

# ผลกระทบของดินขาวเผาต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

ณัฐชา พงษ์ธาสาริกร กิม เหนือคลอง\* และ ชนะชัย ทองโฉม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: npeem@engr.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 มกราคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 29 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 29 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 กรกฎาคม 2566

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของดินขาวเผาต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าลอยเสริมเส้นใยเหล็ก โดยดินขาวเผานำมาใช้เพื่อทดแทนเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็กต่อสมบัติของมอร์ตาร์ ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าการแผ่ไหล หน่วยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด ผลทดสอบพบว่าการใช้ดินขาวเผาร้อยละ 10 และ 30 มีความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 4.21 และ 5.06 MPa ตามลำดับ และการเสริมเส้นใยเหล็กสามารถใช้เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและแรงดัดได้ อย่างไรก็ตามการแผ่ไหลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเผาและเส้นใยเหล็กในส่วนผสมปริมาณร้อยละ 7.47 ถึง 25.67 และ 6.34 ถึง 30.27 ตามลำดับ และหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงมากที่สุดปริมาณร้อยละ 4.29 เมื่อปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น แต่หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นสูงสุดปริมาณร้อยละ 6.06 เมื่อใส่เส้นใยเหล็ก

**คำสำคัญ:** เถ้าลอยแคลเซียมสูง; ดินขาวเผา; จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์; เส้นใยเหล็ก

# Influence of Metakaolin on Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Mortar Reinforced with Steel Fibers

Natcha Phudtisarigorn, Peem Nuaklong\* and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

\* Corresponding author, E-mail: npeem@engr.tu.ac.th

Received: 26 January 2023; Revised: 29 May 2023; Accepted: 29 May 2023

Online Published: 31 July 2023

**Abstract:** This research aimed to study the influence of metakaolin on the properties of fly ash geopolymer mortar mixed with steel fibers. The metakaolin was used to replace high calcium fly ash at the percentages of 0, 10, 20, and 30 by weight. The effect of fiber content on the properties of the mortar was also studied. The slump flow, unit weight, compressive strength, and flexural strength were investigated. The results showed that the use of metakaolin at the percentages 10 and 30 have the highest value of compressive strength and flexural strength 4.21 and 5.06 MPa, respectively. Steel fibers can be used to increase compressive strength and flexural strength. However, the slump flow was decreased when the metakaolin and the fiber were added at the percentages 7.47 to 25.67 and 6.34 to 30.27, respectively. In addition, the unit weight of geopolymer mortar decreased at the percentage of 4.29 when metakaolin was increased. In contrast, the unit weight of geopolymer mortar was increased at the percentage of 6.06 by the addition of steel fiber.

**Keywords:** High calcium fly ash; Metakaolin; Geopolymer mortar; Steel fiber



## 1. บทนำ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการก่อสร้าง ช่วยส่งผลต่อการเติบโตของระบบเศรษฐกิจ แต่กิจกรรมต่าง ๆ ที่ผลิตได้ปูนซีเมนต์ ก็ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และการพัฒนาที่ยั่งยืน เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1,000 กิโลกรัมจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 730 ถึง 850 กิโลกรัม [1] ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ทั่วโลกมีปริมาณมากถึง 4 พันล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้น [2]

วัสดุซีเมนต์เสริม (Supplementary Cementitious Materials, SCMs) ถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ไม่ว่าจะเป็น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าถ่านหิน ถ้ำกลบ และซิลิกาฟูม ฯลฯ โดยการนำ SCM มาใช้นอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย เนื่องจากมีราคาที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ แต่การใช้ SCM ก็ไม่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด จึงมีการพัฒนาวัสดุประสานสำหรับผลิตวัสดุซีเมนต์ที่ไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเกิดจากการนำวัสดุอลูมิเนียมซิลิเกตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮดรอกไซด์และซิลิเกต ซึ่งมีความเข้มข้นเหมือนกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งยังรับกำลังได้ดีภายหลังการก่อตัว โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) [3]

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์จากเถ้าลอยสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ และยังช่วยลดปริมาณเถ้าลอย ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้อีกด้วย เนื่องจากเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้

ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยมีปริมาณมากกว่า 500 ล้านตันต่อปี แต่เถ้าลอยกลับถูกนำมาใช้ในวัสดุ SCM เพียงร้อยละ 20 ถึง 30 เท่านั้น [4] อย่างไรก็ตาม ปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่ช่วยในการพัฒนากำลังในเถ้าลอยมีปริมาณน้อยกว่าในดินขาวเผา โดยเฉพาะในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีซิลิกาปริมาณร้อยละ 15 ถึง 45 และอลูมินาปริมาณร้อยละ 10 ถึง 25 โดยน้ำหนัก [4] ในขณะที่ดินขาวเผามีซิลิกาประมาณร้อยละ 49 ถึง 52 และอลูมินาประมาณร้อยละ 40 ถึง 43 โดยน้ำหนัก [5] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ดินขาวเผาแทนที่เถ้าลอยบางส่วน สำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่รับกำลังสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

ปัจจุบันเส้นใย (Fibers) มีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาสมบัติทางกล การยึดหดตัว และความทนทานในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต [6] โดยเฉพาะการเสริมเส้นใยเหล็กได้รับความนิยมอย่างมากในวัสดุซีเมนต์ เนื่องจากช่วยลดรอยแตกร้าวในวัสดุแข็งเปราะทนทานต่อแรงกระทำซ้ำ (Fatigue) ได้ดี [7] อีกทั้งยังเพิ่มกำลังตัด ความเหนียว และกำลังรับแรงเฉือน ให้แก่วัสดุซีเมนต์ [8] รวมไปถึงลดการหดตัว การคืบ (Creep) และความซึมผ่านได้ของน้ำ [9] ตลอดจนช่วยเสริมการรับกระแทกและต้านทานแรงระเบิดได้เป็นอย่างดี [10]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่ทำจากเถ้าลอย และมีการแทนที่ด้วยดินขาวเผา โดยทดสอบหาสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าการแผ่ไหล กำลังอัด กำลังตัด และพฤติกรรมรับแรงดัดและการโก่งตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



## 2. วัสดุและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุ

#### 2.1.1 วัสดุตั้งต้น

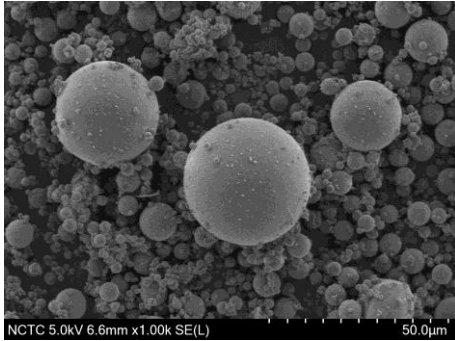
ในการศึกษานี้จะใช้ถ้ำลอยจากการเผา ถ่านหินที่โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ส่วนดินขาวเผาได้จากการนำดินขาวไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบดใน เครื่องบดถ้ำเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความ ละเอียด ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำของ Provis และ คณะ [11] โดยรายละเอียดทางเคมีและทางกายภาพ ของถ้ำลอยและดินขาวเผา แสดงในตารางที่ 1 จะ เห็นได้ว่าดินขาวเผาและถ้ำลอยมีค่าความละเอียด เท่ากับ 14,900 และ 2,250  $\text{cm}^2/\text{g}$  ตามลำดับ แสดง ว่าดินขาวเผามีความละเอียดมากกว่าถ้ำลอย ถ้ำลอยและดินขาวเผาที่มีประมาณซิลิกาและอลูมินา เป็นหลัก โดยถ้ำลอยมีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 23.5 และ 10.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนดินขาวเผาที่มีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 57.2 และ 28.5 โดย น้ำหนัก ตามลำดับ แต่ในถ้ำลอยจะพบปริมาณ แคลเซียม ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 31.8 โดยน้ำหนัก จัดเป็น ถ้ำลอยแคลเซียมสูงตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [12] เนื่องจากมีปริมาณร้อยละของแคลเซียมมากกว่า 18.0 และโครงสร้างระดับจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM) ของถ้ำลอยและดิน ขาวเผาในรูปแบบที่ 1(ก) และ 1(ข) แสดงให้เห็นว่าถ้ำ ลอยมีลักษณะอนุภาคกลมมน ในขณะที่ดินขาวเผา มี ลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม

ตารางที่ 1 รายละเอียดทางเคมีและทางกายภาพของ วัสดุตั้งต้น

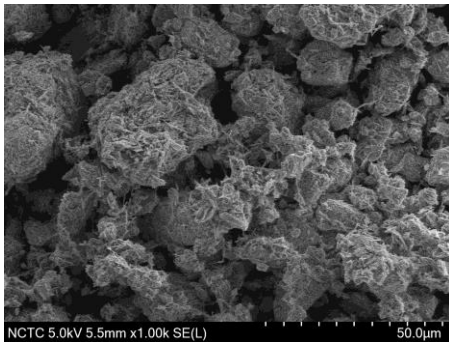
องค์ประกอบ (wt.%)	ถ้ำลอย แคลเซียมสูง (HCF)	ดินขาว (MK)
$\text{SiO}_2$	23.5	57.2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10.1	28.5
$\text{CaO}$	31.8	3.70
$\text{FeO}_3$	22.4	4.66
$\text{Na}_2\text{O}$	1.15	-
$\text{TiO}_2$	0.68	-
$\text{MgO}$	1.68	0.76
$\text{K}_2\text{O}$	3.49	5.35
$\text{SO}_3$	5.08	-
LOI	0.40	5.40
Retained in sieve No.325 (%)	34.8	2.0
Blain fineness ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	2,250	14,900

#### 2.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ , NH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ (M) ซึ่งต้อง เตรียมก่อนการผสมมอร์ต้าร์เป็นเวลา 1 วัน เนื่องจาก ลดผลกระทบจากความร้อนที่จะส่งผลต่อการทำ ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการละลายเกล็ด โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 400 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , NS) เกรด การค้า ที่มีปริมาณร้อยละของ  $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 9.8 61.5 และ 28.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สารละลายประเภทนี้จะถูกใช้ควบคู่ไปกับสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์



(ก) ฝัากลอย



(ข) ดินขาวเผา

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของฝัากลอยและดินขาวเผา



รูปที่ 2 เส้นใยเหล็ก

ตารางที่ 2 สมบัติพื้นฐานของทรายแม่น้ำ

สมบัติพื้นฐานของทราย	มาตรฐานการทดสอบ	ผลการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	ASTM C128	2.68
โมดูลัสความละเอียด	ASTM C136	2.62
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	ASTM C128	0.58
หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C29	1,778

ตารางที่ 3 สมบัติของเส้นใยเหล็ก

สมบัติของเส้นใยเหล็ก (ข้อมูลจากผู้จัดจำหน่าย)	
ความยาว ( $l_f$ )	13 mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $d_f$ )	0.2 mm
กำลังรับแรงดึง	2,750 MPa
โมดูลัสความยืดหยุ่น	200 GPa
ความถ่วงจำเพาะ	7.85

### 2.1.3 มวลรวมละเอียด

งานวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำที่หาได้ทั่วไปเป็นมวลรวมละเอียด โดยทรายตัวอย่างที่ใช้ในการผสมอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ซึ่งจากการทดสอบสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM [13-15] แสดงในตารางที่ 2

### 2.1.4 เส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กที่ใช้เป็นโลหะทองเหลือง (Brass Coated Steel Fibres) ซึ่งมีคุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ข้อมูลจากผู้จัดจำหน่าย โดยลักษณะทางกายภาพและสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเส้นใยเหล็ก แสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 3



## 2.2 ส่วนผสม วิธีการผลิต และรายละเอียดในการทดสอบ

### 2.2.1 ส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งส่วนผสมออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมละลายต่าง (NH+NS) ต่อวัสดุตั้งต้น (เถ้าลอยแคลเซียมสูง, HCF ผสมกับดินขาวเผา, MK) มีค่าเท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราส่วน NS ต่อ NH มีค่าเท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก ปริมาณทรายต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก โดยงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าลอย

แคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นหลัก และแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้มีสัญลักษณ์ย่อเป็น 0MK, 10MK, 20MK และ 30MK ตามลำดับ ในขณะที่ตัวเลขที่กำกับอยู่ด้านหลังจะบ่งบอกถึงปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่เพิ่มโดยปริมาตรของส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสม 30MK-1 และ 30MK-2 คือ ส่วนผสมที่ใช้ดินขาวเผาแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตร มอร์ตาร์ [16] ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

กลุ่มที่	ส่วนผสม	โซเดียมซิลิเกต (g)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)	ทราย (g)	เถ้าลอยแคลเซียมสูง (g)	ดินขาวเผา (g)	เส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตร)
1	0MK	30	30	275	100	0	-
	10MK	30	30	275	90	10	-
	20MK	30	30	275	80	20	-
	30MK	30	30	275	70	30	-
2	0MK-1	30	30	275	100	0	1
	10MK-1	30	30	275	90	10	1
	20MK-1	30	30	275	80	20	1
	30MK-1	30	30	275	70	30	1
3	0MK-2	30	30	275	100	0	2
	10MK-2	30	30	275	90	10	2
	20MK-2	30	30	275	80	20	2
	30MK-2	30	30	275	70	30	2



## 2.2.2 วิธีการผสม

การผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จะใช้ระยะเวลาประมาณ 9 นาที วิธีการผสมจะเริ่มจากการคลุกเคล้า HCF และ MK ให้เข้ากันโดยใช้เครื่องในโม่ผสม จากนั้นจึงใส่ NH และเดินเครื่องผสมเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงใส่ทรายและเส้นใยเหล็ก (ในขณะที่เครื่องผสมยังทำงานอยู่) แล้วผสมต่อไปอีก 3 นาที แล้วจึงใส่ NS ในขั้นตอนสุดท้ายโดยใช้เวลาผสมเพิ่มอีก 3 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างโดยเทตัวอย่างลงในแบบหล่อที่มีขนาดต่าง ๆ ทำการอัดแน่นตัวอย่างโดยใช้วิธีการทุ้งแล้วห่อตัวอย่างด้วยพลาสติก นำตัวอย่างเข้าเตาอบ หลังจากการผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้นเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (บ่มทั้งแบบหล่อที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกฟิล์ม) ทำการแกะแบบและห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกอีกครั้ง เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

## 2.2.3 รายละเอียดในการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบแสดงในตารางที่ 5 โดยระบุถึงสมบัติของมอร์ตาร์และขนาดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งได้แก่ ค่าการแผ่ไหล กำลังอัด และกำลังตัด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611 [17] ASTM C39 [18] และ ASTM C1609 [19] ตามลำดับ

## 3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

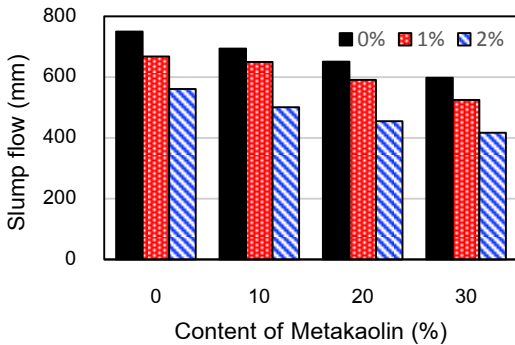
### 3.1 ค่าการแผ่ไหล (Slump flow)

จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการแผ่ไหลแสดงดังรูปที่ 3 โดยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลันเตาแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีค่าการ

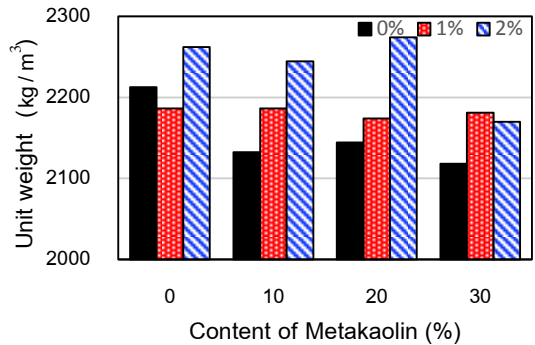
แผ่ไหลเท่ากับ 750, 694, 651 และ 598 mm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่ดินขาวเผาเพิ่มขึ้น ค่าการแผ่ไหลจะมีค่าลดลง เนื่องจากดินขาวเผามีความละเอียดสูง และมีอนุภาคแบบเหลี่ยม ดังนั้นการใส่ดินขาวเผาเพิ่มขึ้นจะลดความสามารถในการแผ่ไหลลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นไปตามงานวิจัยของ Kong และคณะ [20] กล่าวว่าถั่วลันเตามีความสามารถในการแผ่ไหลที่ดีกว่าดินขาวเผา และ Brooks และ Johari [21] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเผา ทำให้ความสามารถในการไหลแผ่ลดลง ส่วนตัวอย่างที่ใช้ถั่วลันเตาแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และเสริมด้วยเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 668, 650, 591 และ 525 mm ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ใช้ปริมาณดินขาวเผาเท่ากัน แต่ใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 2 มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 561, 501, 455 และ 417 mm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ใส่เส้นใยเหล็กมากขึ้นจะมีค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากเส้นใยเหล็กเป็นตัวเชื่อมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ให้จับตัวกันมากขึ้น โดยเป็นไปตามงานวิจัยของ Sayyad และ Patankar [22] และ Ranjbar และ Zhang [23] ที่สรุปว่าการใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการแผ่ไหลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

**ตารางที่ 5** รายละเอียดการทดสอบสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

สมบัติ	ขนาดตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	มาตรฐาน การทดสอบ
ค่าการแผ่ไหล	-	ASTM C1611
กำลังอัด	Ø10 x 20	ASTM C39
กำลังตัด	10 x 10 x 35	ASTM C1609



รูปที่ 3 การแผ่ไหลของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ

### 3.2 หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,213, 2,132, 2,144 และ 2,118 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของดินขาวเผาจะส่งผลให้ตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องมาจากความหนาแน่นรวมของดินขาวนั้นต่ำ เพราะดินขาวมีความละเอียดมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nuaklong และ Chindaprasirt [24] และ Cheng และ Chiu [25] กล่าวว่าตัวอย่างที่มีปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้นเป็นผลให้หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างลดลง ส่วนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใส่ถั่วลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,186, 2,186, 2,174 และ 2,181 ตามลำดับ และที่ปริมาณดินขาวเผาเท่ากันเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,262, 2,245, 2,274 และ 2,170 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจะทำให้หน่วย

น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะไปลดปริมาตรรูพรุนภายในมอร์ตาร์ ทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบของ Sayyad และ Patankar [22] พบว่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น เมื่อใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น เพราะเส้นใยเหล็กทำให้ตัวอย่างประสานเป็นเนื้อเดียวกัน จึงลดโพรงอากาศภายในตัวอย่างได้ แต่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่ถั่วลอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 30 และเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 พบว่าหน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องจากการลดส่วนปริมาตรการแทนที่ถั่วลอยด้วยดินขาวเผาที่เยอะทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง รวมไปถึงการใส่เส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่มากอาจทำให้ตัวอย่างเกิดรูพรุนภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [23]

### 3.3 กำลังอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ จากผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ถั่วลอยแล้วถูกแทนที่ด้วยดินเผาในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 52.3, 42.1, 38.8 และ 35.4 MPa ตามลำดับ ดังนั้นตัวอย่างที่มีการแทนที่ดินขาวเผาเพิ่ม

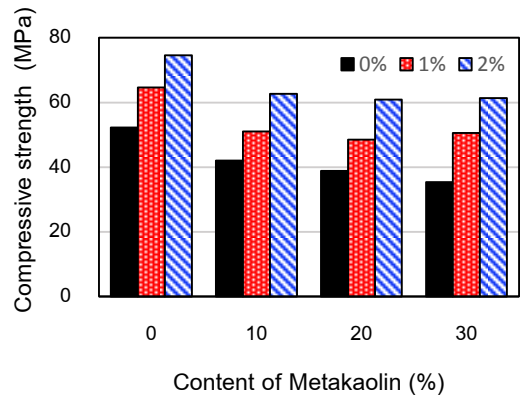




มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลง โดยถ้าต้องการแทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผา ปริมาณร้อยละดินขาวเผาที่เหมาะสมคือ 10 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย เนื่องจาก Hodhod และคณะ [26] กล่าวว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณร้อยละของเถ้าลอยมาก ส่งผลให้รูพรong และขนาดของช่องว่างภายในตัวอย่างลดน้อยลง และสรุปไว้ว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผา 10% มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่ดีกว่าการแทนที่ด้วยดินขาวเผา 50% และเมื่อดูผลของตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและแทนที่ด้วยดินขาวเผา 0%, 10%, 20% และ 30% โดยใส่เส้นใยเหล็ก 1% มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 64.7, 51.0, 48.5 และ 50.5 MPa ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก 2% ที่แทนที่ด้วยดินขาวเผาเท่ากันพบว่าสามารถรับ กำลังอัดได้เท่ากับ 74.6, 62.7, 60.9 และ 61.4 MPa ตามลำดับ นั่นคือตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กมากขึ้น ก็จะมีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้น เนื่องจากการใส่เส้นใยเหล็กมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง รวมไปถึงการใส่เส้นใยจะช่วยลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างได้ ดังนั้นจึงมีกำลังรับแรงอัดที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Sayyad และ Patankar [22], Ranjbar และ Zhang [23] และ Guo และ Pan [27] ที่สรุปไว้ว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น

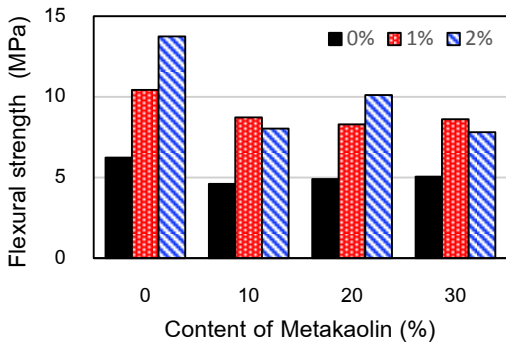
### 3.4 กำลังดัด (Flexural Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยและถูกแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของเถ้าลอยพบว่า มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 6.23, 4.60, 4.91 และ



รูปที่ 5 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบ

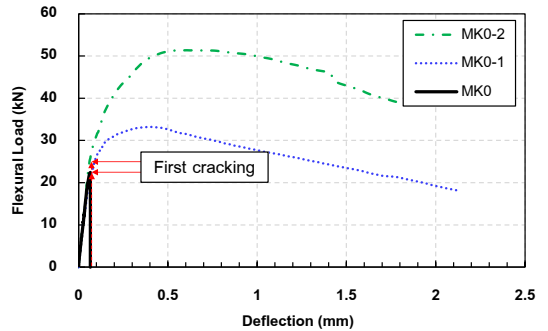
5.06 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบตัวอย่างที่แทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผา มีกำลังรับแรงดัดน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ด้วยดินขาว ส่วนตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 ที่แทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 10.44, 8.73, 8.29 และ 8.62 MPa ตามลำดับ และการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 ที่มีปริมาณดินขาวเผาเท่ากันพบว่า มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 13.75, 8.04, 10.12 และ 7.82 MPa ตามลำดับ ดังนั้นการเสริมเส้นใยเหล็กในตัวอย่างจะช่วยให้ความสามารถในการรับกำลังดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจีโอโพลิเมอร์มีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่เมื่อใส่เส้นใยจะทำให้เกิดพฤติกรรมแบบเหนียว [22-23] ดังนั้นการเสริมเส้นใยเหล็กจึงเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ แต่ปริมาณการเสริมเส้นใยที่มาก อาจทำให้ตัวอย่างเกิดช่องว่างภายในมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดัดได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Younis [28] โดยรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



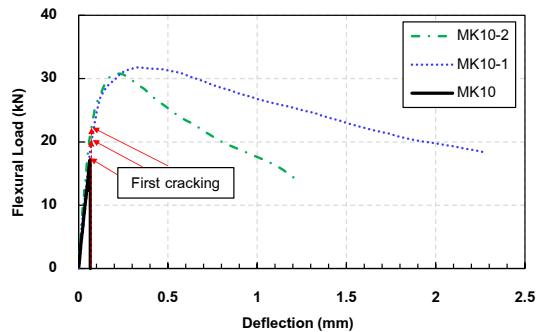
รูปที่ 6 กำลังดัดของตัวอย่างทดสอบ

### 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว

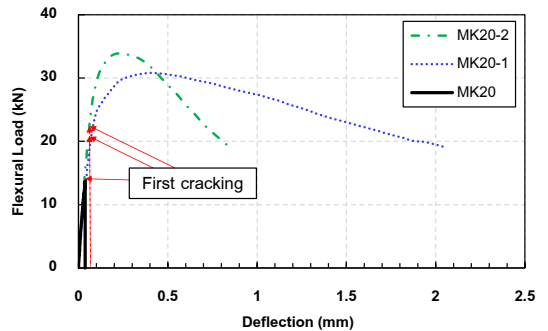
จากรูปที่ 7(ก) ถึง 7(ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมด้วยเส้นใยเหล็กที่ทำจากถั่วลันเตาและดินขาวเผา จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่เสริมเส้นใยเหล็กและแทนที่ถั่วลันเตาด้วยดินขาวเผาในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่าทุกตัวอย่างมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ แสดงว่าพฤติกรรมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มี พฤติกรรมแบบเปราะ [29] และตัวอย่างที่มีการแทนที่ด้วยดินขาวเผาในปริมาณที่เท่ากัน โดยมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1 และ 2 พบว่าเมื่อเกิดการแตกร้าวแรกเริ่มของตัวอย่าง (First Cracking Strength) ตัวอย่างสามารถรับกำลังได้ต่อจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งอาจจะมากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่รับได้ ณ การแตกร้าวครั้งแรก จากนั้นตัวอย่างจะรับกำลังได้ลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งเกิดจากการอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) ดังนั้นตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กจะเกิดพฤติกรรมแบบกึ่งเปราะ (Quasi Brittle) [29] โดยการใส่ปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การรับแรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



(ก) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 0

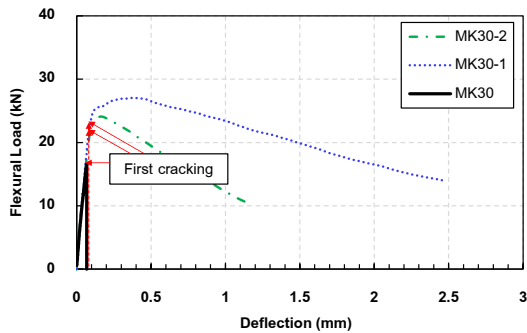


(ข) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 10



(ค) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 20

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการโก่งตัว



(ง) ปริมาณดินขาวเผาร้อยละ 30

## รูปที่ 7 ต่อ

## 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่ใช้แก้รอย และแทนที่ด้วยดินขาวเผา โดยต้องการหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็ก ร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยจะทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างได้แก่ การแผ่ไหล หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และกำลังดัด รวมไปถึงพฤติกรรมระหว่างแรงดัดและการโก่งตัวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแผ่ไหลของจีโอโพลิเมอร์พบว่าตัวอย่างที่ใส่ปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น จะทำให้การแผ่ไหลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก โดยแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันพบว่าการแผ่ไหลลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2. หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์พบว่าตัวอย่างที่ใส่ปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้น จะทำให้การหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลง และตัวอย่างที่เสริมเส้นใยเหล็ก โดยแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันพบว่า

หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น และการใส่เส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่มากขึ้น อาจส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลงด้วยเช่นกัน

3. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาบางส่วน พบว่าการแทนที่ด้วยดินขาวเผา มีกำลังรับแรงอัดลดลง และการแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด และเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นกำลังอัดก็เพิ่มขึ้น

4. กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากแก้รอยมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาบางส่วน แต่การแทนที่แก้รอยด้วยดินขาวเผาร้อยละ 30 มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด และเมื่อตัวอย่างที่แทนที่ดินขาวเผาในปริมาณเท่ากันแต่เสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณการเสริมเส้นใยที่มากเกินไป อาจทำให้ตัวอย่างเกิดช่องว่างภายในมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดัดได้

5. จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการโก่งตัว พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากแก้รอยแล้วแทนที่ด้วยดินขาวเผา มีพฤติกรรมแบบเปราะทั้งหมด และเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 1 และ 2 ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีพฤติกรรมแบบกึ่งเปราะ โดยปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็กที่มากขึ้นรับแรงสูงสุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. He, X. Zhu, J. Wang, M. Mu and Y. Wang, Comparison of CO<sub>2</sub> emissions from OPC and recycled cement production, *Construction and Building Materials*, 2019, 211, 965-973.
- [2] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra and R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO<sub>2</sub> emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203, 822-835.
- [3] J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 1991, 37(8), 1633-1656.
- [4] M. Ahmaruzzaman, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(3), 327-363.
- [5] C. Li, H. Sun and L. Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(9), 1341-1349.
- [6] A.A. Ahmed and Y. Jia, Effect of using hybrid polypropylene and glass fibre on the mechanical properties and permeability of concrete, *Materials*, 2019, 12(22), 3786.
- [7] W. Kaufmann, A. Amin, A. Beck and M. Lee, Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete, *Engineering Structures*, 2019, 186, 508-524.
- [8] R.I. Gilbert and E.S. Bernard, Post-cracking ductility of fibre reinforced concrete linings in combined bending and compression, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76, 1-9.
- [9] J.S. Lawler, D. Zampini and S.P. Shah, Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load, *Materials Journal*, 2002, 99(4), 379-385.
- [10] M.G. Chorzepa, M. Masud, A. Yaghoobi and H. Jiang, Impact test: Multiscale fiber-reinforced concrete including polypropylene and steel fibers, *ACI Structural Journal*, 2017, 114(6), 1429-1444.
- [11] J.L. Provis, P. Duxson and J.S. van Deventer, The role of particle technology in developing sustainable construction materials, *Advanced Powder Technology*, 2010, 21(1), 2-7.
- [12] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019.
- [13] ASTM C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, 2015.



- [14] ASTM C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2006.
- [15] ASTM C29/C29M, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, 2017.
- [16] P. Nuaklong, J. Chittanurak, P. Jongvivatsakul, W. Pansuk, A. Lenwari and S. Likitlersuang Effect of hybrid polypropylene-steel fibres on strength characteristics of UHPFRC, *Advances in Concrete Construction*, 2020, 10(1), 1-11.
- [17] ASTM C1611/C1611M, Standard Test Method for Slump Flow Of Self-Consolidating Concrete, 2018.
- [18] ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.
- [19] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2019.
- [20] D.L. Kong, J.G. Sanjayan and K. Sagoe-Crentsil, Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12), 1583-1589.
- [21] J.J. Brooks and M.M. Johari, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2021, 23(6), 495-502.
- [22] A.S. Sayyad and S.V. Patankar, Effect of steel fibres and low calcium fly ash on mechanical and elastic properties of geopolymer concrete composites, *Indian Journal of Materials Science*, 2013.
- [23] N. Ranjbar and M. Zhang, Fiber-reinforced geopolymer composites: A review, *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107, 103498.
- [24] P. Nuaklong, V. Sata and P. Chindapasirt, Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens, *Construction and Building Materials*, 2018, 161, 365-373.
- [25] T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 2003, 16(3), 205-210.
- [26] O.A. Hodhod, S.E. Alharthy and S.M. Bakr, Physical and mechanical properties for metakaolin geopolymer bricks, *Construction and Building Materials*, 2020, 265, 120217.



- [27] X. Guo and X. Pan, Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 2018, 179, 633-641.
- [28] K.H. Younis, Mechanical performance of concrete reinforced with steel fibres extracted from post-consumer tyres, *The second International Engineering Conference on Developments in Civil and Computer Engineering Applications 2016 (IEC2016)*, Proceeding, 2016, 162-169.
- [29] T. Matsumoto and H. Mihashi, JCI-DFRCC summary report on DFRCC terminologies and application concepts, *The JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites Application and Evaluation (DFRCC 2002)*, Proceeding, 2002, 59-66.