

อิทธิพลของการใช้เศษเหล็กออกไซด์แทนที่ทรายในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จาก เถ้าลอยต่อสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และพฤติกรรมหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง Influence of Mill Scale Waste as Sand Replacement in Fly Ash-Based Geopolymer Mortar on Physical, Mechanical, and Post-Fire Behaviors

อภินันท์ ศิริวัฒนกาญจน์¹ อำพล วงศ์ษา¹ ไพฑูรย์ นาแซง² วันชัย สะตะ^{1*} และปริญญญา จินดาประเสริฐ^{1,3}
Apinun Siriwattanakarn¹ Ampol Wongsas¹ Phaithun Nasaeng² Vanchai Sata^{1*} and
Prinya Chindaprasirt^{1,3}

Received: January 13, 2026; Revised: March 23, 2026; Accepted: March 24, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) แทนที่ทรายแม่น้ำ (River Sand; RS) ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย โดยศึกษาการแทนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเถ้าลอยที่ 0.55 0.60 และ 0.65 เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น ร้อยละความพรุนและการดูดซึมน้ำ และพฤติกรรมหลังสัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ผลการทดสอบพบว่า เมื่อการแทนที่ด้วย MS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง กำลังรับแรงอัดที่การแทนที่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 15 พบว่ามีค่ามากกว่าการใช้ RS เพียงอย่างเดียว โดยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 1.1 ถึง 19.8 นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาตร MS ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาตร MS ในส่วนผสมมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อย แม้ความพรุนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูงมีกำลังรับแรงอัดลดลงทุกช่วงอุณหภูมิ แต่การแทนที่ด้วย MS แสดงแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงและร้อยละกำลังรับแรงอัดคงเหลือเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,000 °C การใช้ RS ร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือสูงสุดที่ร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับก่อนได้รับความร้อน จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า MS สามารถใช้เป็นมวลรวมทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังและเพิ่มความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ยังส่งเสริมการหมุนเวียนวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์; มอร์ตาร์; เศษเหล็กออกไซด์; เถ้าลอย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

³ ภาควิชาเคมี ราชบัณฑิตยสถาน สานมเลื้อป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Faculty of Engineering, Northeastern University

³ The Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Dusit, Bangkok

* Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E - mail: vancsa@kku.ac.th

Abstract

This research investigated the use of mill scale waste (MS) to replace river sand (RS) in fly ash-based geopolymer mortar. The replacement at 0, 5, 10, 15, and 20 % by volume was studied, along with variations in the alkaline solution-to-fly ash ratio (L/FA) at 0.55, 0.60, and 0.65. The workability, compressive strength, density, porosity, water absorption, and post-fire behavior at 400, 700, and 1,000 °C were analyzed. The results showed that increasing MS decreased the flow value. Compressive strength at 5 - 15 % replacement was significantly higher than that of only RS using, with about 1.1 to 19.8 %. Furthermore, density increased with increasing volume of MS. Increasing MS volume in the mixture resulted in a slight decrease in water absorption despite an increase in porosity. After being exposed to high temperatures, the compressive strength of the geopolymer mortar decreased across all temperature ranges. However, the replacement with MS showed a tendency to reduce weight loss and increased normalized residual compressive strength, specifically, at 1,000 °C, using 20 % RS, the residual compressive strength achieves a maximum at 90 % compared to before heating. The research results demonstrate that MS can be used as an effective alternative aggregate for improving strength and enhancing high-temperature resistance. Furthermore, it promotes the recycling of industrial waste materials.

Keywords: Geopolymer; Mortar; Mill Scale Waste; Fly Ash

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymers) เป็นสารยึดเกาะอนินทรีย์ประเภทอะลูมิโนซิลิเกตที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันระหว่างวัสดุตั้งต้น เช่น ดินขาวเผาหรือเถ้าลอย ร่วมกับสารละลายต่างเข้มข้น วัสดุชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลและความทนทานที่เทียบเคียงได้ แต่ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำกว่าและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ (Rashad, 2013)

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเป็นภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติสูงและก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมาก โดยเฉลี่ยมีของเสียเกิดขึ้นประมาณ 600 kg ต่อการผลิตเหล็กดิบ 1 ton (Fröhling and Rentz, 2010) หนึ่งในของเสียสำคัญคือ เศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) ซึ่งเป็นชั้นออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการรีดที่อุณหภูมิสูง โดยมีปริมาณการเกิดประมาณ 10 - 20 kg ต่อเหล็ก 1 ton (Bagatini et al., 2020) MS ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็กหลายชนิด ได้แก่ วูสไทต์ (FeO) เฮมาไทต์ (Fe₂O₃) และแมกเนไทต์ (Fe₃O₄) มีลักษณะทางกายภาพเป็นแผ่นและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ แม้ MS จะมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ปัจจุบันส่วนใหญ่ยังถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ (Furlani and Maschio, 2016) การนำเศษวัสดุจากเหล็กมากลับมาใช้ในงานคอนกรีตมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดย Chousidis et al. (2016) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษออกไซด์ของเหล็กที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ MS เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายแม่น้ำ โดยศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ ยังรวมถึงการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง เพื่อส่งเสริมการจัดการของเสียอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนผ่านการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) สารตั้งต้นและสารละลายต่าง

เถ้าลอย (Fly Ash; FA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน FA เท่ากับร้อยละ 60.58 และปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 27.10 ดังตารางที่ 1 ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท C ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618-19 (2019)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Chemical composition (%wt.)	FA	MS
SiO_2	31.58	0.21
Al_2O_3	15.30	<0.01
CaO	27.10	<0.01
Fe_2O_3	13.07	99.19
MgO	3.22	<0.01
SO_3	3.55	<0.01
Na_2O	2.06	<0.01
K_2O	1.88	<0.01
P_2O_3	0.33	<0.01

สารละลายต่างที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 ; NS) เกรดอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบโดยน้ำหนักเป็น Na_2O ร้อยละ 12.44 ส่วน SiO_2 ร้อยละ 29.96 และ H_2O ร้อยละ 57.60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH ; NH) ที่เตรียมโดยใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water; DI) เพื่อเตรียมสารละลายความเข้มข้น 10 M ก่อนนำไปใช้งาน

2) มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ทรายแม่น้ำ (River Sand; RS) และเศษเหล็กออกไซด์ (Mill Scale Waste; MS) ดังรูปที่ 1 มวลรวมทั้งสองชนิดจะถูกนำมาล้างให้สะอาดแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 4.75 mm ก่อนนำไปใช้งาน โดย MS ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากการกระบวนการผลิตเหล็กรีดร้อน ซึ่งได้รับการรวบรวมจากโรงงานในจังหวัดขอนแก่น องค์ประกอบทางเคมีของ MS ดังตารางที่ 1 พบว่า MS มีองค์ประกอบของ Fe_2O_3 ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 99.19 ทั้ง RS และ MS ถูกเตรียมให้อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งก่อนนำไปผสม การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C128-22 (2022) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของ RS และ MS มีค่าเท่ากับ 1.09 และ 0.04 สำหรับความถ่วงจำเพาะของ MS มีค่าเท่ากับ 5.52 ซึ่งสูงกว่า RS ที่มีค่าเท่ากับ 2.60 อย่างไรก็ตามค่าหน่วยน้ำหนักแบบหลวมที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29/C29M-09 (2009) ของ MS และ RS มีค่าใกล้เคียงกันคือ 1,670 และ 1,636 kg/m^3 เป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของ MS ที่มีรูปร่างแบนบางเป็นเกล็ดแข็ง มีความพืดแน่นได้ยาก ลักษณะทางกายภาพเช่นนี้จึงทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักโดยรวมไม่สูง นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายขนาดของอนุภาคมวลรวมละเอียด (Particle Size Distribution) ทดสอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ตามมาตรฐาน ASTM C136-06 (2006) ดังรูปที่ 2 พบว่า RS มีการกระจายขนาดละเอียดที่ใกล้เคียงกับขีดจำกัดล่างที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C33/C33M-11 (2011) ในขณะที่ MS แสดงขนาดละเอียดที่อยู่นอกช่วงเส้นขอบเขตนี้ไปทางขนาดที่เล็กกว่า RS ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RS มีการกระจายขนาดที่หยาบกว่า MS โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของ RS และ MS มีค่าเท่ากับ 3.2 และ 1.1

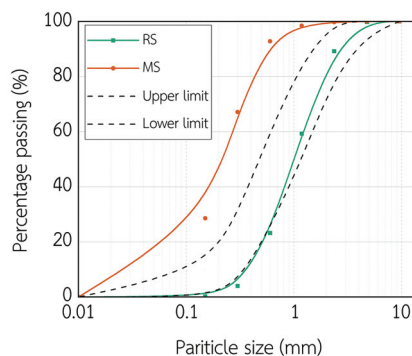


(ก) ทรายแม่น้ำ (RS)



(ข) เศษเหล็กออกไซด์ (MS)

รูปที่ 1 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2 การกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียด

2. สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการศึกษานี้ได้ทำการแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกศึกษาผลกระทบการแทนที่ RS ด้วย MS โดยทำการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร ส่วนที่สองศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเถ้าลอย (Liquid-to-Fly Ash Ratio; L/FA) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.55 0.60 และ 0.65 ในขณะที่อัตราส่วนโดยมวลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตถูกกำหนดให้คงที่ 1.0 และอัตราส่วนโดยมวลของมวลรวมละเอียดทั้งหมดต่อเถ้าลอยคงที่ 2.75 สำหรับตัวอย่างสูตรและชื่อเรียก เช่น 0.60-GM10 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีค่า L/FA เท่า 0.60 และแทนที่ RS ด้วย MS โดยปริมาตรร้อยละ 10 รายละเอียดสำหรับสัดส่วนผสมทั้งหมด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (g)

Mixture	FA	NH	NS	RS	MS
0.55-GM00	1000	275	275	2750	-
0.55-GM05	1000	275	275	2613	292
0.55-GM10	1000	275	275	2475	584
0.55-GM15	1000	275	275	2338	876
0.55-GM20	1000	275	275	2200	1168
0.60-GM00	1000	300	300	2750	-
0.60-GM05	1000	300	300	2613	292
0.60-GM10	1000	300	300	2475	584
0.60-GM15	1000	300	300	2338	876
0.60-GM20	1000	300	300	2200	1168

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (g) (ต่อ)

Mixture	FA	NH	NS	RS	MS
0.65-GM00	1000	325	325	2750	-
0.65-GM05	1000	325	325	2613	292
0.65-GM10	1000	325	325	2475	584
0.65-GM15	1000	325	325	2338	876
0.65-GM20	1000	325	325	2200	1168

กระบวนการขึ้นรูปจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยการผสมเกล็ดลอยร่วมกับสารละลาย NH เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยการเติมมวลรวมละเอียดทั้งหมดและผสมต่ออีก 5 นาที จากนั้นจึงเติมสารละลาย NS ในขั้นตอนสุดท้าย และผสมต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นอย่างดี จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ได้ถูกนำไปเทลงในแบบหล่อ สำหรับการทดสอบตามวิธีมาตรฐานต่าง ๆ ตัวอย่างที่ขึ้นรูปในแบบหล่อและเขย่าด้วยไม้เขย่าเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้ เหมือนกันทุกส่วนผสม แล้วจะถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและพักไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปบ่มด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ภายหลังการแกะแบบหล่อ ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 - 65 จนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ

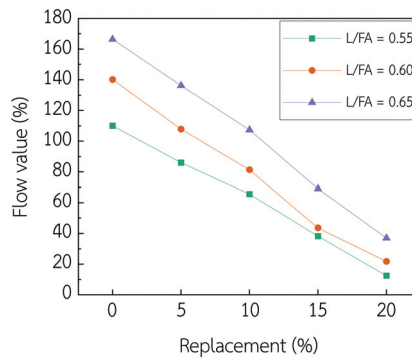
3. วิธีการทดสอบ

ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดทดสอบโดยใช้วิธีการไหลตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 (2007) การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 cm³ ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13 (2013) ตัวอย่างขนาดเดียวกันนี้ยังถูกใช้เพื่อทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 (2013) นอกจากนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง ในการทดสอบนี้ ใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 เท่านั้น โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 cm³ นำไปอบให้ความร้อนในเตาไฟฟ้า โดยเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 3 -5 °C ต่อนาที (Nuaklong et al., 2021) เมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่ 400 700 และ 1,000 °C ตัวอย่างจะถูกคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะปล่อยให้เย็นตัวลงภายในเตาไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการทดสอบร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือ

ผลการศึกษา

1. ค่าการไหลแม่ (Flow Value)

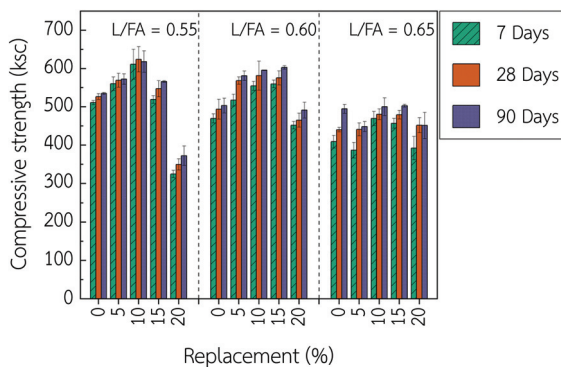
ค่าการไหลแม่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สดที่ทำการทดสอบโดยใช้วิธีการไหลดังรูปที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาตร MS ส่งผลให้ค่าการไหลในทุกสัดส่วนผสมลดลง ตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 เมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร มีค่าการไหลแม่เท่ากับร้อยละ 140 108 81 44 และ 22 ตามลำดับ พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hebbache et al. (2024) ที่พบว่าการแทนที่มวลรวมด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงส่งผลเสียต่อความสามารถในการทำงานได้ เนื่องจากอนุภาค MS ที่มีรูปร่างแบน เป็นเกล็ด และมีขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่า RS ทำให้ต้องการปริมาณของเหลวมากขึ้นเพื่อหล่อลื่น และเคลือบผิวอนุภาคให้เกิดการไหลตัว (Estephane et al., 2019) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการไหลแม่ โดยในสัดส่วนการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 10 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/FA จาก 0.55 เป็น 0.60 และ 0.65 พบค่าการไหลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66 เป็น 81 และ 107 ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเหลวที่เพิ่มช่วยลดความหนืดของระบบและเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้มวลรวมสามารถเคลื่อนตัวได้สะดวกยิ่งขึ้น (Nath and Sarker, 2014)



รูปที่ 3 ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 4 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุทดสอบ 7 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ RS ด้วย MS ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 ที่อายุทดสอบ 28 วัน การแทนที่ MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 494 569 582 575 และ 465 ksc ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวปรากฏคล้ายคลึงกันสำหรับอัตราส่วน L/FA ที่ 0.55 และ 0.65 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจากการแทนที่ MS ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 15 เกิดจากความสามารถในการเพิ่มความหนาแน่นและสัดส่วนผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสการเกิดการแยกตัวของมวลรวม พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Ozturk et al. (2020) ที่ระบุว่าการใช้ MS ในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 15 ในซีเมนต์มอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับส่วนผสมควบคุม นอกจากนี้ Kumar et al. (2016) ยังพบว่าปริมาณธาตุเหล็กสูงในเถ้าลอยสามารถเข้าร่วมในกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันได้โดยตรง โดยก่อให้เกิดระบบสารยึดเกาะบนพื้นฐานของเฟอร์โรไซเลตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งในกระบวนการนี้ไอออนของเหล็กจะถูกรวมเข้าสู่โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตผ่านกลไกการแทนที่อะลูมิเนียมบางส่วนซึ่งส่งผลดีด้านเพิ่มกำลังของจีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ Fe_2O_3 ที่มากเกินไปอาจเกิดการรบกวนปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันทำให้กำลังอัดลดลงได้ (Choi and Lee, 2012) เช่น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ถึงร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ซึ่งนอกจากปริมาณที่มากเกินไปของ MS แล้วอาจเป็นผลมาจากค่าการไหลผ่านที่ต่ำส่งผลให้เกิดการอัดตัวที่ไม่สมบูรณ์เกิดความไม่ต่อเนื่องของสารยึดเกาะด้วย นอกจากนี้ปัจจัยด้านการแทนที่มวลรวมแล้วอัตราส่วน L/FA ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 10 ที่อายุทดสอบ 90 วัน พบว่าที่ L/FA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 618 596 และ 500 ksc ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยระบบที่มีปริมาณของเหลวสูงจะทิ้งช่องว่างขนาดเล็กไว้ภายในเมทริกซ์หลังจากของเหลวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาระเหยออกไป เครือข่ายช่องว่างที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อการลดความสมบูรณ์และความแข็งแรงเชิงกลของสารยึดเกาะจีโอโพลิเมอร์ (Zhang and Wang, 2015) เมื่อพิจารณาการพัฒนาการกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน ในทุกสัดส่วนผสมของ L/FA ทั้งสามระดับ ได้แก่ 0.55 0.60 และ 0.65 พบว่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นในเกือบทุกสัดส่วนผสม อย่างเช่น L/FA = 0.60 ที่อายุการบ่ม 7 วัน การแทนที่ MS ที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 470 517 555 560 และ 452 ksc ตามลำดับ ส่วนที่อายุการบ่ม 90 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 503 581 595 603 และ 491 ksc จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 7.1 ถึง 12.3 พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันซึ่งทำให้โครงข่าย N-A-S-H gel มีความสมบูรณ์และหนาแน่นยิ่งขึ้นตามเวลา (Duxson et al., 2007)



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. ความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Density, Porosity, and Water Absorption)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำเมื่อพิจารณาอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 พบว่ามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,110 2,124 2,179 2,283 และ 2,287 kg/m^3 เมื่อทำการแทนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ แนวโน้มนี้เป็นเช่นเดียวกับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 และ 0.65 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2,134 ถึง 2,429 kg/m^3 และ 2,045 ถึง 2,260 kg/m^3 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเป็นผลมาจากการแทนที่ร้อยละโดยปริมาตรเนื่องจาก MS มีความถ่วงจำเพาะที่มากกว่า RS การแทนที่ในปริมาตรที่เท่ากันจึงทำให้ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามปริมาตร MS ที่เพิ่มขึ้น

ส่วนการเพิ่มอัตราส่วน L/FA ทำให้ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากค่าความพรุนที่มากขึ้น สำหรับผลของความพรุนกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแม้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นก็ตาม ซึ่งอาจเป็นเพราะอนุภาคของ MS มีลักษณะแบนบางและรูปร่าง ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ RS ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงการอัดตัวขึ้นรูปทำได้ยากอาจนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความพรุน เช่น อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 เมื่อทำการแทนที่ RS ด้วย MS จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 20 มีความพรุนเท่ากับ ร้อยละ 16.35 และ 18.62 ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2.27 โดยเป็นแนวโน้มเดียวกันกับทั้งอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 ที่ปริมาณโพรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.57 และ 2.12 อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาตรการแทนที่ที่เท่ากัน เช่น การแทนที่ร้อยละ 20 การเพิ่มอัตราส่วน L/FA จาก 0.55 เป็น 0.60 และ 0.65 มีปริมาณโพรงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.62 เป็น 20.97 และ 22.54 ตามลำดับ เป็นผลจากของเหลวที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาเมื่อระเหยออกไป จึงทิ้งช่องว่างหรือความพรุน ยิ่งปริมาณของเหลวมากขึ้นความพรุนที่หลงเหลือนี้จึงเพิ่มตามไปด้วยดังที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้า ในทางกลับกันผลของการดูดซึมน้ำไม่ได้เพิ่มตามความพรุนที่สูงขึ้น เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของ MS มีค่าต่ำมาก ดังนั้นจึงส่งผลโดยรวมต่อค่าการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มากกว่าความพรุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอนุภาคที่ละเอียดของ MS อาจไปช่วยลดการเชื่อมต่อของรูพรุน (Interconnected Porosity) ทำให้เกิดเป็นรูพรุนอิสระ (Isolated Pores) ที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันในเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ทำให้การส่งผ่านน้ำไปยังรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นได้ยากจึงทำให้การดูดซึมน้ำลดลง โดยการเพิ่มปริมาตร MS ที่ร้อยละ 0 ถึง 20 ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.77 0.80 และ 0.97 เท่านั้น เมื่อมีอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วน L/FA พบการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรการแทนที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยนี้เป็นผลมาจากความพรุนที่เพิ่มขึ้น

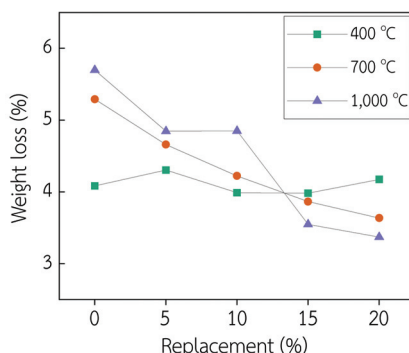
ตารางที่ 3 ความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำ

Mixture	Density (kg/m ³)	Porosity (%)	Water Absorption (%)
0.55-GM00	2134	16.35	5.92
0.55-GM05	2224	16.50	5.63
0.55-GM10	2274	16.79	5.42
0.55-GM15	2322	17.38	5.30
0.55-GM20	2429	18.62	5.15
0.60-GM00	2110	19.40	6.91
0.60-GM05	2124	19.94	6.74
0.60-GM10	2179	20.22	6.53
0.60-GM15	2283	20.27	6.28
0.60-GM20	2287	20.97	6.11
0.65-GM00	2045	20.42	7.07
0.65-GM05	2111	20.96	6.83
0.65-GM10	2167	21.66	6.67
0.65-GM15	2206	22.15	6.38
0.65-GM20	2260	22.54	6.10

4. พฤติกรรมหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง (Post-Fire Behaviors)

1) ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

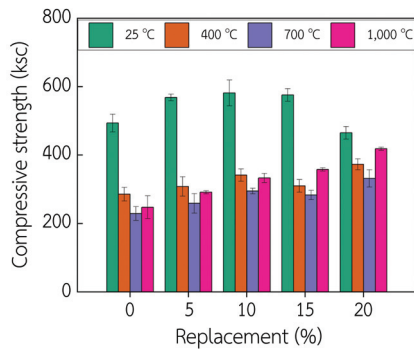
รูปที่ 5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ของอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.60 ที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 0 ถึง 20 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระดับความร้อนที่สูงขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากการระเหยของความชื้นภายในเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt et al. (2022) ที่ยืนยันว่าการสูญเสียน้ำหนักในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเกลือจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ได้รับ เมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 °C พบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในทุกส่วนผสมมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยส่วนผสมที่แทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.08 เมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 5 พบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 4.31 ก่อนที่จะลดลงต่ำสุดเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 10 และ 15 ซึ่งมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.98 และ 3.98 และกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.18 บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิ 400 °C กลไกการสูญเสียน้ำหนักยังคงถูกกำหนดโดยการระเหยของน้ำที่อยู่ในโครงข่าย N-A-S-H gel เป็นหลัก อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ MS จะเริ่มส่งผลให้แนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักรวมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 700 °C โดยส่วนผสมที่แทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5.29 จากนั้นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.66 4.22 3.86 และ 3.63 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,000 °C พบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลงเท่ากับร้อยละ 5.70 4.85 4.85 3.55 และ 3.37 ตามการแทนที่ด้วย MS ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ พฤติกรรมนี้อาจเป็นเพราะอิทธิพลจากการเพิ่มน้ำหนักของ MS ภายใต้สภาวะความร้อนสูง ซึ่ง Bautista-Marín et al. (2021) ได้รายงานว่ามี MS ที่ได้รับความร้อนในช่วง 250 ถึง 936 °C จะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีไทต์ (Fe₃O₄) เป็นเฮมาไทต์ (Fe₂O₃) การเปลี่ยนสถานะทางเคมีนี้ช่วยชดเชยการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของน้ำในส่วนผสม ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ MS ร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิสัมผัส 1,000 °C มีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด



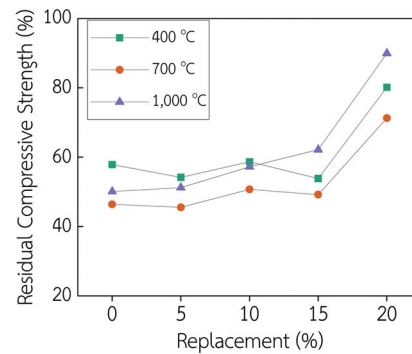
รูปที่ 5 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง

2) กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือหลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง (Compressive Strength and Residual Strength)

รูปที่ 6(ก) กำลังรับแรงอัด และรูปที่ 6(ข) กำลังรับแรงอัดคงเหลือของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สัมผัสอุณหภูมิสูงที่ 400 700 และ 1,000 °C ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงในทุกสัดส่วนผสมเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องที่ 25 °C ดังรูปที่ 6(ก) พฤติกรรมนี้มีสาเหตุหลักมาจากความไม่เข้ากันของการขยายตัวทางความร้อน ระหว่างเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์และมวลรวมธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นภายในและรอยแตกร้าว (Wongsa et al., 2018) เมื่อพิจารณาแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดคงเหลือที่อุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือในช่วงการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 ถึง 15 มีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือในช่วงร้อยละ 54 ถึง 59 และ 46 ถึง 51 สำหรับอุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C ดังรูปที่ 6(ข) จะเห็นได้ว่าผลของกำลังรับแรงอัดคงเหลือยังไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน แต่กำลังรับแรงอัดคงเหลือจะมีค่ามากขึ้นเมื่อแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือร้อยละ 80 และ 71 สำหรับอุณหภูมิสูง 400 และ 700 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 20 ส่งผลเชิงบวกต่อสองช่วงอุณหภูมิดังกล่าว โดยผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละการแทนที่ RS ด้วย MS จะเด่นชัดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,000 °C ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย MS โดยการแทนที่ RS ด้วย MS ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 51 57 62 และ 90 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดก่อนได้รับความร้อนดังรูปที่ 6(ข) การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงนี้อธิบายได้จากสองปัจจัยหลัก ประการแรกคือปรากฏการณ์การหลอมละลายบางส่วนของ MS ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ซึ่งช่วยประสานและเติมเต็มโครงสร้างภายในและประการที่สองคือ ลักษณะรูพรุนขนาดเล็กภายใน MS ที่ทำหน้าที่เป็นช่องระบายแรงดันไอน้ำ ช่วยลดความเสียหายจากแรงดันภายในได้ (Sedaghatdoost and Behfarnia, 2018) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 7 ช่วยยืนยันพฤติกรรมดังกล่าว โดยในตัวอย่างที่ไม่ผสม MS (0.60-GM00) ดังรูปที่ 7(ก) พบการสูญเสียความสมบูรณ์ของโครงสร้างเมทริกซ์และรอยแตกร้าวขนาดใหญ่อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่แทนที่ด้วย MS ร้อยละ 20 (0.60-GM20) ดังรูปที่ 7(ข) แสดงเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์ที่หนาแน่นขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการหลอมละลายของ MS ร่วมกับผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ (N-A-S-H gel) ก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าการใช้ RS เพียงอย่างเดียว

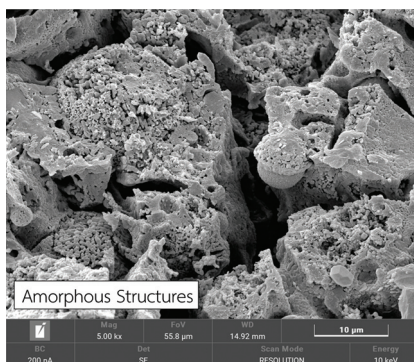


(ก) กำลังรับแรงอัด

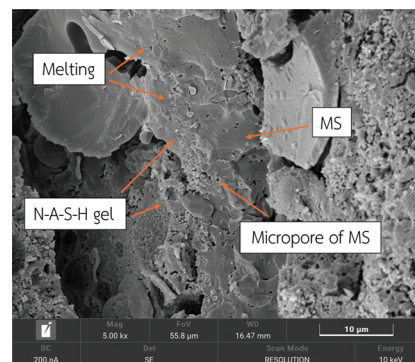


(ข) กำลังรับแรงอัดคงเหลือ

รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดคงเหลือของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูง



(ก) ส่วนผสม 0.60-GM00



(ข) ส่วนผสม 0.60-GM20

รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หลังการสัมผัสอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 1,000 °C

สรุปผลการศึกษา

1. การใช้เศษเหล็กออกไซด์แทนที่ทรายแม่น้ำส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่าการไหลต่ำสุดที่ร้อยละ 12.5 ที่อัตราส่วนของสารละลายต่างต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.55
2. การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเหล็กออกไซด์ทำให้ความพรุนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นแต่การดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อยเป็นผลมาจากค่าการดูดซึมน้ำของเศษเหล็กออกไซด์ต่ำกว่าทรายแม่น้ำมาก อย่างไรก็ตามความหนาแน่นปรากฏว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษเหล็กออกไซด์ โดยมีค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2,045 ถึง 2,429 kg/m³
3. การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเหล็กออกไซด์ในปริมาตรร้อยละ 5 ถึง 15 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้เศษเหล็กออกไซด์ การแทนที่ร้อยละ 10 สำหรับอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อแก้วลอย 0.55 พบค่ากำลังรับแรงอัดสูงถึง 630 ksc ที่การบ่มอายุ 28 วัน
4. การใช้เศษเหล็กออกไซด์ช่วยชะลอการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อได้รับความร้อนสูงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีเศษเหล็กออกไซด์ในปริมาตรที่เพิ่มขึ้นมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลง แม้ว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงโดยรวมลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเศษเหล็กออกไซด์แสดงความสามารถในการคงสภาพความแข็งแรงภายใต้อุณหภูมิสูงได้ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,000 °C ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษเหล็กออกไซด์ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือตั้งแต่ร้อยละ 51 ถึง 90

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

References

- American Society for Testing and Materials. (2006). *ASTM C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM C1437-07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. In *ASTM International*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C29/C29M-09 Standard Test Method for Bulk Density (" Unit Weight ") and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM C33/C33M-11 Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C109/C109M-13 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM C128-22 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- Bagatini, M.C., Fernandes, T., Silva, R., Galvão, D.F. and Flores, I.V. (2020). Mill Scale and Flue Dust Briquettes as Alternative Burden to Low Height Blast Furnaces. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
- Bautista-Marín, J.D., Esguerra-Arce, A. and Esguerra-Arce, J. (2021). Use of an Industrial Solid Waste as a Pigment in Clay Bricks and its Effects on the Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124848>
- Chindaprasirt, P., Lao-un, J., Zaetang, Y., Wongkvanklom, A., Phoo-ngernkham, T., Wongsas, A. and Sata, V. (2022). Thermal Insulating and Fire Resistance Performances of Geopolymer Mortar Containing Auto Glass Waste as Fine Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105178>
- Choi, S.C. and Lee, W.K. (2012). Effect of Fe_2O_3 on the Physical Property of Geopolymer Paste. *Advanced Materials Research*, 586, 126-129. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.126>
- Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I. and Batis, G. (2016). Influence of Iron Mill Scale Additive on the Physico-Mechanical Properties and Chloride Penetration Resistance of Concrete. *Advances in Cement Research*, 28(6), 389-402. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00129>

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Estephane, P., Garboczi, E.J., Bullard, J.W. and Wallevik, O.H. (2019). Three-Dimensional Shape Characterization of Fine Sands and the Influence of Particle Shape on the Packing and Workability of Mortars. *Cement and Concrete Composites*, 97, 125-142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.018>
- Fröhling, M. and Rentz, O. (2010). A Case Study on Raw Material Blending for the Recycling of Ferrous Wastes in a Blast Furnace. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.002>
- Furlani, E. and Maschio, S. (2016). Steel Scale Waste as Component in Mortars Production: An Experimental Study. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.02.001>
- Hebbache, K., Boutlikht, M., Douadi, A., Belebchouche, C., Benrebouh, I., Hammouche, R., Moretti, L., Chajec, A. and Czarnecki, S. (2024). Integrated Techno-Environmental Analysis of Finely Ground Silica Sand in Sustainable Mortar Production. *Buildings*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/buildings14103295>
- Kumar, S., Yankwa Djobo, J.N., Kumar, A. and Kumar, S. (2016). Geopolymerization Behavior of Fine Iron-Rich Fraction of Brown Fly Ash. *Journal of Building Engineering*, 8, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.08.005>
- Nath, P. and Sarker, P.K. (2014). Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Nuaklong, P., Boonchoo, N., Jongvivatsakul, P., Charinpanitkul, T. and Sukontasukkul, P. (2021). Hybrid Effect of Carbon Nanotubes and Polypropylene Fibers on Mechanical Properties and Fire Resistance of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122189>
- Ozturk, M., Depci, T., Karaaslan, M., Sevim, U.K., Akgol, O. and Ozdemir Hacıoglu, S. (2020). Synergetic Effect of Waste Tire Rubber and Mil Scale on Electromagnetic Wave Attenuation Properties of New Generation Mortar. *Journal of Building Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101249>
- Rashad, A.M. (2013). Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production and Composition - A Comprehensive Overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- Sedaghatdoost, A. and Behfarnia, K. (2018). Mechanical Properties of Portland Cement Mortar Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes at Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 176, 482-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.095>
- Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P. and Chindaprasit, P. (2018). Use of Crushed Clay Brick and Pumice Aggregates in Lightweight Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 1025-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.176>
- Zhang, Z. and Wang, H. (2015). 9 - Analysing the Relation Between Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Concrete Binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 235-264. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.2.235>