

## อิทธิพลของสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษและไม่โครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของ ส่วนผสมมอร์ตาร์

### Influence of Superabsorbent Polymer and Microencapsulated Bacterial Spore on Physical and Mechanical Properties of Mortar Mixture

ณัฐชัย ทรัพย์วิไล<sup>1,\*</sup> ภัทรพล จินดาศิริพันธ์<sup>2</sup> พิชชา จงจวิวัฒน์สกุล<sup>3</sup> วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์<sup>4</sup> และ สุขเชษฐ ลิขิตเลอสรวง<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

<sup>4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

<sup>5</sup> ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

\*Corresponding author; E-mail address Natachai\_s@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ (SAP) ร่วมกับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกระบวนการการชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (MICP) โดยปริมาณไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียที่ใช้คือ 0.25% 0.5% และ 1.0% ของน้ำหนักของซีเมนต์ และมีการควบคุมปริมาณสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษไว้ที่ 4% ของน้ำหนักซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ที่ใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ 4% ควบคุมกับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียและสารอาหารสามารถรักษาค่าการไหลผ่านให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C109M สำหรับการศึกษาด้านกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ 4% ควบคุมกับปริมาณไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย 0.25% และสารอาหารมีกำลังอัดที่เทียบเท่ากับตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้เพียงสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษและสารอาหาร หรือตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้เพียงไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียและสารอาหาร ดังนั้นการใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษร่วมกับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียในมอร์ตาร์ จึงเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของมอร์ตาร์ได้อย่างเหมาะสมในขณะที่ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดประสิทธิภาพในด้านการซ่อมแซมตัวเองได้ในอนาคต

คำสำคัญ: สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ, ไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย, มอร์ตาร์, ความสามารถในการไหลผ่าน, กำลังรับแรงอัด

#### Abstract

This study investigates physical and mechanical properties of cement mortar incorporated with superabsorbent polymer (SAP) and microencapsulated bacterial spore for microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) as additives. The contents of microencapsulated bacterial spore were varied at 0.25%, 0.5%, and 1.0% by weight of cement. The SAP content was controlled at 4% by weight of cement. The flowabilities of mortars made with SAP and microencapsulated bacterial spore achieve a minimum allowable value in accordance with ASTM C109M. The specimen with 0.25% of the microencapsulated bacterial spore and 4% of SAP exhibits the compressive strength at 28 days equivalent to specimen solely mixed with either SAP or the microencapsulated bacterial spore. The results show that the

combined effects of SAP and microencapsulated bacterial spore can proof the effectiveness of maintaining physical and mechanical properties of mortar. Therefore, the utilization of the SAP and the microencapsulated bacterial spore in cement mortar potentially allows development of mix proportions for self-healing application without interference to mechanical properties.

Keywords: Superabsorbent polymer, microencapsulated bacterial spore, mortar, flowability, compressive strength

#### 1. คำนำ

คอนกรีตถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางการก่อสร้างที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานตั้งแต่อดีต และมีแนวโน้มของปริมาณการใช้งานที่สูงขึ้นในอนาคต คอนกรีตที่มีอายุการใช้งานและมีการเสื่อมสภาพอย่างมากจะส่งผลให้ถูกทำลายและรื้อถอนกลายเป็นขยะทางอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการผลิตคอนกรีตใหม่ขึ้นมาทดแทน Worrell และ คณะ [1] ได้กล่าวถึงกระบวนการผลิตซีเมนต์ที่ถูกใช้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตคอนกรีตจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นับเป็นสัดส่วน 5 % ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่เป็นมลพิษเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวซึ่งขัดแย้งกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ของสหประชาชาติที่ได้กล่าวถึงเรื่องการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงและผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate action) เพื่อเป็นการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและป้องกันการเสื่อมสภาพของคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตจึงต้องได้รับการตรวจสอบ ดูแล และปรับปรุงตลอดช่วงอายุการใช้งาน

ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพ คือ การเกิดรอยร้าวในคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้สารในสภาพแวดล้อมสามารถแทรกซึมเข้าสู่รอยร้าวคอนกรีตจนเกิดการทำปฏิกิริยาภายในเนื้อของคอนกรีตรวมไปถึงวัสดุเสริมสมรรถภาพคอนกรีตภายใน อาทิ เหล็กเสริมแรง ลวดอัดแรงและวัสดุประเภทเส้นใย เป็นต้น นำไปสู่การสูญเสียประสิทธิภาพในด้านการรับกำลังและความทนทานของคอนกรีต สำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีตมีหลากหลายวิธีโดยวิธีส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ทรัพยากรบุคคลในการตรวจสอบและซ่อมแซมโครงสร้างในช่วงระหว่างการใช้งาน ซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากรวมทั้งมีความเสี่ยงจากการตรวจสอบไม่พบรอยร้าวขนาดเล็กและการซ่อมแซมปรับปรุงที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน เพื่อเป็น

การลดภาระค่าใช้จ่ายคงสภาพของคอนกรีตให้อยู่ในระดับที่ออกแบบไว้ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตแบบอัตโนมัติ หรือที่เรียกว่า คอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง

คอนกรีตซ่อมแซมตัวเองเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีการใช้วัสดุสำหรับการกระตุ้นหรือก่อให้เกิดกระบวนการฟื้นฟูตัวเองของคอนกรีตเมื่อเกิดการแตกร้าว ซึ่งมีหลายวิธีการ ได้แก่ วิธีการผสมสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ (Superabsorbent polymer, SAP) วิธีการชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยแบคทีเรีย (Microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP) และวิธีการใช้สารคริสตัลไลต์ผสมเพิ่ม (Crystalline admixture) เช่น แมกนีเซียม และ ซิลิกา เป็นต้น [2]

จากการศึกษาเบื้องต้น [2-7] วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตอย่างโดดเด่นคือวิธีการผสมสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ (SAP) ที่มีการดูดซับและลดการแทรกซึมของสารที่มีสถานะของเหลวจากสภาพแวดล้อมไม่ให้เข้าสู่รอยร้าวของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในขั้นต้นได้เป็นอย่างดี [6] และอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว คือ วิธีการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตโดยวิธีการชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยแบคทีเรีย (MICP) [7] ซึ่งจะมีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นผลผลิตจากแบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* เพื่อเติมเต็มช่องว่างของรอยร้าว เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว อาจส่งผลให้น้ำและอากาศผ่านเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียซึ่งกระตุ้นความสามารถในการเติบโตและเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สารประกอบจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาของแบคทีเรียมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและสะสมทำให้รอยร้าวมีการปิดตัวลงได้ หากแต่วิธีการนี้ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในส่วนของการนำแบคทีเรียเข้ามาใช้งานซึ่งยังมีราคาที่สูงส่งผลต่อการนำมาพิจารณาต่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการซ่อมแซมตัวเองโดยใช้วิธีการที่ได้กล่าวในข้างต้น ได้แก่ วิธีการใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยแบคทีเรียเพื่อทราบความเหมาะสมในการนำส่วนผสมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในด้านของการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีตต่อไป

## 2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

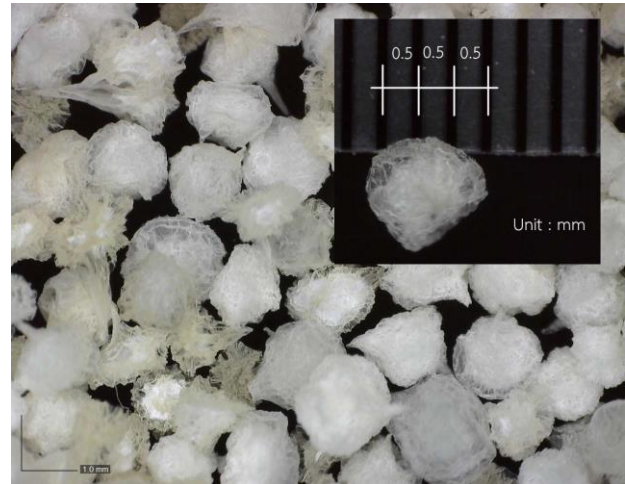
### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มวลรวมละเอียด น้ำ สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ ไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย และสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย มีรายละเอียดดังนี้

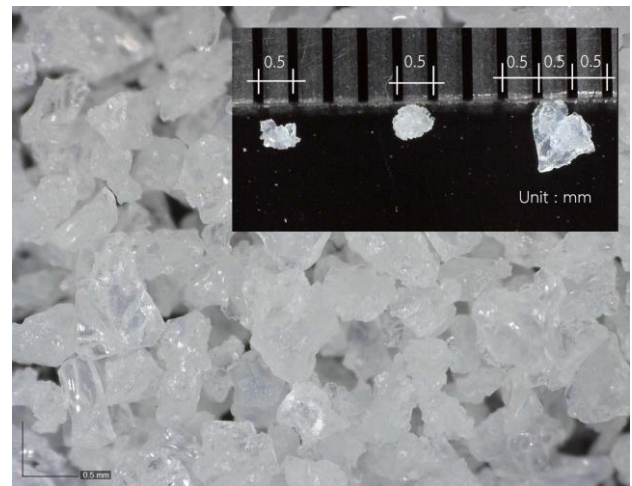
1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโครงสร้าง สูตรไฮบริด อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [8]
2. มวลรวมละเอียด เป็นทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
3. น้ำประปาสะอาด
4. สปอร์ของแบคทีเรีย *Bacillus Sphaericus* LMG 22257 ความเข้มข้น  $3.70 \times 10^9$  cfu/g ที่ห่อหุ้มด้วยสารละลายโซเดียมอัลจินเตความเข้มข้น 2% (w/v) และขึ้นรูปเป็นไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคไอโอโนโทรปิกเจลเลชัน (Ionotropic Gelation) ร่วมกับวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม สีขาวขุ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. ดังรูปที่ 1
5. สารอาหารสำหรับแบคทีเรีย เพื่อกระตุ้นกระบวนการ MICP ประกอบด้วย สารสกัดยีสต์ (Yeast extract) ยูเรีย (Urea) และแคลเซียมไน

เตรท ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 4\text{H}_2\text{O}$ ) โดยสารแต่ละชนิดจะเติมตามสัดส่วนร้อยละต่อน้ำหนักซีเมนต์ดังที่ระบุในหัวข้อ 2.2

6. สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ ประเภททรอคคริลิก รูปทรงไม่สม่ำเสมอ คละขนาด 0.45 – 0.85 มม. มีค่าการดูดซับน้ำ 209 กรัม/กรัม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์ของแบคทีเรีย *Bacillus Sphaericus* LMG 22257



รูปที่ 2 สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ

### 2.2 ส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และทรายต่อซีเมนต์ในอัตราส่วน 0.6 และ 2.75 ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากการทดสอบอัตราการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8] ให้มีอัตราการไหลผ่าน  $110 \pm 5$  % จากนั้นผสมไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ และสารอาหาร มีการแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 6 ตัวอย่างทดสอบ ดังตารางที่ 2 โดยสัดส่วนของสารอาหาร [4] จะประกอบไปด้วย สารสกัดจากยีสต์ : ยูเรีย : แคลเซียมไนเตรท ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 4\text{H}_2\text{O}$ ) ในสัดส่วน 0.85% : 4% : 8% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ และมีการปรับลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของตัวอย่างดังกล่าวในสัดส่วน 2.4 % ของน้ำหนักซีเมนต์ เนื่องจากในผลึกแคลเซียมไนเตรทจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 30 % ของมวล

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมต่างๆ ของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	ซีเมนต์ (g)	น้ำ (g)	มวลรวมละเอียด (g)	ไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย (g)	สารอาหาร (g)	สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ (g)
B0S0	100	60	275	-	-	-
B1S0	100	57.6	275	1	12.85	0
B0S4	100	57.6	275	-	12.85	4
B0.25S4	100	57.6	275	0.25	12.85	4
B0.5S4	100	57.6	275	0.5	12.85	4
B1S4	100	57.6	275	1	12.85	4

### 2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. เตรียมส่วนผสมสารอาหารด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ โดยใช้ความเร็วต่ำ เป็นระยะเวลา 1 นาที จนเป็นเนื้อผสมเดียวกันได้ส่วนผสมเหลว
2. นำทราย ซีเมนต์ และครึ่งหนึ่งของเม็ดแคปซูลแบคทีเรียกับครึ่งหนึ่งของสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ ผสมเข้าด้วยกันในเครื่องผสมมอร์ตาร์ โดยใช้ความเร็วต่ำ เป็นระยะเวลา 1 นาที ได้เป็นส่วนผสมแห้ง
3. ใส่ครึ่งหนึ่งของเม็ดแคปซูลแบคทีเรียกับสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษที่เหลือ ผสมเข้ากับส่วนผสมแห้งในเครื่องผสมมอร์ตาร์ โดยใช้ความเร็วต่ำ เป็นระยะเวลา 2 นาที จนเนื้อผสมกระจายตัวสม่ำเสมอ

4. นำส่วนผสมเหลวที่ได้เตรียมในข้อ 1 มาทยอยผสมเข้าร่วมกับส่วนผสมแห้งในข้อ 3 ระหว่างเดินเครื่องผสม ความเร็วต่ำ เป็นระยะเวลา 3 นาที จนส่วนผสมมีเนื้อสม่ำเสมอ เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการ

หลังจากผสมมอร์ตาร์เสร็จเรียบร้อยแล้วเริ่มทำการทดสอบการไหลผ่านของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM 1437 [9] โดยการนำตัวอย่างมอร์ตาร์สดแบ่งใส่แบบหล่อที่วางบนศูนย์กลางของโต๊ะทดสอบการไหลที่แห้งและสะอาด แบ่งใส่ความสูงชั้นละ 25 มม. และกระทุ้งด้วยแท่งเหล็ก 20 ครั้งต่อชั้นจนถึงชั้นสุดท้ายจากนั้นปาดให้ระดับมอร์ตาร์พอดีผิวแบบหล่อ หลังจากนั้น 1 นาที ทำการยกแบบหล่อขึ้นในแนวตั้ง จากนั้นทำการหมุนศูนย์กลางโต๊ะทดสอบเป็นจำนวน 25 ครั้ง ภายในเวลา 15 วินาที สุดท้ายทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์จำนวน 4 เส้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลผ่านของมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C642 [10] โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 100 มม. ความยาว 100 มม. และความสูง 100 มม. จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109M [11]

การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 50 มม. ความยาว 50 มม. และความสูง 50 มม. จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109M [11]

### 2.4 การทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ใช้สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ (SAP) ร่วมกับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกระบวนการชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (MICP) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 2.4.1 การไหลผ่าน (Mortar Flow)

ทดสอบความสามารถในการไหลผ่านของมอร์ตาร์สดตามมาตรฐาน ASTM 1437 [9] สมการคำนวณดังสมการที่ (1)

$$\text{Flowability} = \frac{D_f - D_i}{D_i} \times 100 \quad (1)$$

โดย  $\text{Flowability}$  = ความสามารถในการไหลผ่าน

$D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น (มม.)

$D_f$  = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางหลังทำการทดสอบ (มม.)

#### 2.4.2 ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Porosity and Water Absorption)

ทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C642 [10] โดยนำมอร์ตาร์ไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  °C เป็นระยะเวลา 24 ชม. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอบแห้ง ( $W_{OD}$ ) หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอ้อมตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ ( $W_{SD-s}$ ) สุดท้ายนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 ชม. หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเป็นระยะเวลา 14 ชม. นำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนักในอากาศและน้ำ เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอ้อมตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ ( $W_{SD-b}$ ) และน้ำหนักที่ซึมน้ำ ( $W_{Sub}$ ) ตามลำดับ สมการคำนวณดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{W_{SD-s} - W_{OD}}{W_{OD}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Porosity (\%)} = \frac{W_{SD-b} - W_{OD}}{W_{SD-b} - W_{Sub}} \times 100 \quad (3)$$

โดย  $W_{OD}$  = น้ำหนักอบแห้ง (กรัม)

$W_{SD-s}$  = น้ำหนักในสภาวะอ้อมตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ (กรัม)

$W_{SD-b}$  = น้ำหนักในสภาวะอ้อมตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ (กรัม)

$W_{Sub}$  = น้ำหนักขณะซึมน้ำ (กรัม)

#### 2.4.3 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ที่อายุบ่ม 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C109M [11] และคำนวณดังสมการที่ (4)

$$f_m = \frac{F}{A} \quad (4)$$

โดย  $f_m$  = หน่วยแรงอัดประลัยของมอร์ตาร์ (เมกะปาสกาล)

$F$  = น้ำหนักกระทำ (นิวตัน)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดรับน้ำหนักกระทำ (ตร.มม.)

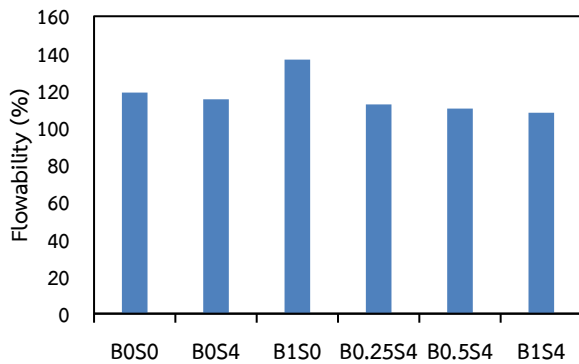
## 3. ผลการทดสอบ

### 3.1 การไหลผ่าน (Mortar Flow)

รูปที่ 3 แสดงค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ที่วัดค่าการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM 1437 [8] จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง B1S0 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการใส่เพียงไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียปริมาณ 1% ของน้ำหนักซีเมนต์และสารอาหารจะมีค่าการไหลผ่านสูงสุด 136.75% ซึ่ง

มากกว่าตัวอย่างควบคุม (B0S0) คิดเป็น 14.9% ในขณะที่ตัวอย่าง B0S4 ที่มีการใส่เพียงสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ 4% ของน้ำหนักซีเมนต์และสารอาหารจะมีค่าการไหลผ่าน 115.25% ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็น 3.3% และสำหรับตัวอย่าง B0.25S4, B0.5S4 และ B1S4 จะมีค่าการไหลผ่าน 112.5%, 110.25% และ 108% ตามลำดับซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็น 9.2%, 7.4% และ 5.4% ตามลำดับ

จากผลการทดสอบค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่สารอาหารสำหรับแบคทีเรียที่ประกอบไปด้วย ยูเรีย ซึ่งประพืดตัวคล้าย สารลดน้ำขณะผสม [12] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mwaluwinga และคณะ [13] ที่ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของยูเรียในคอนกรีต พบว่าส่วนผสมที่มียูเรียผสมร่วมกับน้ำจะทำให้ค่าการไหลผ่านของคอนกรีตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นสูงเช่นเดียวกัน สำหรับค่าการไหลผ่านที่ลดลงเมื่อมีการใส่สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษเป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซับ และการกักเก็บน้ำจำนวนมากของสารพอลิเมอร์ เป็นการรบกวนปริมาณน้ำอิสระในขั้นตอนการผสมของซีเมนต์และมวลรวมละเอียด รวมถึงการบวมตัวของสารพอลิเมอร์ทำให้เกิดการยึดเกาะอนุภาคส่งผลต่อค่าการไหลผ่านที่ลดลง [6,14] อย่างไรก็ตามเนื่องจากภายในสารอาหารประกอบไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นอนุภาคไอออนที่สามารถช่วยลดอัตราการบวมตัวของสารพอลิเมอร์ช่วงต้นนี้ได้ [6,15] สำหรับผลกระทบจากปริมาณไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์ของแบคทีเรียที่ใส่เข้าไปเป็นสารผสมเพิ่มที่มีส่วนในการดูดซับน้ำให้ผลกระทบเชิงลบต่อค่าการไหลผ่านเช่นเดียวกัน

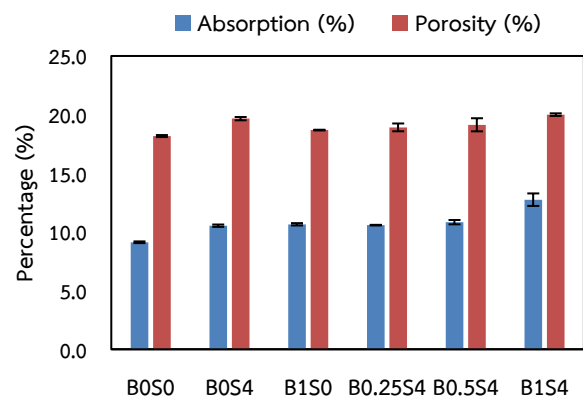


รูปที่ 3 ค่าการไหลผ่านของตัวอย่างมอร์ตาร์

### 3.2 ความพรุนและการดูดซับน้ำ (Porosity and Water Absorption)

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบความพรุนและการดูดซับน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ จากการทดสอบพบว่าตัวอย่าง B0S4 มีความพรุนและการดูดซับน้ำ 10.5% และ 19.7% ตามลำดับ และตัวอย่าง B1S0 มีความพรุนและการดูดซับน้ำ 10.7% และ 18.7% ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่มีการใส่สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษควบคู่กับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียและสารอาหาร พบว่าความพรุนและการดูดซับน้ำแปรผันตามปริมาณไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย โดยตัวอย่าง B0.25S4 มีความพรุนและการดูดซับน้ำสูงที่สุด 10.6% และ 18.9% ตามลำดับ ตัวอย่าง B0.5S4 มีความพรุนและการดูดซับน้ำ 10.8% และ 19.1% ตามลำดับ และตัวอย่าง B1S4 มีความพรุนและการดูดซับน้ำสูงที่สุด 12.8% และ 20% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับน้ำจากปริมาณไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลทดสอบจากตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้งหมดมีค่าการดูดซับน้ำและความพรุนที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งบ่งชี้ถึง

การใส่สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษที่มีพฤติกรรมในการดูดซับน้ำและบวมตัวเมื่อเกิดการปลดปล่อยน้ำที่กักเก็บไว้ในสารพอลิเมอร์และเกิดการหดตัวในสภาวะที่มีมอร์ตาร์แข็งตัวแล้วจะเกิดเป็นโพรงภายในเนื้อมอร์ตาร์ส่งผลต่อปริมาณความพรุนและการดูดซับน้ำที่สูงขึ้น [14] และไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียซึ่งมีค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่ามวลรวมละเอียด ส่งผลต่อค่าความพรุนและการดูดซับน้ำที่สูงขึ้นของตัวอย่างมอร์ตาร์ รวมถึงสารสกัดจากยีสต์ที่เป็นส่วนประกอบของสารอาหารมีส่วนทำให้เกิดฟองอากาศในขั้นตอนการผสมส่งผลต่อค่าความพรุนและการดูดซับน้ำเช่นเดียวกัน [7] สำหรับตัวอย่าง B0S4 และ B1S0 ที่มีค่าใกล้เคียงกัน จากตัวอย่าง B0S4 โพรงช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของสารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษอาจมีลักษณะที่ไม่เป็นโพรงที่เชื่อมต่อกันซึ่งส่งผลต่อสัดส่วนค่าการดูดซับน้ำที่ไม่สูงตามค่าความพรุนของตัวอย่าง



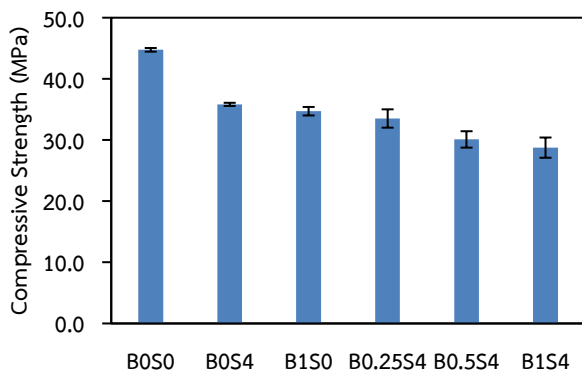
รูปที่ 4 ค่าการดูดซับน้ำและความพรุนของตัวอย่างมอร์ตาร์

### 3.3 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าตัวอย่าง B0S4 มีค่ากำลังรับแรงอัด 35.8 MPa ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็น 19.9% และตัวอย่าง B1S0 มีค่ากำลังรับแรงอัด 34.7 MPa ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็น 22.4% รวมถึงตัวอย่างที่มีการใส่สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษควบคู่กับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียและสารอาหาร B0.25S4, B0.5S4 และ B1S4 จะมีค่ากำลังรับแรงอัด 33.5 MPa, 30.1 MPa และ 28.8 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมคิดเป็น 25.1%, 32.7% และ 35.6% ตามลำดับ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า สารพอลิเมอร์ดูดซับชั้นพิเศษ ไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย และสารอาหารที่ผสมเพิ่มเข้าไปในมอร์ตาร์ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง โดยผลจากการหดตัวหลังจากปลดปล่อยน้ำของสารพอลิเมอร์เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2 จะส่งผลกระทบเชิงลบต่อกำลังรับแรงอัด และผลกระทบจากสารอาหารที่มีส่วนประกอบของยูเรียที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และสารสกัดยีสต์ที่มีส่วนในการทำให้เกิดฟองอากาศภายในมอร์ตาร์ รวมถึงไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียที่มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ต่ำกว่ามอร์ตาร์ [7] ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเช่นเดียวกัน





รูปที่ 5 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์

#### 4. สรุปผล

จากผลการทดสอบพบว่า การนำสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษมาประยุกต์ใช้ควบคู่กับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียสามารถช่วยปรับปรุงผลกระทบเชิงลบต่อค่าการไหลแผ่จากสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษได้ โดยผลจากส่วนประกอบของสารอาหารอันได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลในการลดการบวมตัวของสารพอลิเมอร์ สำหรับคุณสมบัติเชิงกล กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการใส่สารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษควบคู่กับไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียจะมีค่ากำลังอัดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรีย 0.25% และสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษ 4% (B0.25S4) อยู่ในระดับเทียบเท่ากับตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการใส่เพียงสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษร่วมกับสารอาหาร (B0S4) หรือตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใส่เพียงไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียร่วมกับสารอาหาร (B1S0) บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมสำหรับการนำผลกระทบเชิงบวกในด้านประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์จากสารพอลิเมอร์ดูดซับชื้นพิเศษมาประยุกต์ใช้ควบคู่กับประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์โดยวิธีชักนำการตกตะกอนของไมโครแคปซูลสปอร์แบคทีเรียโดยใช้ปริมาณไมโครแคปซูลที่ลดลง และไม่เป็นการสร้างผลกระทบเชิงลบในด้านการไหลแผ่ และกำลังรับแรงอัด นำไปสู่การลดลงของค่าใช้จ่ายและพัฒนาที่ยั่งยืนของโครงสร้างคอนกรีตในอนาคต

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Ozawa-Meida, L. (2001). Carbon Dioxide Emission from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and Environment*, 26, pp.303-329.

[2] Roig-Flores, M., Formagini, S., & Serna, P. (2021). Self-healing concrete-What Is it Good For?. *Materiales de Construcción*, 71, pp.e237.

[3] Wang, J.Y., Snoeck, D., Vlierberghe, S.V., Verstraete, W., and Belie, N.D. (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 68, pp.110-119

[4] Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., and Belie, N.D. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, pp.139-152.

[5] Sidiq, A., Gravina, R., Setunge, S., & Giustozzi, F. (2020). The effectiveness of Super Absorbent polymers and superplasticizer in self-healing of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 253, pp.119175.

[6] Chindasiriphan, P., Yokota, H., & Pimpakan, P. (2020). Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. *Construction and Building Materials*, 233, pp.116975.

[7] Phanupornprapong, V. (2019). Crack Closing Performance of Self-healing Mortar using Microbially induced Calcium Carbonate Precipitation Bacterial Spores. M.Eng. Thesis. Chulalongkorn University. Thailand.

[8] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก.2594-2556). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

[9] ASTM International. (2020). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (ASTM-C1437). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

[10] ASTM International. (2006). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete (ASTM C642-21). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials

[11] ASTM International. (2020). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (ASTM-C109M). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

[12] Demirboğa, R., Karagöl, F., Polat, R., & Kaygusuz, M. A. (2014). The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather conditions. *Construction and Building Materials*, 64, pp.114-120.

[13] Mwaluwinga, S., Ayano, T., & Sakata, K. (1997). Influence of urea in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, pp.733-745.

[14] Mignon, A., Snoeck, D., Dubruel, P., Van Vlierberghe, S., & De Belie, N. (2017). Crack Mitigation in Concrete: Superabsorbent Polymers as Key to Success? *Materials*, 10, pp.237.

[15] Lee, H. X. D., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2016). Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Research*, 79, pp.194-208.