

อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์
แมกนีเซียมฟอสเฟตสำหรับงานซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต

Effect of sand-to-binder and water-to-binder ratios on the mechanical properties of
magnesium phosphate cement mortar for concrete pavement repair

รณัญญา สังกีสแก้ว และ เจริญชัย ฤทธิรุทร *

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Charoenchai.ri@rmuti.ac.th

Received 15 July 2025; Received in revised form 16 September 2025; Accepted 21 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานการขัดสีของมอร์ตาร์ซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต (MPC) สำหรับงานซ่อมแซมผิวจราจรคอนกรีต สัดส่วนผสมถูกออกแบบโดยกำหนดอัตราส่วนโมลาร์ของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (M/P) คงที่ที่ 2.25 และใช้โบรอกซ์เป็นสารหน่วงการก่อตัวในปริมาณร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO ตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วน S/B ที่ 1.0, 1.2 และ 1.4 และอัตราส่วน W/B ที่ 0.35, 0.375 และ 0.40 สมบัติของมอร์ตาร์ถูกประเมินผ่านการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน และการทดสอบความต้านทานการขัดสี ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วน W/B ที่ 0.35 ให้สมบัติเชิงกลและความทนทานดีที่สุดอย่างสม่ำเสมอ โดยให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (29 MPa) และการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีต่ำที่สุด (0.12%) ในทางกลับกัน อิทธิพลของอัตราส่วน S/B มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติที่ต้องการ อัตราส่วน S/B ที่ 1.4 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (26 MPa) ในขณะที่อัตราส่วน S/B ที่ 1.0 ให้ความต้านทานการขัดสีดีที่สุด (สูญเสียน้ำหนัก 0.14%) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับสัดส่วนผสมของ MPC ให้สอดคล้องกับสมบัติที่ต้องการในงานซ่อมแซมแต่ละประเภท ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

คำสำคัญ: ปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต, อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ความต้านทานการขัดสี, กำลังอัด

ABSTRACT

This research aims to investigate the effects of the sand-to-binder ratio (S/B) and water-to-binder ratio (W/B) on the mechanical properties and abrasion resistance of magnesium phosphate cement (MPC) mortar for concrete pavement repair applications. The mix designs were based on a fixed molar ratio of MgO to KH_2PO_4 (M/P) of 2.25, with borax added at 7.5% by weight of MgO as a retarder. The studied variables included S/B ratios of 1.0, 1.2, and 1.4, and

W/B ratios of 0.35, 0.375, and 0.40. Mortar properties were evaluated through compressive strength tests at 1, 3, and 28 days, and an abrasion resistance test. The results consistently indicated that a W/B ratio of 0.35 provided the best overall mechanical and durability performance, yielding the highest compressive strength (29 MPa) and the lowest abrasion loss (0.12%). Conversely, the effect of the S/B ratio was property dependent. An S/B ratio of 1.4 achieved the highest compressive strength (26 MPa), whereas an S/B ratio of 1.0 provided the best abrasion resistance (0.14% weight loss). This study highlights the critical need to tailor MPC mix proportions to the specific performance requirements of different repair applications, providing essential data for engineering design.

Keywords: Magnesium Phosphate Cement, Sand-to-Binder Ratio, Water-to-Binder Ratio, Abrasion Resistance, Compressive Strength

บทนำ

โครงสร้างพื้นฐานคอนกรีต เช่น ถนน ทางด่วน และสะพาน เป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม แต่โครงสร้างเหล่านี้ต้องเผชิญกับการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและการรั่วซึมที่บดบังทุก ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายที่จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน การซ่อมแซมที่ล่าช้าไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย แต่ยังก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการหยุดชะงักของการจราจร [1-2] ดังนั้น ความต้องการวัสดุซ่อมแซมที่สามารถก่อตัวและพัฒนาได้ง่ายได้อย่างรวดเร็วจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต (magnesium phosphate cement, MPC) ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุทางเลือกที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานซ่อมแซมเร่งด่วน MPC เป็นวัสดุประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาการสะเทินกรด-เบส (acid-base reaction) ระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่เผาแบบ dead-burned กับสารละลายฟอสเฟต [3-4] เช่น โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยา คือ k-struvite ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลึกไฮเดรตที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานหลักในระบบ [5-6] คุณสมบัติเด่นของ MPC ที่ทำให้เหมาะกับงานซ่อมแซม ได้แก่ การก่อตัวที่รวดเร็วมาก การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นที่สูง

การยึดเกาะที่ดีเยี่ยมกับคอนกรีตเดิม และความทนทานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง [7]

อย่างไรก็ตาม การนำ MPC มาใช้งานอย่างแพร่หลายยังคงมีความท้าทายหลายประการ คุณสมบัติที่โดดเด่นที่สุดคือระยะเวลาก่อตัวที่สั้นมาก ซึ่งอาจสั้นเพียงไม่กี่นาทีหากไม่มีการใช้สารหน่วงการก่อตัว ทำให้การทำงานภาคสนามเป็นไปได้ยาก [8] นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MPC ยังเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูง (highly exothermic) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเค้นจากความร้อน (thermal stress) [9] และการแตกร้าวในงานซ่อมแซมที่มีปริมาตรขนาดใหญ่ และยังพบว่า MPC อาจมีการสูญเสียกำลังเมื่อแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานาน ปัจจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบสัดส่วนผสม (mix design) เป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมสมบัติของ MPC ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ในการออกแบบสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลอย่างสูงต่อสมบัติของวัสดุคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่าการลดอัตราส่วน W/B จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและความหนาแน่นของโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่ลดลงส่งผลให้ความพรุนในเนื้อวัสดุต่ำลง [10-12] ในขณะที่ผลของอัตราส่วน S/B มีความซับซ้อนกว่า อัตราส่วนนี้ส่งผล

ต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) ความหนาของชั้นฟิล์มพาสต์ (paste film thickness) และสมดุระหว่างโครงสร้างของมวลรวมกับปริมาณวัสดุประสาน การเลือกอัตราส่วน S/B ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลได้ แต่หากไม่เหมาะสมอาจทำให้กำลังลดลงได้

แม้ว่าอิทธิพลของอัตราส่วน W/B และ S/B จะเป็นที่ยอมรับกันดีในหลักการทั่วไป แต่ยังคงการศึกษาเชิงระบบที่เปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรทั้งสองนี้ต่อสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ได้แก่ สมบัติเชิงกลโดยรวม (bulk mechanical property) เช่น กำลังอัด และสมบัติด้านความทนทานของพื้นผิว (surface durability property) เช่น ความต้านทานการขีดสี ภายใต้แผนการทดลองเดียวกัน การทำความเข้าใจความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางปฏิบัติ เนื่องจากงานซ่อมแซมแต่ละประเภทมีความต้องการที่ต่างกัน เช่น การซ่อมแซมโครงสร้างรับแรงต้องการกำลังอัดสูง ในขณะที่การซ่อมแซมผิวจราจรต้องการความต้านทานการขีดสีสูง การค้นหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด จึงไม่ใช่การหาคำตอบเดียว แต่เป็นการทำความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน (trade-off) เพื่อเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน S/B และ W/B ต่อกำลังอัดและความต้านทานการขีดสีของมอร์ตาร์ MPC อย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวัสดุซ่อมแซมประสิทธิภาพสูงสำหรับงานวิศวกรรมโยธา

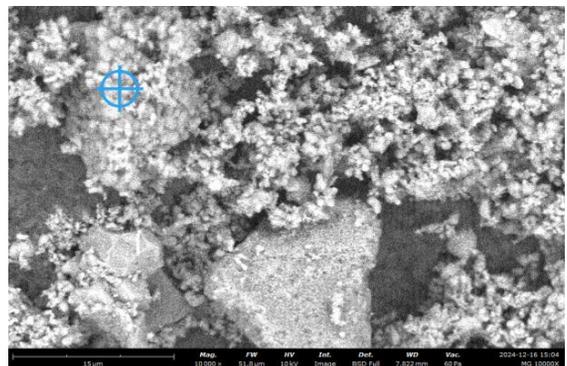
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) ที่มีต่อกำลังอัดและความต้านทานการขีดสีของมอร์ตาร์ MPC
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานการขีดสีของมอร์ตาร์ MPC
3. เพื่อระบุสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมที่ต้องการสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความทนทานของพื้นผิวที่ต่างกัน

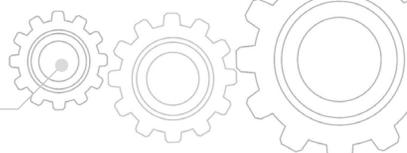
วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักมีความละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมโครเมตร คุณสมบัติทางกายภาพของผง MgO ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์เชิงพลังงาน (EDX) ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าองค์ประกอบของ MgO บริเวณผิวประกอบด้วยธาตุแมกนีเซียมประมาณ 35–49% โดยน้ำหนัก และตรวจพบออกซิเจนกับคาร์บอนในปริมาณสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาการคาร์บอนेटที่ผิวของอนุภาค MgO ลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลต่อสมบัติการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของ MPC ในเวลาต่อมา องค์ประกอบธาตุของผง MgO แสดงใน ตารางที่ 1 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีโดยรวมของ MgO แสดงใน ตารางที่ 2 ด้านวัสดุประสานฟอสเฟต ใช้โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99% และใช้บอแรกซ์ (sodium tetraborate) เป็นสารหน่วงการก่อตัว โดยในการทดลองนี้เลือกใช้บอแรกซ์ปริมาณคงที่ที่ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุผสมละเอียด มีค่าดัชนีความละเอียด (fineness modulus) เท่ากับ 2.6 และใช้น้ำกลั่นในการผสมทั้งหมด



รูปที่ 1 ลักษณะผิวแมกนีเซียมออกไซด์กำลังขยาย 10,000 เท่า และตำแหน่งยิง EDX



ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของแมกนีเซียมออกไซด์

สัญลักษณ์	ธาตุ	สัดส่วน ธาตุ	สัดส่วนของ มวล
C	Carbon	17.172	11.2
O	Oxygen	45.575	39.6
Mg	Magnesium	37.252	49.2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแมกนีเซียมออกไซด์

องค์ประกอบทางเคมี	(%)
SiO ₂	3.00
MgO	92.00
Al ₂ O ₃	0.50
Fe ₂ O ₃	0.50
CaO	1.50
LOI	4.00

2. สัดส่วนผสม

ในการศึกษานี้ อัตราส่วนโมลาร์ M/P ถูกกำหนดค่าคงที่เท่ากับ 2.25 และปริมาณบอแรกซ์คงที่ที่ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO แผนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2

ชุดการศึกษาผลของอัตราส่วน S/B: กำหนดอัตราส่วน W/B คงที่ที่ 0.375 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน S/B เป็น 1.0, 1.2 และ 1.4

ชุดการศึกษาผลของอัตราส่วน W/B: กำหนดอัตราส่วน S/B คงที่ที่ 1.2 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน W/B เป็น 0.35, 0.375 และ 0.40

นอกจากนี้ยังมีการเตรียมตัวอย่างควบคุม (Control) ซึ่งเป็นมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1) และประเภทที่ 3 (OPC3) ที่มีอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ให้ค่าการไหลผ่าน (flow value) เท่ากับ 110±5%

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ MPC

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วน S/B	อัตราส่วน W/B	อัตราส่วน M/P	บอแรกซ์ (% ของ MgO)
ชุดการศึกษา S/B				
(2.25MP)1.0SB	1	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)1.2SB	1.2	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)1.4SB	1.4	0.375	2.25	7.5
ชุดการศึกษา W/B				
(2.25MP)0.35WB	1.2	0.35	2.25	7.5
(2.25MP)0.375WB	1.2	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)0.40WB	1.2	0.4	2.25	7.5

3. ขั้นตอนการผสมและการเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยการผสมส่วนผสมแห้ง ได้แก่ MgO, KH₂PO₄ และบอแรกซ์ เข้าด้วยกันเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำกลั่นและผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วต่ำจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นค่อยๆ เติมทรายลงไปพร้อมกับผสมอย่างต่อเนื่องจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี ขั้นตอนการผสมทั้งหมดตั้งแต่เริ่มเติมน้ำจนถึงการเทลงแบบหล่อต้องเสร็จสิ้นภายใน 5 นาที เพื่อให้ทันก่อนที่วัสดุจะเริ่มก่อตัว

ตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดถูกหล่อในแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม. และถอดแบบหลังจาก 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% จนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ (1, 3 และ 28 วัน) สำหรับการทดสอบการขีดสี ตัวอย่างถูกเตรียมโดยการเคลือบผิวหน้าด้วยมอร์ตาร์ MPC หนา 25 มม. และบ่มในสภาวะเดียวกันเป็นเวลา 3 วันก่อนทำการทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

ระยะเวลาก่อตัวปลาย (Final Setting Time) วัดตามมาตรฐาน ASTM C191 เนื่องจากปฏิกิริยาของ MPC เกิดขึ้นเร็วมาก การวัดระยะเวลาก่อตัวต้นจึงทำได้ยากและไม่แม่นยำ ดังนั้นจึงวัดเฉพาะระยะเวลาก่อตัวปลาย



การพัฒนาความร้อน (Heat Evolution) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด (Infrared Thermography) เพื่อประเมินอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน

ความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) ประเมินการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีตามมาตรฐาน ASTM C944 ที่อายุ 3 วัน

ผลการศึกษา

1. ระยะเวลาการก่อตัวปลาย

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวปลายของมอร์ตาร์ MPC เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ OPC สรุปใน ตารางที่ 4 โดยพบว่ามอร์ตาร์ MPC ทุกสูตรมีระยะเวลาการก่อตัวปลายสั้นกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างชัดเจน: OPC ประเภทที่ 1 และ OPC ประเภทที่ 3 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายประมาณ 300 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ MPC ที่มี W/B = 0.350 และ 0.375 มีระยะเวลาการก่อตัวปลายเพียง 18 นาที และเมื่อเพิ่ม W/B เป็น 0.400 ระยะเวลาการก่อตัวปลายจะยาวขึ้นเล็กน้อยเป็น 22 นาที สำหรับผลของ S/B พบว่า MPC ที่ S/B = 1.0 และ 1.2 ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายใกล้เคียงกันคือ 16 และ 15 นาทีตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเพิ่ม S/B เป็น 1.4 ระยะเวลาการก่อตัวปลายจะเพิ่มขึ้นเป็น 23 นาที แนวโน้มดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า MPC สามารถก่อตัวได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) อย่างมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแบบกรด-เบสระหว่าง MgO กับ KH_2PO_4 ซึ่งนำไปสู่การตกผลึกของ Struvite-K อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วัสดุแข็งตัวในเวลาอันสั้น [13] แม้ว่าการเพิ่มปริมาณน้ำ (W/B) หรือทราย (S/B) ทำให้สารตั้งต้นในระบบเจือจางลง ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวปลายยาวนานขึ้นเล็กน้อย แต่มอร์ตาร์ MPC ทุกสูตรยังคงก่อตัวได้ในเวลาประมาณ 15–23 นาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานงานซ่อมแซม

อุณหภูมิ ในเชิงปฏิบัติ การควบคุมอัตราส่วน W/B ให้อยู่ระหว่าง 0.350–0.375 และ S/B ไม่เกิน 1.2 จะช่วยรักษาสมดุลระหว่างความเร็วในการก่อตัวกับความสามารถในการทำงานของวัสดุได้ดี

ตารางที่ 4 ผลระยะเวลาการก่อตัวปลายและอุณหภูมิสูงสุดบนผิวตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัวปลาย (นาที)	อุณหภูมิสูงสุดบนผิวตัวอย่าง (°C)
OPC1	300	-
OPC3	180	-
(2.25MP)1.0SB	16	65.7
(2.25MP)1.2SB	15	57.6
(2.25MP)1.4SB	23	55.6
(2.50MP)0.35WB	18	57.9
(2.50MP)0.375WB	18	54.7
(2.50MP)0.40WB	22	53.6

2. อุณหภูมิสูงสุดบนผิว

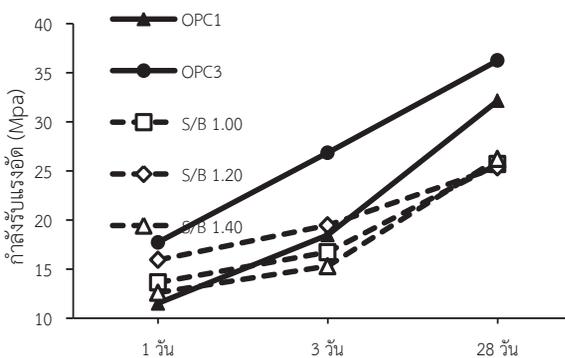
จากข้อมูลใน ตารางที่ 4 อุณหภูมิผิวสูงสุดที่วัดได้บนชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ MPC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/B และ W/B กล่าวคือ เมื่อ S/B เพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 1.2 และ 1.4 ค่าอุณหภูมิผิวสูงสุดลดลงจาก 65.7 °C เป็น 57.6 °C และ 55.6 °C ตามลำดับ ขณะที่การเพิ่ม W/B จาก 0.350 เป็น 0.375 และ 0.400 ทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดลดลงจาก 57.9 °C เป็น 54.7 °C และ 53.6 °C ตามลำดับ แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณทราย ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยทางเคมี ช่วยดูดซับพลังงานความร้อนของปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลง [14] และการเพิ่มปริมาณน้ำก็ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบลดลง จึงเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในอัตราที่ช้าลงและให้ความร้อนสะสมลดลงตามไปด้วย แม้ว่าการใช้อัตราส่วน S/B และ W/B สูงขึ้นจะเป็นผลดีในแง่การลดความรุนแรงของปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ดังที่จะได้กล่าวต่อไป อัตราส่วนที่สูงเกินไปย่อมส่งผลเสียต่อกำลังและความทนทานของมอร์ตาร์ ดังนั้นจึงต้อง

พิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการจำกัดความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีของวัสดุ

3. กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อายุต่างๆ แสดงในรูปที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ MPC สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว โดยมีกำลังอัดที่อายุ 1 วันสูงอย่างมีนัยสำคัญ

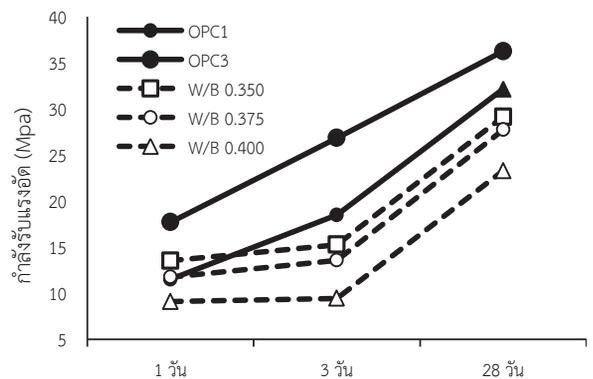
อิทธิพลของอัตราส่วน W/B รูปที่ 1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างอัตราส่วน W/B และกำลังอัด โดยกำลังอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้นในทุกช่วงอายุการทดสอบ ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.35 มีกำลังอัดสูงสุดที่ 29 MPa ในขณะที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.40 มีกำลังอัดเพียงประมาณ 20 MPa ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ อัตราส่วน W/B ที่ต่ำจะส่งผลให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินในระบบน้อยลง หลังจากที่มีน้ำถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ปริมาณช่องว่างหรือความพรุน (porosity) ที่เหลืออยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะน้อยกว่า ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น [15]



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อัตราส่วน S/B

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B จากรูปที่ 2 ผลของอัตราส่วน S/B ต่อกำลังอัดมีความน่าสนใจและแตกต่างจากแนวโน้มของ W/B โดยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน S/B เพิ่มขึ้นจาก 1.0

เป็น 1.4 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน S/B เท่ากับ 1.4 ให้กำลังอัดสูงสุดที่ 26 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่มี S/B เท่ากับ 1.0 (ประมาณ 22 MPa) การที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดเรียงตัวของอนุภาคในโครงสร้างคอมโพสิตของมอร์ตาร์ ที่อัตราส่วน S/B ต่ำ (1.0) [16] ปริมาณวัสดุประสานมีมากเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณทราย ทำให้โครงสร้างโดยรวมเป็นแบบที่อนุภาคทรายกระจายตัวอยู่ในเนื้อเพสต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/B เป็น 1.4 สัดส่วนระหว่างทรายและวัสดุประสานจะเข้าใกล้จุดที่เหมาะสมมากขึ้น อนุภาคทรายสามารถสร้างโครงสร้างหลัก (aggregate skeleton) ที่รับแรงได้ดีขึ้น และวัสดุประสานทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นและกำลังรับแรงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราส่วน S/B มากเกินไป อาจทำให้ปริมาณวัสดุประสานไม่เพียงพอที่จะเคลือบผิวและยึดเหนี่ยวอนุภาคทรายทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้กำลังอัดลดลงในที่สุด [17]



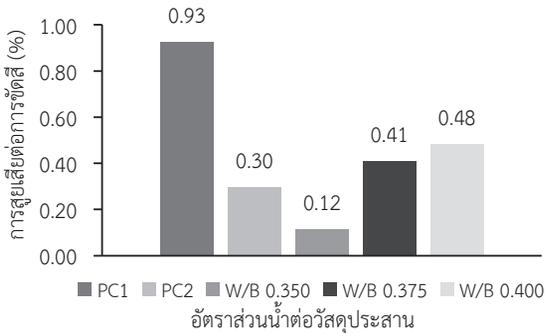
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อัตราส่วน W/B

4. การสูญเสียน้ำหนักจากการหดสี

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากการหดสีแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งสะท้อนถึงความทนทานของพื้นผิววัสดุ

อิทธิพลของอัตราส่วน W/B รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียน้ำหนักจากการหดสีเพิ่มขึ้นอย่างมี

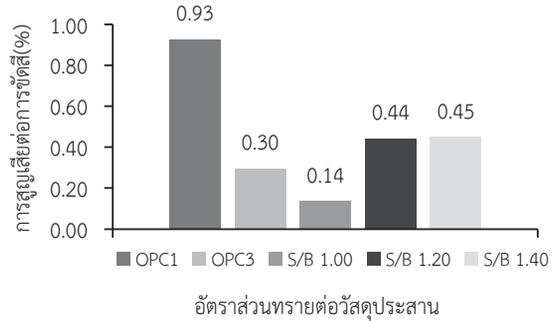
นัยสำคัญเมื่ออัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.35 มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุดเพียง 0.12% ในขณะที่ตัวอย่างที่มี W/B เท่ากับ 0.40 มีการสูญเสียน้ำหนักสูงถึง 0.48% ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับผลกำลังอัดและสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน คือ อัตราส่วน W/B ที่ต่ำทำให้เกิดโครงสร้างพื้นผิวที่หนาแน่น มีความพรุนน้อย และมีความแข็งแรงสูง จึงทนทานต่อการขัดสีได้ดีกว่า



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน W/B

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B รูปที่ 5 แสดงแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับผลของกำลังอัดอย่างสิ้นเชิง การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีมีค่าต่ำที่สุด (0.14%) ที่อัตราส่วน S/B ต่ำสุด คือ 1.0 และเพิ่มขึ้นเป็น 0.44% และ 0.45% เมื่ออัตราส่วน S/B เพิ่มขึ้นเป็น 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ การที่ความต้านทานการขัดสีลดลงเมื่อมีปริมาณทรายมากขึ้นนี้ เป็นการชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสมบัติเชิงกลโดยรวม (bulk property) และสมบัติของพื้นผิว (surface property) ความต้านทานการขัดสีขึ้นอยู่กับคุณภาพของชั้นผิววัสดุโดยตรง ที่อัตราส่วน S/B เท่ากับ 1.0 พื้นผิวของมอร์ตาร์จะอุดมไปด้วยวัสดุประสาน (paste-rich) ทำให้เกิดชั้นผิวของ K-struvite ที่แข็งและต่อเนื่อง ซึ่งมีความทนทานต่อการเสียดสีสูงในทางกลับกัน ที่อัตราส่วน S/B สูงขึ้น (1.4) พื้นผิวจะประกอบด้วยอนุภาคทรายและวัสดุประสานในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทรายกับเนื้อพาสต์ (interfacial transition zone) จะกลายเป็นจุดอ่อนที่การขัดสีสามารถเริ่มต้นได้ง่ายและอนุภาคทรายเองก็อาจถูกขัดหลุดออกจากพื้นผิว

ได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ความต้านทานการขัดสีโดยรวมลดลง [18]



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน S/B

5. การอภิปรายผลเพื่อการออกแบบสัดส่วนผสมสำหรับการใช้งานจริง

ผลการทดลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด สำหรับมอร์ตาร์ MPC นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นสำคัญ ไม่สามารถระบุสัดส่วนผสมเดียวที่ให้สมบัติที่ดีในทุกด้านได้

สำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูง เช่น การซ่อมแซมโครงสร้างรับน้ำหนัก การอุดรูโพรง หรือการยึดสลักเกลียว ควรเลือกใช้อัตราส่วน W/B ที่ต่ำที่สุดเท่าที่ความสามารถในการทำงาน (workability) จะเอื้ออำนวยในที่นี้คือ 0.35 และเลือกใช้อัตราส่วน S/B ที่สูงในที่นี้คือ 1.4 เพื่อให้ได้โครงสร้างที่รับแรงได้ดีที่สุด

สำหรับงานที่ต้องการความทนทานของพื้นผิวสูง เช่น การซ่อมแซมผิวจราจร พื้นโรงงานอุตสาหกรรม หรือบริเวณที่ต้องรับการเสียดสีบ่อยครั้ง ควรเลือกใช้อัตราส่วน W/B ที่ต่ำ เช่น 0.35 และเลือกใช้อัตราส่วน S/B ที่ต่ำ เช่น 1.0 เพื่อให้ได้พื้นผิวที่อุดมด้วยวัสดุประสานที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อการขัดสีสูง

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

อิทธิพลของอัตราส่วน W/B การลดอัตราส่วน W/B ลงเหลือ 0.35 ส่งผลดีต่อสมบัติของมอร์ตาร์ MPC อย่างชัดเจน ทั้งในด้านการเพิ่มกำลังรับแรงอัด และเพิ่มความต้านทานการขีดสี เนื่องจากทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นและมีความพรุนต่ำ

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B อิทธิพลของอัตราส่วน S/B มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน (trade-off) ระหว่างสมบัติเชิงกลโดยรวมและสมบัติของพื้นผิว

อัตราส่วน S/B ที่สูง (1.4) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานที่ต้องการ กำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมวลรวมเกิดเป็นโครงสร้างที่รับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อัตราส่วน S/B ที่ต่ำ (1.0) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานที่ต้องการ ความต้านทานการขีดสีสูงสุด เนื่องจากทำให้เกิดชั้นผิวที่อุดมด้วยวัสดุประสานซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรพิจารณาผลของการเติมเถ้าลอย (Fly Ash) ต่อสมบัติเชิงกลและความทนทานระยะยาวของปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานเทศบาลนครขอนแก่น และสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ ในการทดสอบวัสดุ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สนับสนุนทุนวิจัย ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] Ding, W. and Wu, J. (2023). Interregional economic impacts of an extreme storm flood scenario considering transportation interruption: A case study of Shanghai, China, *Sustainable Cities and Society*, vol. 88, pp. 104296.

[2] Trestanto, F., Hadiwardoyo, S., Sumabrata, J. and Lumingkewas, R.H. (2024). Road repair delay costs in improving the road rehabilitation strategy through a comprehensive road user cost model, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 14(3), pp. 254-270.

[3] Jia, X., Luo, J., Zhang, W., Qian, J., Li, J., Wang, P. and Tang, M. (2020). Preparation and application of self-curing magnesium phosphate cement concrete with high early strength in severe cold environments, *Materials*, vol. 13, pp. 5587.

[4] Xing, S. and Wu, C. (2018). Preparation of magnesium phosphate cement and application in concrete repair, *MATEC Web of Conferences*, vol. 142, pp. 02007.

[5] Gardner L.J., Walling, S.A., Corkhill, C.L., Bernal, S.A., Lejeune, V., Stennett M.C., Provis, J.L. and Hyatt, N.C. (2021). Temperature transformation of blended magnesium potassium phosphate cement binders, *Cement and Concrete Research*, vol. 141, pp. 106332.

[6] Rouzic, M.L., Rouzic, M.L., Chaussadent, T., Platret, G. and Stefan, L. (2017). Mechanisms of k-struvite formation in magnesium phosphate cements, *Cement and Concrete Research*, vol. 91, pp. 117-122.

[7] Wang, J., Gao, L., Zhang, Y., Wang, L. and Xu, C. (2024). Early properties of magnesium phosphate cement repairing material used in slab track, *Heliyon*, vol. 10, pp. e28913.

[8] Qiao, F., Chau, C.K. and Li, Z. (2009). Setting and strength development of magnesium phosphate cement paste,



Advances in Cement Research, vol. 21(4), pp. 175-180.

[9] Wekwejt, M., Wojtala, M., Mielewczyk-Gryń, A., Kozień, D., Ronowska, A., Kozłowska, J. and Gbureck, U. (2024). Injectable biocomposite cement: a dual-setting formula with magnesium potassium phosphate and K-carrageenan hydrogel for orthopedic advancements, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 383, pp. 137922.

[10] He, S.S., Wang L.M., Zhang, R. and Shi, Z. (2018). Influence of water-binder ratio on the microstructure of air-entrained concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 392, pp. 022001.

[11] Kandaswamy, S., Sundaram, H., Rajamanickam, S. and Rajendran, Y. (2025). Durability of high-performance concrete at high temperatures: effects of water-binder ratios and use of silica fume, *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 30(2), pp. e20240704.

[12] Hani, N., Nawawy, O., Ragab, K. and Kohail, M. (2018). The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 504-513.

[13] Yang, N., Shi, C., Yang, J. and Chang, Y. (2014). Research progresses in magnesium phosphate cement-based materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26(10), pp. 04014071.

[14] Liu, J., Yan, Y., Li, Z., Yang, F., Hai, R. and Yuan M. (2023). Investigation on the potassium magnesium phosphate cement modified by pretreated red mud: basic properties, water resistance and hydration

heat, *Construction and Building Materials*, vol. 368, pp. 130456.

[15] Liu, Y., Zhang, S., Fang, Z., Sun, M., Fan, Y. and Shah, S.P. (2025). Influence of water-to-binder ratio on autogenous shrinkage and electrical resistivity of cement mortar, *Buildings*, vol. 15(9), pp. 1444.

[16] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Detphan, S., Thumrongvut, J., Suksiripattanapong, C., Damrongwiriyanupap, N., Chindaprasirt, P. and Hatanaka, S. (2018). Shear bond strength of FA-PC geopolymer under different sand to binder ratios and sodium hydroxide concentrations. *International Journal of GEOMATE*, vol. 14(42), pp. 52-57.

[17] Vu, N.T. and Tang, V.L. (2024). Studying the effect of the ratio of water to binder and sand to aggregate on the hardness of concrete mixtures and compressive strength of roller-compacted concrete by experimental method. *Ministry of Science and Technology Vietnam*, online first, DOI:10.31276/vjst.2024.0003.

[18] Mikhalchenkov, A., Mikhalchenkova, M., Feskov, S. and Kononenko A. (2019). Effect of concentration and dispersion of filler fractions on adhesive strength and abrasion resistance of an epoxy and sand composite, *MATEC Web of Conferences*, vol. 298, pp. 00042.