

อิทธิพลของผงแก้วทดแทนปูนซีเมนต์และทรายร่วมกันต่อกำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์

Effect of Combined Replacement of Cement and Sand with Glass Powder on Compressive Strength and Physical Properties of Mortar

อภิพงศ์ เจือสนธิ^{1*} นันทชัย ชูศิลป์¹ จิระศักดิ์ บุญเนื่อง¹ จรุณ เจริญเนตรกุล¹ และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์²
Apipong Juesanit^{1*} Nuntachai Chusilp¹ Jirasak Bunnueang¹ Charoon Charoennetkul¹ and Cherdsak Suksiripattanapong²

Received: February 23, 2026; Revised: May 30, 2026; Accepted: June 15, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพในการนำเศษแก้วเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ในรูปแบบการแทนที่รวมที่ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ต่อกำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่และความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคผงแก้ว ส่งผลให้ความต้องการน้ำในการหล่อลื่นผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GPF ร้อยละ 5 ร่วมกับการแทนที่ทรายด้วย GPC ร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 35.21 MPa อีกทั้งค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 3.85 และ 1.60 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่า GPF ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม ทำให้โครงสร้างมีความทึบแน่นมากขึ้น ในขณะที่การใช้ GPC ในปริมาณสูงจะส่งผลต่อกำลังอัดเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมขัดขวางการจัดเรียงตัวของมวลรวม ดังนั้นอัตราส่วนมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GPF ร้อยละ 5 ร่วมกับการแทนที่ทรายด้วย GPC ร้อยละ 5 ซึ่งช่วยลดปริมาณขยะแก้วและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ผงแก้ว; มอร์ตาร์; กำลังอัด

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 09 3930 5955, E - mail: apipong.j@rmutsvmail.com

Abstract

The objective of this research is to study the potential of reutilizing waste glass. The study examines the effects of the combined replacement of cement with fine glass powder (GPF) and sand with coarse glass powder (GPC) in proportions of 5, 10, 15, and 20 percent by weight on the compressive strength and physical properties of mortar. The results of the study indicated that the flow and density of the mortar tended to decrease with the increase of glass replacement levels due to the increased specific surface area of the glass powder particles, leading to a higher water demand to lubricate the particle surfaces. However, the replacement of cement with 5 percent GPF combined with the replacement of sand 5 percent GPC yielded the highest compressive strength of 35.21 MPa at 28 days. Additionally, this mixture exhibited the lowest porosity and water absorption values of 3.85 percent and 1.60 percent. Microstructural analysis revealed that GPF acted as a filler material, resulting in a denser structure, whereas excessive GPC content negatively affected compressive strength due to its angular particles hindering aggregate packing. In conclusion, the most appropriate mortar ratio is the replacement of cement with 5 percent GPF combined with the replacement of sand with 5 percent GPC, which helps reduce waste glass quantity and is environmentally friendly.

Keywords: Glass Powder; Mortar; Compressive Strength

บทนำ

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัตถุดิบ ควบคู่กับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน จากข้อมูล บัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยปี พ.ศ. 2561 ซึ่งภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์มีการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 10.77 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เกินครึ่ง คือ กว่าร้อยละ 51.28 (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2022) โดยในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 27.20 ล้านตัน (Pollution Control Department, 2025) ในขณะที่ สถานการณ์ระดับโลกมีปริมาณขยะมูลฝอยประมาณ 200 ล้านตันและประมาณร้อยละ 7 ของขยะดังกล่าวเป็นขยะแก้ว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแก้วโซดาไลม์ (Muhedin and Ibrahim, 2023) อย่างไรก็ตาม ทั่วโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์ ทรัพยากรทราย ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก้วและคอนกรีตในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา การใช้ทรายทั่วโลกได้เพิ่มขึ้น อย่างก้าวกระโดดและระดับประมาณ 40 - 50 พันล้านเมตริกตันต่อปี (United Nations Environment Programme, 2022) ซึ่งการนำผงแก้วมาประยุกต์ใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้าง จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดปัญหาก๊าซเรือนกระจก และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติไปพร้อมกัน โดยผงแก้วมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก (Thatuchirangkul et al., 2025) และกระบวนการผลิตยังส่งผลให้แก้วมีโครงสร้างเป็นวัสดุอสัณฐาน (Phoophool, 2015) ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) จากผลศึกษาพบว่าการใช้ผงแก้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สามารถเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตได้ร้อยละ 9 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การใช้ผงแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 ยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของ คอนกรีต โดยไม่กระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวและการขยายตัว (Aliabdo et al., 2016)

ในด้านกลไกทางเคมี เมื่อนำแก้วมาบดให้มีความละเอียดสูง SiO_2 ในผงแก้วจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งมีความสำคัญ ต่อการพัฒนากำลังอัด อีกทั้งยังช่วยลดความพรุน ซึ่งเป็นการปรับปรุงทั้งคุณสมบัติทางกลและความทนทานในคอนกรีต

(Dong et al., 2021) อย่างไรก็ตามหนึ่งในข้อกังวลสำคัญเกี่ยวกับการใช้แก้วในคอนกรีต คือ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาคแก้วที่มีปริมาณซิลิกาสูงและอัลคาไล เรียกว่า ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali Silica Reaction, ASR) (Zheng, 2016) ซึ่งจะเกิดเป็นเจล (Gel) ซึ่งมีคุณลักษณะดูดซับน้ำและการขยายตัว ทำให้เกิดแรงดันภายในคอนกรีต ซึ่งหากแรงดันนั้นเกินกว่ากำลังคอนกรีตจะรับได้ คอนกรีตก็จะเกิดการแตกร้าว (Thaipum and Srisoros, 2013) ทั้งนี้การนำเอาผงแก้วที่มีความละเอียดเล็กกว่า $100\ \mu\text{m}$ มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน และทำการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์พบว่า การขยายตัวที่ 14 วัน น้อยกว่าร้อยละ 0.09 สำหรับทุกอัตราส่วน ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของ ASTM C1260 ที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.1 แสดงให้เห็นว่าไม่มีการขยายตัวที่เป็นอันตรายจาก ASR เนื่องจากอนุภาคผงแก้วที่มีความละเอียดสูงจะทำหน้าที่เป็นวัสดุปอซโซลานที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยจะทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพื่อสร้าง C-S-H แทนที่จะเกิด ASR (Sharifi et al., 2016) อีกทั้งยังพบว่าปริมาณการแทนที่ของผงแก้วมีผลต่อการยับยั้งปฏิกิริยา ASR มากกว่าความละเอียด (Huang et al., 2021)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นการศึกษาการนำผงแก้วมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ หรือมวลรวมละเอียด เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งแยกจากกัน (Dong et al., 2021) ส่งผลให้ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของการแทนที่วัสดุทั้งสองส่วนพร้อมกัน ยังมีอยู่อย่างจำกัด แม้ว่าเริ่มจะมีงานวิจัยบางส่วนศึกษาการแทนที่ร่วมกันบ้างแล้ว (Baikerikar et al., 2023; Muhedin and Ibrahim, 2023) แต่การทำความเข้าใจถึงผลกระทบแบบบูรณาการที่เกิดจากการแทนที่ทั้งปูนซีเมนต์และทรายพร้อมกันยังคงเป็นช่องว่างงานวิจัยที่สำคัญ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายด้วยผงแก้ว ในการแทนที่แบบรวมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน อันจะเป็นแนวทางในการจัดการขยะแก้วและพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement Type General Use) ตาม มอก.2594-2567 ทรายแม่น้ำละเอียดขนาดที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งตามมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.65 ผงแก้วบดหยาบ (Glass Powder Coarse, GPC) ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำตะแกรงเบอร์ 100 มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.56 และผงแก้วบดละเอียด (Glass Powder Fine, GPF) มีร้อยละการค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 33 โดยลักษณะทางกายภาพของวัสดุทั้งหมดดังรูปที่ 1



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก



(ข) ผงแก้วบดหยาบ



(ค) ผงแก้วบดละเอียด



(ง) ทรายแม่น้ำ

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2. ส่วนผสมของมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งหมด 17 รูปแบบ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วดหยาบ (GPC) ประกอบด้วย มอร์ตาร์ควบคุม (CT), GPF ในปริมาณร้อยละ 5 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ถึง มอร์ตาร์ 5GPF-20GPC, GPF ในปริมาณร้อยละ 10 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 10GPF-5GPC ถึง 10GPF-20GPC, GPF ในปริมาณร้อยละ 15 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 15GPF-5GPC ถึงมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC และ GPF ในปริมาณร้อยละ 20 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 20GPF-5GPC ถึงมอร์ตาร์ 20GPF-20GPC โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังตารางที่ 1 โดยทุกตัวอย่างมอร์ตาร์จะมีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ 110 ± 5

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก

No.	Sample ID	Cement	GPF	Sand	GPC	W/B
1	CT	100	-	275	-	0.56
2	5GPF-5GPC	95	5	270	5	0.56
3	5GPF-10GPC	95	5	265	10	0.56
4	5GPF-15GPC	95	5	260	15	0.56
5	5GPF-20GPC	95	5	255	20	0.55
6	10GPF-5GPC	90	10	270	5	0.57
7	10GPF-10GPC	90	10	265	10	0.57
8	10GPF-15GPC	90	10	260	15	0.56
9	10GPF-20GPC	90	10	255	20	0.55
10	15GPF-5GPC	85	15	270	5	0.59
11	15GPF-10GPC	85	15	265	10	0.59
12	15GPF-15GPC	85	15	260	15	0.58
13	15GPF-20GPC	85	15	255	20	0.58
14	20GPF-5GPC	80	20	270	5	0.59
15	20GPF-10GPC	80	20	265	10	0.58
16	20GPF-15GPC	80	20	260	15	0.59
17	20GPF-20GPC	80	20	255	20	0.58

3. การทดสอบการไหลแม่ (Flow)

การทดสอบการไหลแม่ (Flow) เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Water Requirement Test) ของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ค่าการไหลแม่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C230 ด้วยโต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบทดสอบ (D_1) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์บนแท่นทดสอบ (D_2) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) โดยคำนวณค่าการไหลแม่ดังสมการที่ (1)

$$Flow(\%) = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100 \quad (1)$$

4. การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบหาความหนาแน่น (Bulk Density) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการอบแห้งไปชั่งน้ำหนักก้อนแห้ง (A) มีหน่วยเป็นกรัม (g) หาค่าด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่างซึ่งคำนวณจากผลต่างของน้ำหนักหลังแช่น้ำ (B)

มีหน่วยเป็นกรัม (g) กับน้ำหนักขังในน้ำ (C) มีหน่วยเป็นกรัม (g) แล้วคูณด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำ (ρ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยความหนาแน่นที่คำนวณได้จะมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ดังสมการที่ (2)

$$\text{Bulk density } (\text{kg} / \text{m}^3) = \left(\frac{A}{B - C} \right) \times \rho \quad (2)$$

5. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ \text{C}$ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักคงที่ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้งและบันทึกค่า (M_{dry}) มีหน่วยเป็นกรัม (g) จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาเช็ดทำความสะอาดผิวหน้าให้แห้ง ซึ่งตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า (M_{sat}) มีหน่วยเป็นกรัม (g) โดยค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากผลต่างของน้ำหนัก (M_{sat}) กับ (M_{dry}) หาคด้วยน้ำหนัก (M_{dry}) แล้วคูณด้วย 100 ดังสมการที่ (3)

$$\text{Absorption}(\%) = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{dry}}} \times 100 \quad (3)$$

6. การทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์ (Porosity)

การทดสอบความพรุนใช้การประยุกต์การทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C642 โดยใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร อายุการบ่ม 28 วัน น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (M_{sat}) และน้ำหนักอบแห้ง (M_{dry}) มารวมคำนวณกับน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ขังในน้ำ (M_w) ซึ่งการคำนวณความพรุนดังสมการที่ (4)

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{sat}} - M_w} \times 100 \quad (4)$$

7. การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม นำไปบ่มในน้ำสะอาดจนครบอายุการบ่มที่กำหนดคือ 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งและวัดขนาดก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จนกระทั่งขึ้นตัวอย่างวิบัติ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c) มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa) สามารถคำนวณได้จากค่าแรงอัดประลัย (P) มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (kN) หาคด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2) ดังสมการที่ (5)

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (5)$$

ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติของวัสดุ

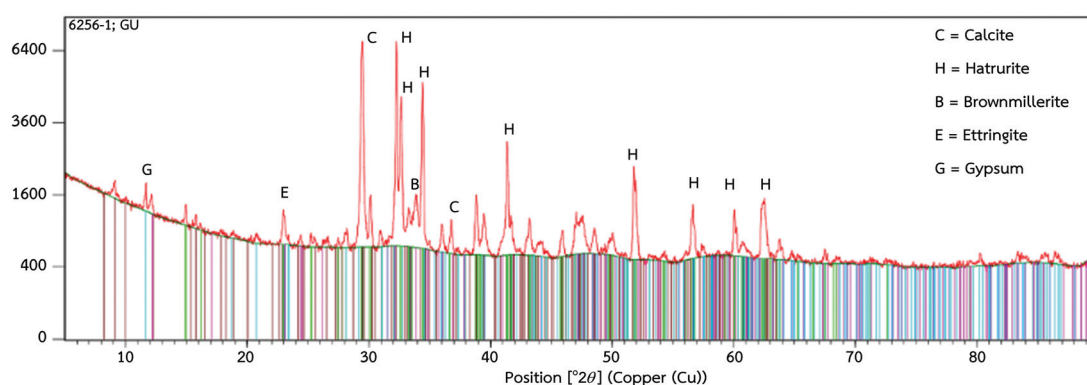
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและผงแก้วซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) จากตารางที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบออกไซด์หลักที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 64.24 ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบรองร้อยละ 13.96 ซึ่ง CaO กับ SiO_2 ทำปฏิกิริยากันจะได้สารประกอบหลัก คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งจะช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะเริ่มต้นและระยะยาวตามลำดับ (Sethabutr, 2003)

และผงแก้วมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.18 และในผงแก้วมีปริมาณอัลคาไล คือ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งปริมาณอัลคาไลดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเรื่องปฏิกิริยา อัลคาไล-ซิลิกา (Alkali-Silica Reaction, ASR) หากใช้แก้วเป็นวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อบดแก้วจนมี ขนาดเล็กเพียงพอ จะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reactivity) ในขณะเดียวกันก็ช่วยยับยั้งการขยายตัว อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา ASR ได้ (Dong et al., 2021)

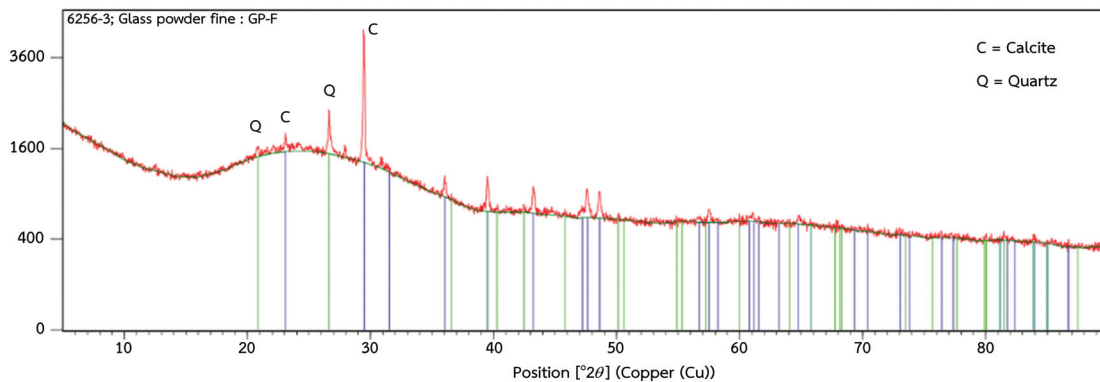
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ผงแก้ว
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	13.96	65.18
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	2.99	2.45
ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.32	1.06
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.24	20.52
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.54	1.89
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.03	5.93
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.10	0.57
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	3.87	0.10

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางแร่ซึ่งอยู่ในรูปของผลึกของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและผงแก้วบดละเอียด ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีโครงสร้างเป็นผลึกอย่างชัดเจน โดยมีจุด Peak Intensity เหนือขีดที่สูงสุดที่มุม 2-Theta 29.47 ซึ่งตรงกับแร่ Calcite (CaCO_3) และที่มุม 32.26 ตรงกับแร่ Hatrurite (Ca_3SiO_5) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ (Wangbooncong, 2022) ในขณะที่ผงแก้ว บดละเอียดแสดงลักษณะกราฟเป็นเนินกว้างในช่วงมุม 20 ถึง 35 องศา ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous Silica) (Navaneetha et al., 2025) แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงปรากฏยอดแหลมซ้อนทับอยู่ โดยพบ Peak ของแร่ Calcite ที่มุม 29.46 และแร่ Quartz (SiO_2) ที่มุม 26.65

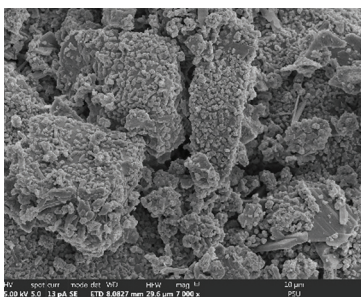


รูปที่ 2 การวิเคราะห์สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

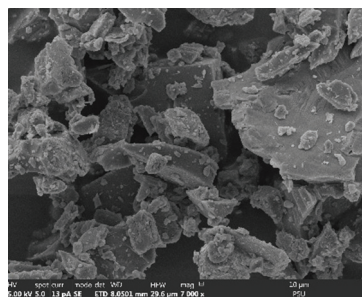


รูปที่ 3 การวิเคราะห์สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของผงแก้วดละเอียด

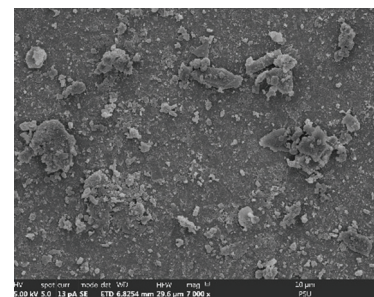
จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ผงแก้วดละเอียด (GPF) และผงแก้วดหยาบ (GPC) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 7,000 เท่า พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และพื้นผิวขรุขระ ในขณะที่ผงแก้วดละเอียด มีลักษณะเป็นเกล็ดบางและคม รูปร่างไม่แน่นอน แตกเป็นเศษเล็ก ๆ และมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่วนผงแก้วดหยาบ เป็นชิ้นแตกเหลี่ยมมุม มีขอบคม และพื้นผิวขรุขระ (รูปที่ 4)



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก



(ข) ผงแก้วดละเอียด



(ค) ผงแก้วดหยาบ

รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 7,000 เท่า ของวัสดุประสาน

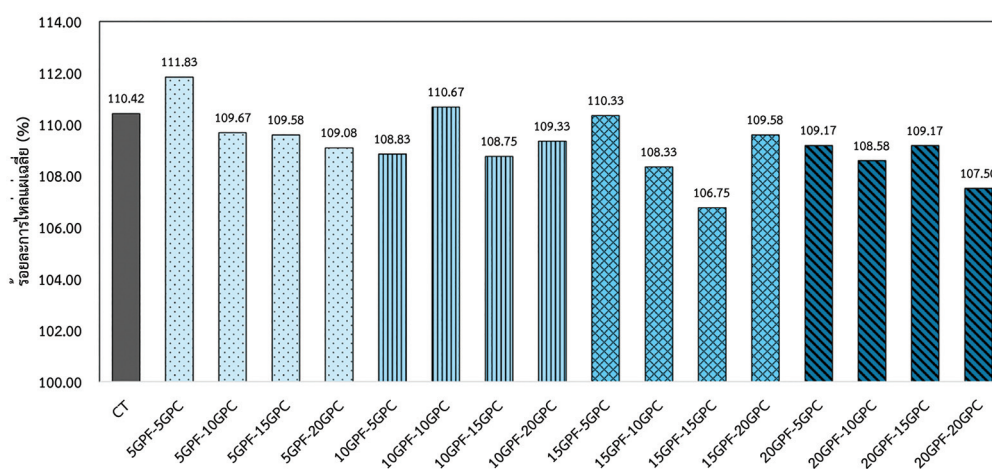
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ทราาย ผงแก้วดละเอียด (GPF) และผงแก้วดหยาบ (GPC) ซึ่งประกอบด้วยค่าโมดูลัสความละเอียด ขนาดอนุภาค (D_{50}) และ (D_{10}) ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และความถ่วงจำเพาะ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	โมดูลัส ความละเอียด	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	ร้อยละค้ำบนตะแกรง มาตรฐานเบอร์ 325	ความถ่วง จำเพาะ
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	-	-	-	34	3.13
ทราาย	2.65	0.67	0.20	-	2.60
ผงแก้วดละเอียด (GPF)	-	-	-	33	2.50
ผงแก้วดหยาบ (GPC)	2.56	0.63	0.20	-	2.53

2. การทดสอบการไหลแผ่

ค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างดังรูปที่ 5 พบว่ามอร์ตาร์ CT มีค่าการไหลแผ่เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 110.42 และมีค่าสูงที่สุดในมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ที่ร้อยละ 111.83 อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ที่เพิ่มขึ้น โดยมีมอร์ตาร์ 15GPF-15GPC มีค่าการไหลแผ่ต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 106.75 ทั้งนี้เป็นผลมาจากผงแก้วที่มีความละเอียดสูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ส่งผลให้เกิดความต้องการน้ำในการหล่อลื่นผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของมอร์ตาร์สูงขึ้นและความสามารถในการทำงานได้ลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Li et al. (2022) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ผงแก้วนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของผงแก้วเล็กลง พื้นที่ผิวของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ลดลง



รูปที่ 5 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์

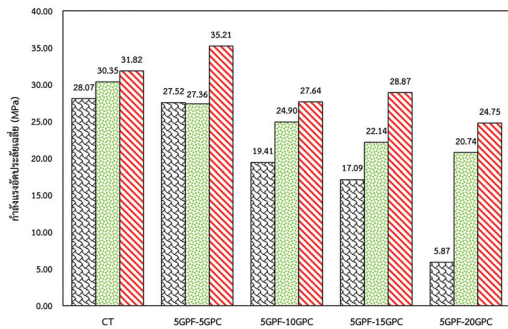
3. การทดสอบกำลังอัด

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกันในสัดส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถอธิบายผลตามอายุการบ่มได้ดังรูปที่ 6 ดังนี้

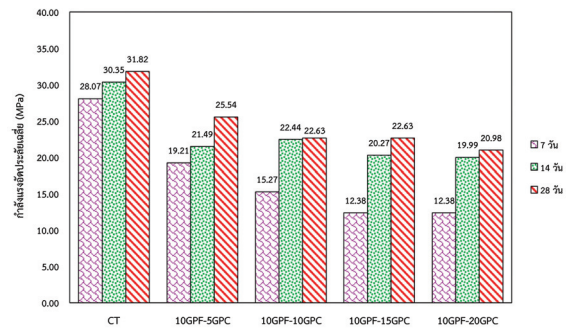
ในช่วงอายุการบ่มเริ่มต้น 7 วัน มอร์ตาร์ CT มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 28.07 MPa เมื่อพิจารณาตัวอย่างมอร์ตาร์พบว่าส่วนใหญ่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT โดยเฉพาะมอร์ตาร์ 5GPF-20GPC ที่ลดลงเหลือเพียง 5.87 MPa อย่างไรก็ตาม มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ยังคงกำลังอัดใกล้เคียง มอร์ตาร์ CT ที่ 27.52 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ผงแก้วปริมาณน้อยไม่กระทบกำลังอัดเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน มอร์ตาร์ CT มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นเป็น 30.35 MPa ขณะที่ส่วนผสมซึ่งมีกำลังอัดต่ำในช่วงแรก เช่น มอร์ตาร์ 5GPF-20GPC มีการพัฒนากำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญเป็น 20.74 MPa นอกจากนี้ มอร์ตาร์ 20GPF-5GPC มีกำลังอัดถึง 22.84 MPa สะท้อนถึงอิทธิพลของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เริ่มทำปฏิกิริยาเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น

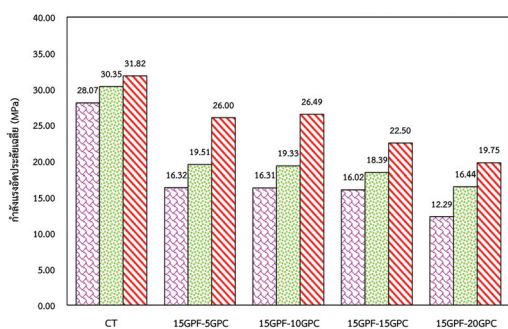
ที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ CT มีกำลังอัด 31.82 MPa โดยมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีกำลังอัดสูงสุด 35.21 MPa ขณะที่มอร์ตาร์ 5GPF-15GPC และมอร์ตาร์ 10GPF-5GPC มีกำลังอัด 28.87 MPa และ 25.54 MPa ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาการกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากอายุ 14 วัน การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเป็นผลมาจาก 2 กลไก คือ ผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เป็นวัสดุเติมเต็มที่ช่วยลดช่องว่างภายใน (Filler Effect) ทำให้โครงสร้างอัดแน่นและลดความพรุน ควบคู่กับปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่ซิลิกาอสัณฐานใน GPF ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดเป็น C-S-H เพิ่มเติม ทั้ง 2 กลไกนี้จึงช่วยให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นและรับแรงอัดได้สูงขึ้น



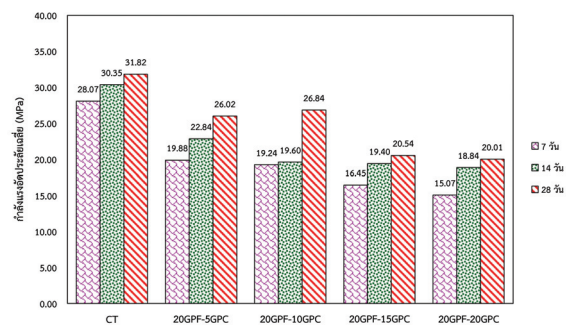
(ก) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 5GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20



(ข) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 10GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20



(ค) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 15GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20

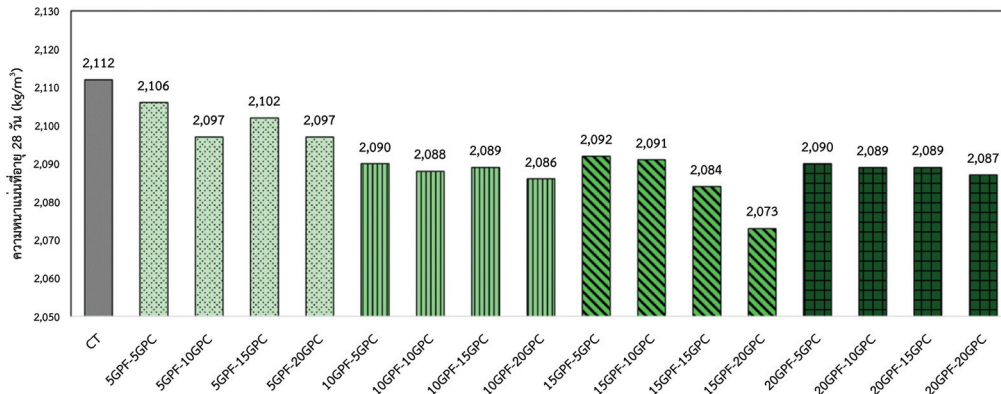


(ง) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 20GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20

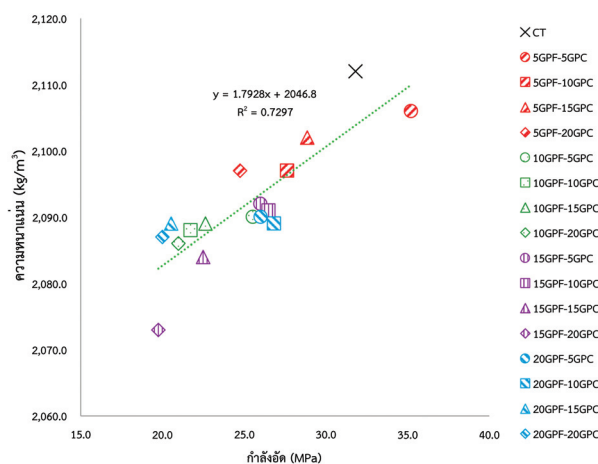
รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

4. การทดสอบความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ CT มีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ $2,112 \text{ kg/m}^3$ ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกัน มีค่าความหนาแน่นลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ของผงแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีความหนาแน่นเท่ากับ $2,106 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ CT และมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC มีความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ $2,073 \text{ kg/m}^3$ การลดลงของความหนาแน่นดังกล่าวเป็นผลมาจากผงแก้วมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Bahar et al. (2025) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่นพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์และทรายด้วยผงแก้วบดละเอียดและหยาบ ตามลำดับ ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของความหนาแน่นรวม ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากความถ่วงจำเพาะของผงแก้วที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทรายประกอบกับปรากฏการณ์การเจือจางปูนซีเมนต์ เมื่อมีการแทนที่ด้วย GPF ในปริมาณสูง ทำให้เกิดปรากฏการณ์เจือจาง (Dilution Effect) เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้น้อยลง ส่งผลให้การเกิด C-S-H ลดลงจนไม่สามารถเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างได้อย่างสมบูรณ์ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลง (รูปที่ 7 และ 8)



รูปที่ 7 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5. ผลการทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์

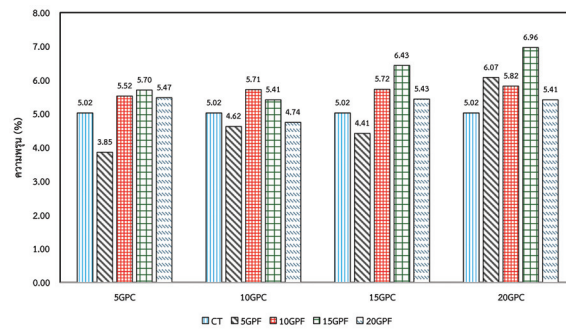
ผลการทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์ดังรูปที่ 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังอัด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีความพรุนต่ำสุดที่ร้อยละ 3.85 ส่งผลให้รับกำลังอัดได้สูงสุดที่ 35.21 MPa ความทึบแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากกลไกการเติมเต็ม (Filler Effect) ของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่ช่วยอุดช่องว่างร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่สร้าง C-S-H เพิ่มเติม

ในทางกลับกันมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC มีความพรุนสูงที่สุดถึงร้อยละ 6.96 และกำลังอัดลดลงเหลือ 19.75 MPa สาเหตุหลักเกิดจากปรากฏการณ์เจือจาง (Dilution Effect) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ปริมาณ C-S-H หลักไม่เพียงพอที่จะอุดช่องว่าง ประกอบกับปัจจัยทางกายภาพของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ทั้งรูปทรงเหลี่ยมมุมที่ขัดขวางการจัดเรียงตัว (Packing) จนเกิดช่องว่างอากาศ และลักษณะพื้นผิวซึ่งทำให้การยึดเหนี่ยวเชิงกลบริเวณรอยต่อกับซีเมนต์เพสต์ลดลง (รูปที่ 10)

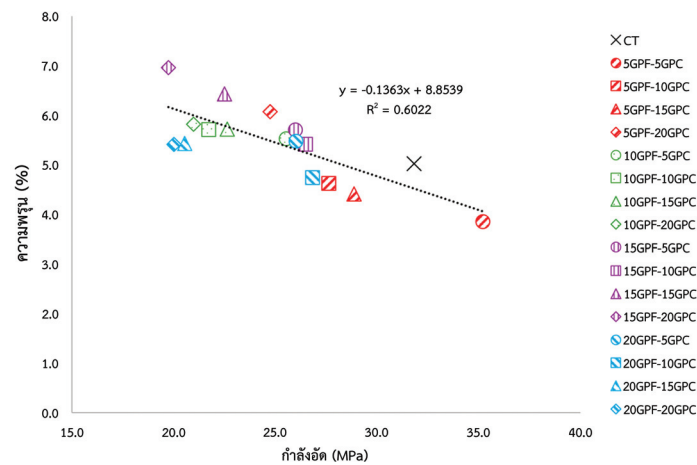
6. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับความพรุนและกำลังอัด โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีการดูดซึมน้ำต่ำสุดที่ร้อยละ 1.60 และให้กำลังอัดสูงสุดที่ 35.21 MPa ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นผลมาจาก Filler Effect ของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เข้าไปแทรกอุดรูพรุนร่วมกับ Pozzolanic Reaction ที่สร้าง C-S-H เพิ่มเติม ทำให้โครงสร้างมีความทึบแน่นสูงขึ้นในทางกลับกัน เมื่อใช้ผงแก้วบดหยาบ (GPC) ในสัดส่วนที่สูง เช่น มอร์ตาร์ 15GPF-20GPC ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.14 การลดลงของความทึบแน่นนี้เกิดจาก Dilution Effect ที่ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงเนื่องจากการถูกแทนที่ในปริมาณมาก จนผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์หลักลดลง ประกอบกับรูปทรงเหลี่ยมมุมของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ไปขัดขวางการจัดเรียงตัว (Packing) ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างภายในมอร์ตาร์มากขึ้น

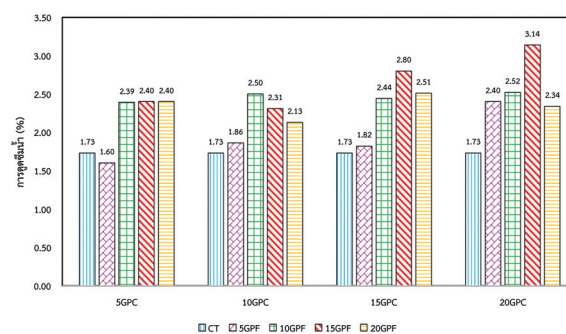
สอดคล้องกับแนวโน้มดังรูปที่ 12 ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงลบอย่างชัดเจน โดยมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีแนวโน้มของการดูดซึมน้ำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



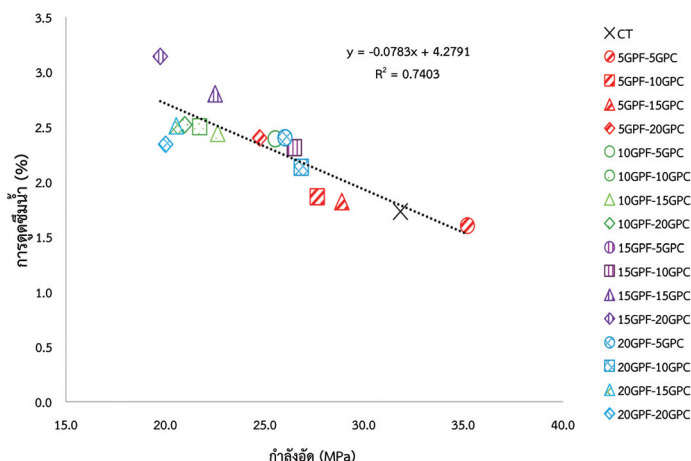
รูปที่ 9 ความพรุนของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความพรุนและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์กับกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน

สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงแก้ว โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกันในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก สรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่และความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดที่อัตราส่วนผสม 15GPF-20GPC เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของผงแก้วที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และรูปทรงอนุภาคที่มีเหลี่ยมมุมช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้มอร์ตาร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาความสามารถในการทำงาน

2. กำลังอัดของมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 35.21 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วให้สูงขึ้น กำลังอัดกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dilution Effect) และลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมและมีขอบคมของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของมวลรวม จึงเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการรับแรงลดลงเมื่อใช้ผงแก้วแทนที่ในปริมาณมาก

3. อัตราส่วนมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC เนื่องจากมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 3.85 และ 1.60 โดยผงแก้วบดละเอียด (GPF) ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler Effect) เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคช่วยให้โครงสร้างจุลภาคมีความทึบแน่นและมีกำลังอัดที่สูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนด้านเครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนห้องปฏิบัติการเพื่อการทดสอบ ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. and Aboshama, A.Y. (2016). Utilization of Waste Glass Powder in the Production of Cement and Concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>

- Bahar, A., Younsi, A., Hamami, A.E.A. and Bastidas-Arteaga, E. (2025). Effect of Recycled Waste Glass Color on the Properties of High-Volume Glass Powder Cement Pastes. *Results in Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107910>
- Baikerikar, A., Mudalgi, S. and Ram, V.V. (2023). Utilization of Waste Glass Powder and Waste Glass Sand in the Production of Eco-Friendly Concrete. *Construction and Building Materials*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131078>
- Dong, W., Li, W. and Tao, Z. (2021). A Comprehensive Review on Performance of Cementitious and Geopolymeric Concretes with Recycled Waste Glass as Powder, Sand or Cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664>
- Huang, D., Sun, P., Gao, P., Liu, G., Wang, Y. and Chen, X. (2021). Study on the Effect and Mechanism of Alkali-Silica Reaction Expansion in Glass Concrete. *Sustainability*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131910618>
- Li, Q., Qiao, H., Li, A. and Li, G. (2022). Performance of Waste Glass Powder as a Pozzolanic Material in Blended Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>
- Muhedin, D.A. and Ibrahim, R.K. (2023). Effect of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement & Sand in Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512>
- Navaneetha, E., Rao, P.N. and Bahurudeen, A. (2025). Development of Sustainable and Durable Ternary Blended Concrete Using Sugarcane Bagasse Ash and Glass Powder. *Construction and Building Materials*, 466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140329>
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2022). *Thailand's Fourth National Communication*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Thailand%20NC4_22122022.pdf
- Phoophool, P. (2015). *Mechanical Behavior of Cement Paste Containing Glass Dust* [Master's thesis, Thammasat University]. Thammasat University Theses. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5310031538_3992_3037.pdf
- Pollution Control Department. (2025). *Thailand Municipal Solid Waste Disposal Site Status Report, 2024*. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2025/06/pcdnew-2025-06-09_02-33-11_404990.pdf
- Sethabutr, C. (2003). *Concrete Technology* (11thed). CPAC Concrete Academy.
- Sharifi, Y., Afshoon, I., Firoozjaei, Z. and Momeni, A. (2016). Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, 337-353. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0141-z>
- Thaipum, S. and Srisoros, W. (2013). Expansion and Mechanical Properties of ASR-Affected Concrete in Thailand. *The 18th National Convention on Civil Engineering (NCCE-18)*, MAT206-210.
- Thatuchirangkul, N., Jitchaiyaphum, K., Maythathirut, R., Tiyasangthong, S., Yoosuk, P. and Suksiripattanapong, C. (2025). Engineering and Microstructure Properties of Cellular Lightweight Mortar from Recycled Glass mixed with Alkali-activated Fly Ash. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 18(2), 103-116. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/260786> (in Thai)
- United Nations Environment Programme. (2022). *Sand and Sustainability 10 Strategic: Recommendations to Avert a Crisis*. <https://unepgrid.ch/en/resource/2022SAND>



- Wangbooncong, K. (2022). *Optimum Proportion of Municipal Waste Ashes and Biomass Ashes on Mechanical and Durable Properties of Mortars* [Master's thesis, Rajamangala University of Technology Srivijaya]. Institutional Repository @ RUTS. <https://www.repository.rmutsv.ac.th/handle/123456789/3970>
- Zheng, K. (2016). Pozzolanic Reaction of Glass Powder and Its Role in Controlling Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Composites*, 67, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008>