



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

THE EFFECT OF LIQUID-TO-BINDER RATIO AND WASTEWATER SLUDGE POWDER CONTENT ON WORKABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER MORTAR

ผลกระทบของอัตราส่วนสารละลายต่างต่อวัสดุประสานและปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่มีต่อค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ปณรดา บัวใหญ่รักษา¹, อำพล วงศ์ษา^{2*}, วันชัย สะตะ³, ปริญา จินดาประเสริฐ⁴

¹ นักศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สานามเสื่อป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

ARTICLE INFO:

Received: 15 January 2024

Received Revised Form: 30 January 2024

Accepted: 15 February 2024

ABSTRACT :

This study examines the effect of alkali liquid-to-binder ratio (L/B) and wastewater sludge powder from a beverage factory (WP) content on the properties of fly ash-based geopolymer mortar. The L/B ratios of 0.55, 0.65, and 0.75 were used and fly ash was replaced by WP at ratios of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 percent by weight of fly ash. The tests of flow value, compressive strength at 7 days, and unit weight were conducted. The results showed that an increase in the L/B ratio increases the flow value of fresh geopolymer mortar while the compressive strength tends to decrease. The unit weight tends to increase when the L/B ratio rises from 0.55 to 0.65 and then decreases with the increased L/B ratio to 0.75. For the WP contents, the result showed that the flow value, compressive strength, and unit weight tend to decrease with the increase in WP contents. However, the compressive strength of the geopolymer mortar with the L/B ratio of 0.75 increased with an increase in WP content at 20% of WP by weight, then the compressive strength decreased according to the amount of WP. The strength activity index values of geopolymer mortars containing less than 40% WP are higher than 75%. The L/B ratio of 0.65 is the optimum ratio for geopolymer mortar fabrication and the appropriate WP replacement content depends on the need for further use. The use of WP in fly ash-based geopolymer mortar is considered a beneficial use of waste from industrial factories which helps reduce disposal costs including reducing the use of cement in construction.

*Corresponding Author,
Email address: ampowo@kku.ac.th

KEYWORDS : Workability, Strength, Unit weight, Factory waste, Industrial waste

บทคัดย่อ :

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนสารละลายต่างต่อวัสดุประสาน (L/B) และปริมาณผงตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่มีต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.75 และใช้ผงตะกอนน้ำเสียแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ทำการศึกษาการไหลผ่าน กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน และหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน L/B ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการไหลผ่านของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่ามากขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง และหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน L/B เพิ่มขึ้นจาก 0.55 เป็น 0.65 และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน L/B เพิ่มขึ้นเป็น 0.75 จากการศึกษาผลกระทบของผงตะกอนน้ำเสียต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่าค่าการไหลผ่าน กำลังรับแรงอัด และหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น ยกเว้นในกรณีของส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 ที่มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น สำหรับดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 40 จะมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 โดยอัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.65 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสม และปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่เถ้าลอยนั้นจะขึ้นอยู่กับ การนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการนำผงตะกอนน้ำเสียมาใช้เป็นส่วนผสมในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถือเป็นการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนน้ำเสีย รวมถึงลดความต้องการการใช้ปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ความสามารถในการทำงานได้, ความแข็งแรง, หน่วยน้ำหนัก, ของเสียจากโรงงาน, ขยะอุตสาหกรรม

1. ที่มาและความสำคัญ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นอย่างมากเนื่องจากมีราคาถูกและให้กำลังรับแรงอัดได้ดี แต่ในการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมากซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาหาแนวทางในการลดการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาวัสดุเพื่อนำมาใช้แทนวัสดุจากปูนซีเมนต์ทำให้พบกับวัสดุประสานชนิดใหม่ เรียกว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์ สังเคราะห์จากวัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็น

องค์ประกอบทางเคมีหลัก เช่น เถ้าลอย กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาด้วยสารละลายต่างความเข้มข้นสูง และบ่มด้วยความร้อนต่ำ ทำให้วัสดุเกิดการก่อตัว แข็งตัว และรับกำลังได้คล้ายซีเมนต์เพสต์ [1] โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่ต่ำกว่าวัสดุในระบบปูนซีเมนต์

น้ำเสียเป็นหนึ่งในมลภาวะที่ตามมาเนื่องจากการก่อตั้งโรงงานอุตสาหกรรม ในการกำจัดน้ำเสียจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเพื่อทำให้น้ำมีคุณภาพที่ดีขึ้นก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับวัตถุประสงค์หลักในการบำบัดน้ำเสียนั้นคือการแยกของแข็งและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียให้ได้มาซึ่งตะกอน

น้ำเสีย โดยตะกอนน้ำเสียเหล่านี้จะต้องถูกนำไปกำจัดทิ้งอย่างถูกต้องและเหมาะสมซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายที่ตามมา ในขณะที่เดียวกัน การทิ้งตะกอนน้ำเสียเหล่านี้ยังถือเป็นการสะสมของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการหาแนวทางในการนำตะกอนน้ำเสียมาใช้ประโยชน์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและสำคัญ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การแทนที่วัสดุประสานหรือเพิ่มวัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงในระบบจีโอโพลิเมอร์จะส่งผลในเชิงบวกด้านการรับกำลัง เนื่องจากเป็นการเพิ่มการสร้างผลผลิตที่ทำให้กำลังแก่ระบบจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น [2]-[4]

เนื่องจากการนำตะกอนน้ำเสียที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงมาใช้ในการงานเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนสารละลายต่างต่อวัสดุประสาน (L/B) และปริมาณผงตะกอนน้ำเสียต่อคุณสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.75 และทำการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วนร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย โดยพิจารณาจากค่าการไหลแผ่กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการศึกษาแนวทางการนำตะกอนน้ำเสียที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงมาใช้ในการงานเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับงานก่อสร้างต่อไปและเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมทั้งลดงบประมาณในการกำจัดตะกอนน้ำเสีย

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ผงตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดด้วยเครื่องโม่แรงเจลิสและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่าผงตะกอนน้ำเสียมีค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325 ต่ำกว่าเถ้าลอย ใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์และสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายต่างที่ใช้สำหรับผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับทรายแม่น้ำที่ใช้มีคุณสมบัติพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 2 และมีการกระจายขนาดคละดังรูปที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ

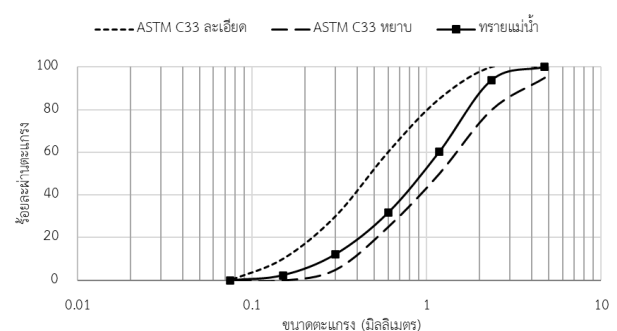
วัสดุในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีปริมาณผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนักซึ่งควรจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [5] อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ของเถ้าลอยนั้นมีปริมาณสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่ถูกจัดอยู่ในชั้นคุณภาพตามมาตรฐานดังกล่าว ในขณะที่ผงตะกอนน้ำเสียมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และมีร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักหลังการเผาที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากตะกอนน้ำเสียมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สูง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

คุณสมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอย (FA)	ผงตะกอนน้ำเสีย (WP)
ความถ่วงจำเพาะ	2.74	2.56
ร้อยละค่าตะแกรงเบอร์ 325	28.0	1.0

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายแม่น้ำ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ทรายแม่น้ำ
ความถ่วงจำเพาะ (SSD)	2.61
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	1.07
หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	1642
โมดูลัสความละเอียด	3.01



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของทรายแม่น้ำ

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เถ้าลอย (FA)	ผงตะกอนน้ำเสีย (WP)
SiO ₂	24.90	2.25
Al ₂ O ₃	12.96	0.03
Fe ₂ O ₃	18.15	0.13
CaO	28.22	49.84
MgO	2.40	3.00
SO ₃	6.89	0.30
Na ₂ O	2.14	0.25
K ₂ O	2.15	0.04
TiO ₂	0.37	-
LOI	0.85	43.30

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 4 เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ในทุกส่วนผสม ใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.75 โดยทำการแทนที่เถ้าลอย (FA) ด้วยผงตะกอนน้ำเสีย (WP) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย โดย สำหรับชื่อส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะขึ้นต้นด้วยอัตราส่วน L/B และลงท้ายด้วย

อัตราส่วนการแทนที่ เช่น ส่วนผสม 55WP0 หมายถึง ส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 และมีการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 0 และในการผสมตัวอย่างจะทำการผสมเถ้าลอยและผงตะกอนน้ำเสียตามอัตราส่วนที่กำหนดให้เข้ากันก่อนแล้วจึงทำการผสมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเวลา 5 นาที ใส่ทรายแม่น้ำในสภาพอ้อมตัวผิวแห้งผสมให้เข้ากันอีก 5 นาที จากนั้นเทสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ผสมให้เข้ากันอีก 5 นาที เมื่อครบระยะเวลาการผสมจะทำการทดสอบค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [6] และเทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบจากนั้นพักตัวอย่างทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงก่อนทำการหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้นและนำเข้าตูบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกใสและบ่มต่อในห้องควบคุมอุณหภูมิ 22 °C และความชื้นร้อยละ 50 โดยทั่วไปวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการบ่มร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการพัฒนากำลังที่ค่อนข้างสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [7] ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

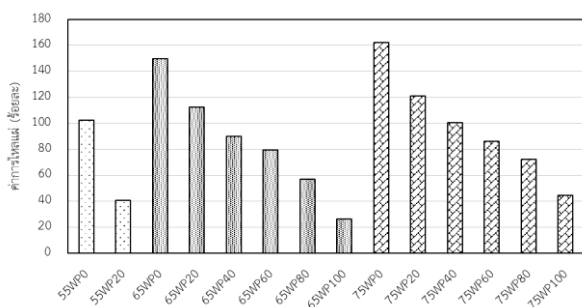
ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม)

ส่วนผสม	เถ้าลอย (FA)	ผงตะกอนน้ำเสีย (WP)	ทรายแม่น้ำ	NaOH	Na ₂ SiO ₃
55WP0	100	-	275	27.5	27.5
55WP20	80	20	275	27.5	27.5
65WP0	100	-	275	32.5	32.5
65WP20	80	20	275	32.5	32.5
65WP40	60	40	275	32.5	32.5
65WP60	40	60	275	32.5	32.5
65WP80	20	80	275	32.5	32.5
65WP100	-	100	275	32.5	32.5
75WP0	100	-	275	37.5	37.5
75WP20	80	20	275	37.5	37.5
75WP40	60	40	275	37.5	37.5
75WP60	40	60	275	37.5	37.5
75WP80	20	80	275	37.5	37.5
75WP100	-	100	275	37.5	37.5

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สด

ค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์สดแสดงดังรูปที่ 2 สำหรับส่วนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ล้วนที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 มีค่าการไหลแผ่ร้อยละ 102 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการไหลแผ่ช่วงร้อยละ 110 ± 5 ของซีเมนต์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [7] เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน L/B เป็น 0.65 และ 0.75 พบว่าส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 150 และ 162 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการไหลแผ่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใช้อัตราส่วน L/B มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเหลวในส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมที่มีผงตะกอนน้ำเสียมีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาถึงส่วนผสมที่มีผงตะกอนน้ำเสียพบว่าค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นเพราะผงตะกอนน้ำเสียมีความละเอียดสูงกว่าเถ้าลอยทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าจึงมีความต้องการน้ำในการเคลือบผิวที่สูงกว่า ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง [8] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9]-[11] ที่พบว่าเมื่อแทนที่วัสดุประสานด้วยวัสดุผงที่มีความละเอียดสูงกว่าจะทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 สามารถวัดค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดได้ถึงเกณฑ์ที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20 เท่านั้นเนื่องจากหากทำการแทนที่ในปริมาณที่สูงกว่านี้จะทำให้ส่วนผสมมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำเกินกว่าจะทำการทดสอบการไหลแผ่และขึ้นรูปตัวอย่างได้



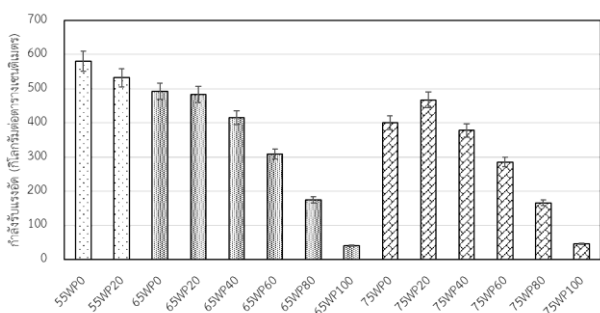
รูปที่ 2 ค่าการไหลแผ่ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สด

3.2 กำลังรับแรงอัดและดัชนีกำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วันแสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วน L/B ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเหลวส่วนเกินในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดปริมาณโพรงภายในก้อนตัวอย่างมากขึ้น [12] จากการพิจารณาผลของค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน L/B เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมมอร์ตาร์ไม่ได้ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นในกรณีของส่วนผสมที่ใช้ผงตะกอนน้ำเสียล้วน (WP100) ที่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน L/B จาก 0.65 เป็น 0.75 จะมีกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นจาก 40 กก./ cm^2 เป็น 46 กก./ cm^2 ซึ่งกำลังที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของเหลวในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้มาซึ่งสารประกอบที่ให้กำลังมากขึ้น รวมถึงช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปตัวอย่างจึงอาจทำให้การอัดแน่นดีขึ้น

สำหรับผลกระทบของผงตะกอนน้ำเสียต่อคุณสมบัติด้านกำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พบว่าส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 และ 0.65 มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่มากขึ้น เนื่องจากการลดลงของเถ้าลอยในส่วนผสมทำให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรเซชันนั้นลดลงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วนร้อยละ 20 และมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำลงหลังเพิ่มปริมาณผงตะกอนน้ำเสีย ซึ่งการที่ส่วนผสม 75WP20 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ 55WP20 และ 65WP20 มีกำลังรับแรงอัดลดลงนั้นอาจเกี่ยวข้องกับเหมาะสมของปริมาณของสารละลายในส่วนผสมที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและการบรรจุเข้าแบบให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3 ที่แสดงการลดลงของกำลังรับแรงอัดในส่วนผสม 55WP20 และ 65WP20 เมื่อเทียบกับส่วนผสม 55WP0 และ 65WP0 ตามลำดับ นั้นมีค่าการลดลงของกำลังอัดที่น้อยลงตามปริมาณ L/B ที่เพิ่มขึ้นจนท้ายที่สุดกำลังรับแรงอัดก็เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ L/B เท่ากับ 0.75 อีกทั้งเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าการไหลแผ่ดังแสดงในรูปที่ 2 จะพบว่าส่วนผสม WP20 ของทุกอัตราส่วน L/B มีค่าการไหลแผ่ลดลงจากส่วนผสม WP0

ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายในส่วนผสมเช่นเดียวกัน โดยค่าการไหลผ่านที่มากหรือน้อยจนเกินไปจะส่งผลต่อการอัดแน่น ตัวอย่างทำให้ตัวอย่างมีความสมบูรณ์น้อยลงก่อให้เกิดการลดลงของกำลังรับแรงอัดได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าในส่วนผสม 75WP20 จะมีค่าการไหลผ่านที่ลดลงแต่กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมดังกล่าวกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 อาจเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม WP20 ที่ทำให้ค่าการไหลผ่านอยู่ในจุดที่เหมาะสมต่อการอัดแน่นตัวอย่างและการเติมเต็มช่องว่างของส่วนผสมได้ นอกจากนี้แม้ว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 75WP20 จะมีค่ามากกว่าส่วนผสม 75WP0 ที่เป็นส่วนผสมของเถ้าลอยล้วน แต่กำลังรับแรงอัดนั้นยังถือว่าน้อยกว่าส่วนผสม 55WP20 และ 65WP20 ที่มีปริมาณผงตะกอนน้ำเสียเท่ากันแต่ใช้อัตราส่วน L/B ที่น้อยกว่า และแม้ว่าเมื่อพิจารณา กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 แล้ว จะพบว่ามีความรับแรงอัดที่สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ L/B เท่ากับ 0.65 และ 0.75 ที่ปริมาณการแทนที่ผงตะกอนน้ำเสียเท่ากัน แต่เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณที่สูงเกินกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ต่ำจนเกินไป และเมื่อพิจารณาส่วนผสมที่ใช้ L/B เท่ากับ 0.65 และ 0.75 จะพบว่าอัตราส่วน L/B ที่ 0.65 เหมาะสมในการนำมาใช้งานมากกว่าเนื่องจากให้กำลังรับแรงอัดที่สูงและใช้สารละลายต่างในปริมาณที่น้อยกว่าซึ่งจะส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าด้วย



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ASTM C311 [13] ได้กำหนดการหาค่าดัชนีกำลังโดยการคำนวณหาร้อยละของอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานและกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมควบคุม สำหรับดัชนีกำลังของส่วนผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมที่อายุ 7 วัน

แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าดัชนีกำลังมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงตะกอนน้ำเสียสำหรับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 มีดัชนีกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20 และมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [5] ได้มีการกำหนดค่าดัชนีกำลังสำหรับใช้ประเมินความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ซึ่งจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 โดยจะเห็นได้ว่าดัชนีกำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมมีค่าอยู่ในเกณฑ์จนถึงการแทนที่ผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 40 ในอัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.65 และ 0.75 แสดงให้เห็นถึงปริมาณที่เหมาะสมของการนำผงตะกอนน้ำเสียมาแทนที่เถ้าลอยในงานเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 40 สำหรับงานด้านกำลัง อย่างไรก็ตามแม้ในส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียสูงกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักจะมีดัชนีกำลังที่ต่ำกว่าร้อยละ 75 แต่กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่แทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 60 และ 80 โดยน้ำหนัก (WP60 และ WP80) มีค่าอยู่ระหว่าง 166 – 309 กก./ซม.² ในขณะที่ส่วนผสม 65WP100 และ 75WP100 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40 กก./ซม.² และ 46 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดขั้นต่ำของคอนกรีตบล็อกประสานรับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 3410-2565 [14] และ มอก. 3411-2565 [15] ตามลำดับแล้วจะพบว่าส่วนผสม WP60 และ WP80 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 13.8 เมกะปาสกาล (140.7 กก./ซม.²) ผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานรับน้ำหนัก และส่วนผสม 75WP100 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 4.14 เมกะปาสกาล (42.2 กก./ซม.²) ผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานไม่รับน้ำหนัก ส่วนกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 65WP100 ที่อายุ 7 วันมีค่าน้อยกว่าความต้านทานแรงขั้นต่ำตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานทั้งแบบรับน้ำหนักและแบบไม่รับน้ำหนัก

ตารางที่ 5 ดัชนีกำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	ดัชนีกำลัง (ร้อยละ)
55WP0	580	100.0
55WP20	532	91.7

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)	ดัชนีกำลัง (ร้อยละ)
65WP0	492	100.0
65WP20	483	98.2
65WP40	415	84.3
65WP60	309	62.8
65WP80	174	35.4
65WP100	40	8.1
75WP0	400	100.0
75WP20	467	116.8
75WP40	378	94.5
75WP60	285	71.3
75WP80	166	41.5
75WP100	46	11.5

3.3 หน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ก่อนทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันแสดงดังตารางที่ 6 โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการอบร้อนเพื่อไล่ความชื้น ดังนั้นค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้จะเป็นค่าที่มีผลจากความชื้นภายในก้อนตัวอย่างด้วย จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน L/B ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.55 ถึง 0.65 ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้นจึงสามารถอัดแน่นเพื่อขึ้นรูปได้ดีกว่าส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 ขณะที่หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 โดยเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่มากเกินไปในส่วนผสมทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างภายในก้อนตัวอย่าง แต่ในทางกลับกันสำหรับส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ผงตะกอนน้ำเสียล้วน (WP100) พบว่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/B จาก 0.65 เป็น 0.75 อันอาจเป็นเหตุผลเดียวกันกับในกรณีของหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน L/B เพิ่มขึ้นจาก 0.55 ถึง 0.65 สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [16]-[17] ที่พบว่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน L/B มีค่าเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งและหน่วยน้ำหนักจะมีแนวโน้มลดลง

เมื่ออัตราส่วน L/B มีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักร่วมกับกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะพบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วน L/B ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่หน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.65 และมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน L/B มีค่าต่ำลงหรือสูงขึ้น โดยเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ความสามารถในการทำไดงานได้ดีขึ้นจนสามารถอัดแน่นตัวอย่างได้ดีขึ้นแต่ปริมาณของเหลวดังกล่าวอาจมากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนส่วนเกินเป็นเหตุให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์อ่อนแอจึงทำให้รับกำลังได้ลดลง [17] สำหรับหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผงตะกอนน้ำเสียมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเถ้าลอย นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของผงตะกอนน้ำเสียยังทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมลดลงจึงอาจส่งผลกระทบต่อความแน่นตัวของชิ้นรูปตัวอย่าง รวมถึงปริมาณเถ้าลอยที่ลดลงยังส่งผลให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันลดลงจึงอาจทำให้เกิดรูพรุนภายในก้อนตัวอย่างมากขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abdulkareem และคณะ [18] ที่พบว่าเมื่อใช้ผงไม้ซี้มวอลเคลือบสูงที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าลอยในงานเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 6 หน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ปริมาณผงตะกอนน้ำเสีย	หน่วยน้ำหนัก (กก./ซม. ³)		
	L/B = 0.55	L/B = 0.65	L/B = 0.75
0	2.255	2.279	2.271
20	2.202	2.210	2.175
40	-	2.211	2.191
60	-	2.182	2.158
80	-	2.175	2.170
100	-	2.173	2.174

4. สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน L/B ที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งวัดได้ในรูปของค่าการไหลผ่านที่มากขึ้น แต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำให้ค่าการไหลผ่านและหน่วยน้ำหนักลดลง ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.55 และ 0.65 มีแนวโน้มลดลง แต่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.75 มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20 จากนั้นกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.65 และ 0.75 แล้วจะพบว่าอัตราส่วน L/B ที่ 0.65 เหมาะสมในการนำมาใช้งานมากกว่าเนื่องจากให้กำลังรับแรงอัดที่สูงและใช้สารละลายต่างในปริมาณที่น้อยกว่าซึ่งจะส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าด้วย และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงตะกอนน้ำเสียไม่เกินร้อยละ 40 มีค่าดัชนีกำลังสูงกว่าร้อยละ 75 ตามที่มาตรฐานกำหนด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th ed, 2020.
- [2] A. Wongsas, K. Boonserm, C. Waisurasingha, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Use of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in high calcium fly ash geopolymer matrix," *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 49–59, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.147.

- [3] A. M. Kalinkin et al., "Synthesis of Fly Ash-Based geopolymers: effect of calcite addition and mechanical activation," *Minerals*, vol. 10, no. 9, p. 827, Sep. 2020, doi: 10.3390/min10090827.
- [4] P. Chindaprasirt and U. Rattanasak, "Calcium wastes as an additive for a low calcium fly ash geopolymer," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43586-w.
- [5] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618 – 19, 2019.
- [6] Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM C1437 – 20, 2020.
- [7] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM C109/C109M - 16a, 2016.
- [8] I. Mehdipour and K. H. Khayat, "Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste," *Cement & Concrete Composites*, vol. 78, pp. 120–131, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005.
- [9] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, "Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica," *Cement and Concrete Composites*, vol. 72, pp. 235–245, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.017.
- [10] T. Bezabih, C. Kanali, and J. Thuo, "Effects of teff straw ash on the mechanical and microstructural properties of ambient cured fly ash-based geopolymer mortar for onsite applications," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101123, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101123.
- [11] ปุณยวัจน์ วงษ์สวัสดิ์, สำเริง รักซ้อน, และ ปริญญาจินดาประเสริฐ, "กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, พฤษภาคม - สิงหาคม, หน้า 28-37, 2564.

[12] A. Naghizadeh and S. O. Ekelu, "Effect of Mix Parameters on Strength of Geopolymer Mortars - Experimental Study," Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures, Leeds, West Yorkshire, UK, July 18-20, 2018, pp.315-320.

[13] Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM C311/C311M, 2018.

[14] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกประสานรับน้ำหนัก, มอก. 3410-2565, 2565.

[15] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกประสานไม่รับน้ำหนัก, มอก. 3411-2565, 2565.

[16] M. F. M. Tahir et al., "Mechanical and Durability Analysis of Fly Ash Based Geopolymer with Various Compositions for Rigid Pavement Applications," Materials, vol. 15, no. 10, p. 3458, May 2022, doi: 10.3390/ma15103458.

[17] N. Yong-Sing et al., "Effect of Solid-to-Liquid Ratio on Thin Fly Ash Geopolymer," IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, vol. 743, no. 1, p. 012006, Feb. 2020, doi: 10.1088/1757-899x/743/1/012006.

[18] O. A. Abdulkareem, M. Ramli, and J. C. Matthews, "Production of geopolymer mortar system containing high calcium biomass wood ash as a partial substitution to fly ash: An early age evaluation," Composites. Part B, Engineering, vol. 174, p. 106941, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106941.