป็นวัสดุหลักของการผลิตคอนกรีต จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเมื่อต้องการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) อยู่ระหว่าง 2.0-3.0 เท่าของน้ำหนักแก่ลอลอย แต่เมื่อต้องการผสมเป็นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วนทรายมีปริมาณลดลงอยู่ในช่วง 1.3-1.6 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีการใช้หินเข้ามาผสมในปริมาณ 2.5-3.3 เท่าโดยน้ำหนักของแก่ลอลอย

อย่างไรก็ตาม อิทธิพลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์แก่ลอลอยยังต้องพิจารณาจากความละเอียดของแก่ลอลอย ซึ่งจากการศึกษาของ **Jamka และคณะ [55]** ที่ทำการศึกษอิทธิพลของความละเอียดของแก่ลอลอยต่อกำลังอัด พบว่าการใช้แก่ลอลอยที่มีความละเอียดมากทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าแก่ลอลอยที่มีความละเอียดน้อย ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดที่ใช้แก่ลอลอยที่ค่าบดตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 1.6, 9.8, 16.72, 37.18 และ 80.32 โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบลนเท่ากับ 542, 430, 367, 327 และ 265 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อผ่านการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้เท่ากับ 62, 57.62, 39.22, 33.45 และ 27.89 เมกะพาสคัลด้วยความละเอียดที่มากขึ้นส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลที่มีผลอย่างชัดเจนคือลักษณะการบ่ม เช่น การบ่มที่อุณหภูมิห้อง การบ่มร้อนเป็นต้น และยังคงรวมถึงระยะเวลาการบ่ม **Noushini และคณะ [56]** ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่ม และระยะเวลาบ่ม ของจีโอพอลิเมอร์จากแก่ลอลอย 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 และจากการศึกษาของ **Sajan และคณะ [57]** พบว่ามีผล

การศึกษาเป็นไปในลักษณะเดียวกัน การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิ 20, 40 และ 80 องศาเซลเซียส ดัง **Figure 1** และเป็นที่น่าสังเกตว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกำลังอัดสูงที่อายุช่วงปลาย โดยที่อายุช่วงต้นมีค่ากำลังอัดน้อย ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อจีโอพอลิเมอร์ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขึ้นไปกำลังอัดจะมีค่าสูงตั้งแต่อายุช่วงต้น แก๊สคลอไรด์สามารถใช้อุณหภูมิต่ำในการบ่ม เนื่องจาก CaO ที่มีปริมาณสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

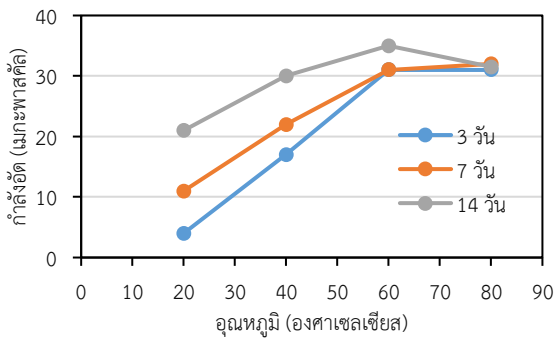


Figure 1 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์เพสต์ [57]

4.2 ดินขาวเผา

ดินขาวเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นสีขาวละเอียด เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะมีสีชมพูอ่อน ๆ ดินขาวเผามีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม ซึ่งมี SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณสูงเหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม SiO_2 และ Al_2O_3 ต้องอยู่ในรูปของอสัณฐานถึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ไม่สามารถอยู่ในรูปของผลึก การเผาดินขาวจะมีผลต่อความเป็นผลึก นักวิจัยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาว ซึ่งพบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ดินขาวเผาที่เหมาะสมต่อการผลิตจีโอพอลิเมอร์ [58] Wang และคณะ [59] ได้มีการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีความแน่น กำลังอัด และกำลังอัดสูงกว่า จาก **Table 1** แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าดินขาวเผาประกอบด้วย SiO_2 มากถึงประมาณร้อยละ 50-58 และ Al_2O_3 ประมาณร้อยละ 35-

44 และมีองค์ประกอบทางเคมีชนิดอื่น ๆ ปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับแก๊สคลอไรด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาอัตราส่วนผสมดินขาวเผาต่อสารอัลคาไลน์จะอยู่ในช่วง 1.0-1.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าการใช้แก๊สคลอไรด์ ในขณะที่มีอัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH มีค่าใกล้เคียงกันกับจีโอพอลิเมอร์จากแก๊สคลอไรด์ เช่นเดียวกับกับอัตราส่วนทรายต่อดินขาวเผา และหินต่อดินขาวเผา พบว่าอัตราส่วนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกับแก๊สคลอไรด์ ซึ่งพอจะสรุปเป็นนัยได้ว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากแก๊สคลอไรด์และดินขาวเผาอัตราส่วนที่เหมาะสมของทรายและหินเมื่อเทียบกับวัสดุประสานตั้งต้นทั้งสองของการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต 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 มีความเป็นไปได้ว่าการใช้ดินขาวเผาที่มีความละเอียดสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีตั้งแต่ระยะต้น และความเป็นอสัณฐานของสารประกอบหลักของดินขาวเผารวมถึงขั้นตอนการผสมสารอัลคาไลน์ที่เกิดความร้อนสูงในขณะผสม ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ตอนผสมวัสดุ

4.3 ตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุเหลือทิ้งของกระบวนการผลิตเหล็ก เกิดจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน กับซิลิกอนและอลูมินาจากเหล็กและถ่านโค้ก เมื่อกระทบความเย็นเกิดการแข็งตัว แล้วนำตะกรันเหล็กไปบดให้ละเอียดเหมือนการบดเม็ดปูน จาก **Table 1** ตะกรันเหล็กมี SiO_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่มีปริมาณร้อยละ 34-36 และ 36-39 ตามลำดับ ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละพื้นที่ และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนตะกรันเหล็กต่อสารอัลคาไลน์ที่ 2.4-3.6 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สคลอไรด์และดินขาวเผา พบว่ามีอัตราส่วนที่สูงกว่า เนื่องจากตะกรันเหล็กมีค่าความถ่วงจำเพาะ (3.10 [60]) สูงกว่าแก๊สคลอไรด์และดินขาวเผา ทำให้ต้องใช้ปริมาณตะกรันเหล็กปริมาณมากกว่าถึงจะทำให้

เกิดการเคลือบมวลรวมได้อย่างทั่วถึง ในขณะที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ทราวยต่อสารอัลคาไลน์ และหินต่อสารอัลคาไลน์มีค่าใกล้เคียงกันกับเถ้าลอยและดินขาวเผา

ตะกรันหลักส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นรวมกับวัสดุอื่น เช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติของซีโอฟลิเมอร์จากเถ้าลอยให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากซีโอฟลิเมอร์จากเถ้าลอยอย่างเดียวจะเกิดปฏิกิริยาได้ต่ำกว่า และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของผลึก [61] โดยส่วนใหญ่การผสมตะกรันหลักจะผสมกับเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำเพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณมากในตะกรันหลัก การมีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณน้อยทำให้ซีโอฟลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องการการบ่มที่อุณหภูมิสูงถึงสามารถให้กำลังได้ดีที่อายุ 28 วัน ดังนั้นการผสมตะกรันหลักสามารถเอาชนะข้อเสียเปรียบข้างต้น อย่างไรก็ตาม การผสมตะกรันหลักที่มีปริมาณที่เหมาะสมต่อสมบัติของระยะเวลาก่อตัวความสามารถทำงานได้ สมบัติทางกลและความทนทาน โดยเฉพาะสมบัติด้านกำลังอัด [Hojati and Radlition \[62\]](#) ทำการศึกษากำลังอัดของซีโอฟลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกรันหลักร้อยละ 10, 15 และ 20 พบว่าการใช้ตะกรันหลักร้อยละ 20 สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุดโดยการบ่มอากาศ [Chithambaram และคณะ \[63\]](#) ทำการเพิ่มปริมาณตะกรันหลักมากขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และพบว่าการใช้ตะกรันหลักร้อยละ 30 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดได้ดีที่สุด และจากการตรวจสอบด้านโครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นถึงความแน่นเป็นของเนื้อเดียวกันของซีโอฟลิเมอร์ และจากงานวิจัยอื่น ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าการแทนที่ตะกรันหลักร้อยละ 20-30 ในเถ้าลอยส่งผลให้ได้กำลังอัดที่ดี [64-66] ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มร้อน

4.4 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันสามารถจัดให้อยู่ในวัสดุพอลิซิลิโคนชนิดหนึ่ง เนื่องจากผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ยังอยู่ในปริมาณสูงดัง [Table 1](#) เป็นที่ยอมรับในการแทนที่ในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มสมบัติของมอร์ตาร์ และคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น เช่น ด้านกำลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงการใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นในการผลิตซีโอฟลิเมอร์พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 ปริมาณมาก ในขณะที่มีปริมาณ Al_2O_3 อยู่เล็กน้อย จึงไม่

กำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย และดินขาวเผา ในขณะที่ตะกรันหลักมี CaO ปริมาณสูงซึ่งจะส่งผลดีต่อกำลังของซีโอฟลิเมอร์ ผลขององค์ประกอบทางเคมีที่มีสัดส่วนของ SiO_2 กับ Al_2O_3 แตกต่างกันมากนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมมากนักในการใช้เป็นวัสดุประสานตั้งต้นหลักในการผลิตซีโอฟลิเมอร์ ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการแทนที่บางส่วนในดินขาวเผาหรือใช้วัสดุประสานชนิดอื่นเข้ามาแทนที่ซึ่งจะทำให้สมบัติดีขึ้น [Hawa และคณะ \[6\]](#) ได้มีการศึกษาซีโอฟลิเมอร์จากดินขาวเผาเพื่อใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเข้ากับดินขาวเผาโดยการแทนที่บางส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง และการยึดหน่วงของซีโอฟลิเมอร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ส่งผลให้กำลังอัดดีขึ้นเมื่อใช้การบ่มร้อน 2 ชั่วโมง แต่การหดตัวแบบแห้งมีค่าสูงกว่าซีโอฟลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และที่น่าสังเกตว่าผลการทดสอบความสามารถในการยึดหน่วงมีค่าสูงกว่าซีโอฟลิเมอร์ดินขาวล้วนเป็นอย่างมากประมาณ 5 เท่า [Hawa และคณะ \[67\]](#) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำที่ใช้ผสมซีโอฟลิเมอร์ พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งต้นเท่ากับ 0.45 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ในทุกปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสม นอกจากนั้นการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังสามารถลดการสูญเสียกำลังและน้ำหนักเมื่อแช่ในกรดซัลฟูริก และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ส่งผลต่อกำลังอัดด้วยเนื้อซีโอฟลิเมอร์ที่แน่นมีรูพรองจำนวนน้อยดัง [Figure 2](#)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพยายามศึกษาการใช้เฉพาะเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุตั้งต้น ในการผลิตซีโอฟลิเมอร์ โดยที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี SiO_2 ปริมาณมาก แต่มี Al_2O_3 ปริมาณน้อยมากดัง [Table 1](#) สัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่เหมาะสม ส่งผลต่อกำลังของซีโอฟลิเมอร์ แต่ด้วยการที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณมากในประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ที่ปลูกปาล์มน้ำมันจำนวนมากและยังมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้เกิด ของเหลือทิ้ง (Waste) จำนวนมาก โดยเฉพาะทางภาคใต้ของประเทศไทย ทำให้ได้มีการศึกษาซีโอฟลิเมอร์จาก

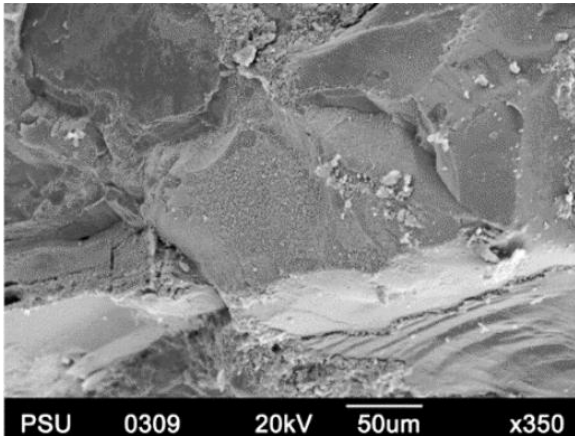


Figure 2 โครงสร้างระดับจุลภาคจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 [67]

เถ้าปาล์มน้ำมันโดยผสมรวมกับผงอลูมินาเพื่อเพิ่มปริมาณของ Al_2O_3 Hawa [11] ได้มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงสมบัติด้วยผงอลูมินาใช้กากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวม การใช้ผงอลูมินาร้อยละ 5 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อกากเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 1.4 โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดที่ 18.99 เมกะพาสคัล ที่อายุ 28 วัน การผสมอลูมินาสามารถช่วยด้านกำลังได้อย่างชัดเจน จากการที่เถ้าปาล์มน้ำมันมี 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] G. Habert, J. B. D. de Lacaillerie, and N. Roussel, "An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 11, pp. 1229–1238, Jul. 2011.
- [2] J. X. Peng, L. Huang, Y. Zhao, P. Chen, L. Zeng, and W. Zheng, "Modeling of Carbon Dioxide Measurement on Cement Plants," *Advanced*

Review article

2(1), 39-53

- Materials Research*, vol. 610–613, pp. 2120–2128, Dec. 2012.
- [3] C. Tam, M. Taylor, and D. Gielen, Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry, 2006, IEA-WBCSD workshop.
- [4] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, “Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction,” *Construction and Building Materials*, vol. 56, pp. 113–127, April 2014.
- [5] J. Davidovits, (1994). “Global warming impact on the cement and aggregates industries,” *World Resource Review*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278, July 1994.
- [6] A. Hawa, D. Tonnyayopas, W. Prachasaree, and P. Taneerananon, (2013). “Development and performance evaluation of very high early strength geopolymer for rapid road repair,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, 764180, August 2013.
- [7] A. Hawa, D. Tonnyayopas, W. Prachasaree, and P. Taneerananon, “Investigation the effects of oil palm ash in metakaolin based geopolymer,” *Ceramics-Silikaty*, vol. 7, no. 4, pp. 319-327, 2013.
- [8] A. Mohajerani, D. Suter, T. Jeffrey-Bailey, T. Song, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, and D. Law, “Recycling waste materials in geopolymer concrete,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, no. 3, pp. 493–515, January 2019.
- [9] J. Davidovits, “Geopolymers: inorganic polymeric new materials,” *Journal Thermal Analysis*, vol. 37, pp. 1633–1656, 1991.
- [10] M. Rabie, R. M. Irshidat, and N. Al-Nuaimi, “Ambient and heat-cured geopolymer composites: mix design optimization and life cycle assessment,” *Sustainability*, vol. 14, no. 9, pp. 1-17, April 2022.
- [11] A. Hawa, “Strength and microstructural of geopolymer mortar from palm oil ash containing aluminapowder with palm oil clinker aggregate,” *Engineering and Applied Science Research*, vol. 49, no. 6, pp. 731-743, October 2022.
- [12] M. S. Morsy, S. H. Alsayed, Y. Al-Salloum, and T. Almusallam, “Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 4333-4339, April 2014.
- [13] F. N. Degirmenci, “Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on durability of geopolymer mortars containing natural and artificial pozzolans,” *Ceramics-Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 340-350, 2017.
- [14] S. V. Patankar, Y. M. Ghugal, and S. S. Jamkar, “Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar,” *Indian Journal of Materials Science*, vol. 2014, 938789, May 2014.
- [15] A. Abdullah, K. Hussin, M. M. A. B. Abdullah, Z. Yahya, W. Sochacki, R. A. Razak, K. Bloch, and H. Fansuri, “The effects of various concentrations of NaOH on the inter-particle gelation of a fly ash geopolymer aggregate,” *Materials*, vol. 14, no. 5, 1111, February 2021.
- [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] S. V. Patankar, S. S. Jamkar, and Y. M. Ghugal, “Effect of fineness of fly ash on flow and compressive strength of geopolymer



- concrete,” *Indian Concrete Journal*, vol. 87, no. 4, pp. 57-61, April 2013.
- [18] อาปีเต็ง ฮาวา ปรีชา สะแลแม ชูลกิพลี มามะ ชูลกิพลี เดมะ และวรพจน์ ประสาเสรี, “สมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์แก้าลอยที่ใช้เศษยางรถยนต์เป็นมวลรวมละเอียด” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 45, ฉบับที่ 1, หน้า 125-144, มกราคม-มีนาคม 2565
- [19] A. Elimbi, H. K. Tchakoute, and D. Njopwouo, “Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 6, pp. 2805-2812, June 2011.
- [20] A. S. Albidah, “Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: A review,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 11, pp. 14923-14943, June 2021.
- [21] N. H. Jamil, M. M. A. B. Abdullah, F. C. Pa, H. Mohamad, W. M. A. W. Ibrahim, and J. Chairapa, “Influences of SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 14922-14932, November–December 2020.
- [22] E. Tiffo, J. B. B. Mbah, P. D. B. Belibi, J. N. Y. Djobo, and A. Elimbi, “Physical and mechanical properties of unheated and heated kaolin based-geopolymers with partial replacement of aluminium hydroxide,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 239, 122103, January 2020.
- [23] G. Liang, H. Zhu, H. Li, and H. Guo, “Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin - based geopolymer,” *Construction and Building Materials*, vol. 293, 123486, July 2021.
- [24] O. A. Mayhoub, E. A. R. Nasr, Y. Ali, and M. Kohail, “Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 99-105, March 2021.
- [25] M. Zerkouri, S. Alehyen, R. Hamzaoui, L. Ziyani, and A. Loukili, “Durability of Moroccan fly ash-based geopolymer binder,” *Materials Letters*, vol. 304, 13673, December 2021.
- [26] O. Shee-Ween, H. Cheng-Yong, L. Yun-Ming, M. M. A. B. Abdullah, H. L. Ngee, L. W. L. Chan, O. Wan-En, N. A. Jaya, and N. Yong-Sing, “Cold-pressed fly ash geopolymers: effect of formulation on mechanical and morphological characteristics,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 3028-3046, November–December 2021.
- [27] P. Payakaniti, N. Chuewangkam, R. Yensano, S. Pinitsoontorn, and P. Chindaprasirt, “Changes in compressive strength, microstructure and magnetic properties of a high-calcium fly ash geopolymer subjected to high temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 265, 120650, December 2020.
- [28] X. Jiang, Y. Zhang, R. Xiao, P. Polaczyk, M. Zhang, W. Hu, Y. Bai, and B. Huang, “A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 270, 122500, October 2020.
- [29] P. Qian, L. Y. S. Wang, Y. Alrefaei, and J. G. Dai, “Experimental study on full-volume fly ash geopolymer mortars: Sintered fly ash versus sand as fine aggregates,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, 121445, August 2020.

- [30] P. Nuaklong, A. Wongsu, V. Sata, K. Boonserm, J. Sanjayan, and P. Chindaprasirt, "Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate," *Heliyon*, vol. 5, no. 9, e02513, September 2019.
- [31] S. K. Shill, S. Al-Deen, M. Ashraf, and W. Hutchison, "Resistance of fly ash based geopolymer mortar to both chemicals and high thermal cycles simultaneously," *Construction and Building Materials*, vol. 239, 117886, April 2020.
- [32] P. Chindaprasirt and U. Rattanasak, "Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application," *Advanced Powder Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 2317-2324, September 2017.
- [33] S. C. Moghaddam, R. Madandoust, M. Jamshidi, and I. M. Nikbin, "Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 281, 122571, April 2021.
- [34] A. Wongkvanklom, P. Posi, A. Kampala, T. Kaewngao, and P. Chidaprasirt, "Beneficial utilization of recycled asphaltic concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, e00615, December 2021.
- [35] M. T. Ghafoor, Q. S. Khan, A. U. Qazi, M. N. Sheikh, and M. N. S. Hadi, "Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 273, 121752, March 2021.
- [36] 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, July 2014.
- [37] P. K. Sarker, S. Kelly, and Z. Yao, "Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 584-592, November 2014.
- [38] I. P. Segura, P. A. Jensen, A. J. Damo, N. Ranjbar, L. S. Jensen, and M. Canut, "Influence of sodium-based activators and water content on the fresh and hardened properties of metakaolin geopolymers," *SN Applied Sciences*, vol. 4, 283, September 2022.
- [39] M. S. Saif, M. O. P. El-Hariri, A. I. Sarie-Eldin, B. A. Tayeh, and M. F. Farag, "Impact of Ca⁺ content and curing condition on durability performance of metakaolin-based geopolymer mortars," *Case Studies in Construction and Materials*, vol. 16, e00922, June 2022.
- [40] H. Tanyildizi, M. Ziada, M. Uysal, N. D. Güngör, and A. Coskun, "Comparison of bacteria-based self-healing methods in metakaolin geopolymer mortars," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, e00895, June 2022.
- [41] A. Hawa, D. Tonayopas, and W. Prachasaree, "Performance evaluation and microstructure characterization of metakaolin-based geopolymer containing oil palm ash," *Scientific World Journal*, vol. 2013, 857586, October 2013.
- [42] M. S. Eisa, E. A. Fahmy, and M. E. Basiouny, "Using metakaolin-based geopolymer



- concrete in concrete pavement slabs,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, no. 1, October 2021.
- [43] M. S. Eisa, M. E. Basiouny, and E. A. Fahmy, “Drying shrinkage and thermal expansion of metakaolin-based geopolymer concrete pavement reinforced with biaxial geogrid,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, e01415, December 2022.
- [44] A. Albidah, A. Alsaif, A. Abadel, H. Abbas, and Y. Al-Salloum, “Role of recycled vehicle tires quantity and size on the properties of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, pp. 2593-2607, May–June 2022.
- [45] A. Albidah, A. Altheeb, F. Alrshoudi, A. Abadel, H. Abbas, and Y. Al-Salloum, “Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete,” *Structures*, vol. 27, pp. 1582-1593, October 2020.
- [46] A. B. Moradikhrou, A. Esparham, and M. J. Avnaki, “Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 251, 118965, August 2020.
- [47] R. Abbas, M. A. Khereby, H. Y. Ghorab, and N. Elkhoshkhany, “Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 22, pp. 669-687, January 2020.
- [48] F. N. Al-Husseinawi, W. Atherton, Z. Al-Khafaji, M. Sadique, and M. Z. Yaseen, “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*, vol. 2022, 5910701, October 2022.
- [49] Z. Ou, R. Feng, T. Mao, and N. Li, “Influence of mixture design parameters on the static and dynamic compressive properties of slag-based geopolymer concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 53, 104564, August 2022.
- [50] S. Oyebisi, F. Olutoge, P. Kathirvel, I. Oyaotuderekumor, D. Lawanson, J. Nwani, A. Ede, and R. Kaze, “Sustainability assessment of geopolymer concrete synthesized by slag and corncob ash,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, e01665, December 2022.
- [51] M. A. Salih, A. A. A. Ali, and N. Farzadnia, “Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste,” *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 592-603, August 2014.
- [52] N. Ranjbar, M. Mehrali, U. J. Alengaram, H. Simon, H. S. C. Metselaar, and M. Z. Jumaat, “Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 144-121, August 2014.
- [53] B. A. Salami, Z. A. Johari, and M. Maslehuddin, “Impact of added water and superplasticizer on early compressive strength of selected mixtures of palm oil fuel ash-based engineered geopolymer composites,” *Construction and Building Materials*, vol. 109, pp. 198-206, April 2016.
- [54] P. Nuaklong, A. Wongsas, V. Sata, K. Boonserm, J. Sanjayan, and P. Chindaprasirt, “Properties of high-calcium and low-calcium fly ash

Review article

2(1), 39-53

- combination geopolymers mortar containing recycled aggregate,” *Heliyon*, vol. 5, e02513, September 2019.
- [55] S. S. Jamkar, Y. M. Ghugal, and S. V. Patankar, “Effect of fly ash fineness on workability and compressive strength of geopolymer concrete,” *Indian Concrete Journal*, vol. 87, no. 4, pp. 57-62, April 2013.
- [56] A. Noushini and A. Castel, “The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 464-477, June 2016.
- [57] P. Sajan, T. Jiang, C. Lau, G. Tan, and Ng Kan, “Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer,” *Cleaner Materials*, vol. 1, 100002, December 2021.
- [58] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, and C. Yue, “Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer,” *Applied Clay Science*, vol. 43, no. 2, pp. 218-223, February 2009.
- [59] M. R. Wang, D. C. Jia, P. G. He, and Y. Zhou, “Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer,” *Materials Letters*, vol. 64, no. 22, pp. 2551-2554, November 2010.
- [60] S. Oyebisi, F. Olutoge, P. Kathirvel, I. Oyaotuderekumor, D. Lawanson, J. Nwani, A. Edi, and R. Kaze, “Sustainability assessment of geopolymer concrete synthesized by slag and corncob ash,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, e01665, December 2022.
- [61] A. Kumar and R. Kumar, “Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer,” *Ceramics International*, vol. 37, pp. 533-541, March 2011.
- [62] M. Hojati and A. Radlin, “Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements,” *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 808-816, September 2017.
- [63] S. J. Chithambaram, S. Kumar, and M. M. Prasad, “Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 100-108, July 2019.
- [64] P. Nath, and P. K. Sarker, “Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition,” *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 163-171, September 2014.
- [65] N. Ismail and H. El-hassan, “Development and characterization of fly ash – slag blended geopolymer mortar and lightweight concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 1-14, January 2018.
- [66] Y. Ling, K. Wang, W. Li, G. Shi, and P. Lu, “Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites,” *Composite Part B Engineering*, vol. 164, pp. 747-757, May 2019.
- [67] A. Hawa, D. Tonnyopas, and W. Prachasaree, “Effect of water-to-powder ratios on the compressive strength and microstructure of metakaolin based geopolymers,” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, vol. 24, pp. 499-506, December 2017.