ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง โดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียชนิดชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

Crack closing performance of self-healing mortar using microbial induced calcium carbonate precipitation bacterial spores

วนาลี ภานุพรประพงศ์ [1,*] ภีม เหนือคลอง [2] พิชชา จองวิวัฒสกุล [3] วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี [4,5,6] และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง [7]

หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
ศูนย์เครือข่ายการวิจัยเทคโนโลยี นาโนเทค-จุฬาลงกรณ์ ด้านสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
กลุ่มวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพสำหรับวิศวกรรมน้ำเสีย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

* - : . .

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรียชนิดชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรียด้วยโซเดียมอัลจิเนตเพื่อให้สปอร์สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมของการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ ปริมาณไมโครแคปซูลที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ ร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าไมโครแคปซูลส่งผลให้อัตราการซ่อมแซมรอยแตกเพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณไมโครแคปซูลร้อยละ 1.0 สามารถซ่อมแซมรอยแตกได้สมบูรณ์ภายใน 7 วัน นอกจากนี้งานวิจัยยังศึกษาผลของปริมาณไมโครแคปซูลต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณไมโครแคปซูลไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามเมื่อเติมสารอาหารสำหรับแบคทีเรียลงในมอร์ตาร์จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของมอร์ตาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง, กำลังรับแรงอัดประลัย, ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก, สปอร์ของแบคทีเรีย, เอ็มไอซีพี

Abstract

The aim of this study is to investigate the crack closing performance of self-healing mortar containing microcapsule of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) bacterial spores. The bacterial spores are encapsulated by sodium alginate to protect the bacterial spores under the severe conditions of mortar mixing. The amounts of microcapsule were varied at 0%, 0.5%, and 1.0% by cement weight. The results showed that the use of microcapsules increased the healing ratio of mortar. The crack of specimen containing 1.0% of microcapsules was completely healed within 7 days. The effect of microcapsule dosages on the compressive strength of mortar was also investigated at 28 days. It was found that the microcapsule content slightly influences on the compressive strength of mortar. On the other hand, the compressive strength of mortar remarkably decreased when the bacterial nutrients were added in the mortar.

Keywords: Self-healing mortar, Compressive Strength, Crack closing performance, Bacterial spores, MICP

1. บทนำ

ปัจจุบันมีโครงสร้างอาคารเก่าจำนวนมากที่ถูกใช้งานโดยไม่ได้รับการบูรณะซ่อมแซม เมื่อเริ่มมีการเกิดรอยแตกร้าวบริเวณผิวของโครงสร้างถ้าไม่ได้รับการซ่อมแซมอย่างถูกวิธี รอยร้าวจะพัฒนาขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งถึงบริเวณเหล็กเสริมซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างนั้นลดลง และอาจก่อให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างบริเวณนั้นได้

เมื่อไม่นานมานี้มีการนำเสนอเทคนิคใหม่ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวบริเวณพื้นผิวคอนกรีตด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรียกลุ่มชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือเอ็มไอซีพี (Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation ; MICP) ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่อาศัยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจากการย่อยสลายยูเรียของแบคทีเรียสายพันธุ์พิเศษมาใช้ประสานรอยแตกที่บริเวณผิวของคอนกรีต [1]

โดยการซ่อมแซมด้วยเทคนิคดังกล่าวนี้นอกจากจะมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนแล้ว ยังเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ทั้งนี้แบคทีเรียที่นำมาผสมกับมอร์ตาร์หากอยู่ในรูปของสปอร์ที่บรรจุอยู่ภายในไมโครแคปซูลจะเปรียบเสมือนกับสภาวะจำศีล ซึ่งสปอร์ของแบคทีเรียยังสามารถดำรงชีพอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ เมื่อเกิดรอยแตกผ่านบริเวณไมโครแคปซูล เปลือกของไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มสปอร์จะถูกฉีกออก สปอร์ของแบคทีเรียที่อยู่ภายในเมื่อสัมผัสอากาศและน้ำจะถูกกระตุ้นให้เกิดกระบวนการย่อยสลายยูเรีย (Ureolysis) ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมาซ่อมแซมรอยแตกภายในเนื้อมอร์ตาร์ จะเห็นได้ว่าการที่สปอร์ของแบคทีเรียจะถูกกระตุ้นให้ทำงานได้จะต้องอาศัยน้ำซึ่งเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการนี้ งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาแนวทางการกระตุ้นสปอร์ของแบคทีเรียด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การแช่น้ำ การปล่อยน้ำไหลผ่าน การควบคุมให้อยู่ในสภาวะความชื้นสูง เป็นต้น แต่ทุกแนวทางข้างต้นไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการใหม่ คือ วิธี wet-dry cycle [2,3,4,5] ซึ่งเป็นการนำตัวอย่างไปแช่น้ำช่วงระยะเวลาหนึ่งและตากแห้งเป็นวัฏจักรทุกวัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปลงจากวิธีการดังกล่าวโดยปรับเปลี่ยนจากการแช่น้ำ เป็นการฉีดพ่นน้ำด้วยสเปรย์วันละ 200 มล. เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงมากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณสปอร์แบคทีเรียต่อประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยจะศึกษาทั้งคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความพรุนและการดูดซึมน้ำ ตลอดจนประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตก เพื่อหาอัตราส่วนของสปอร์แบคทีเรียที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

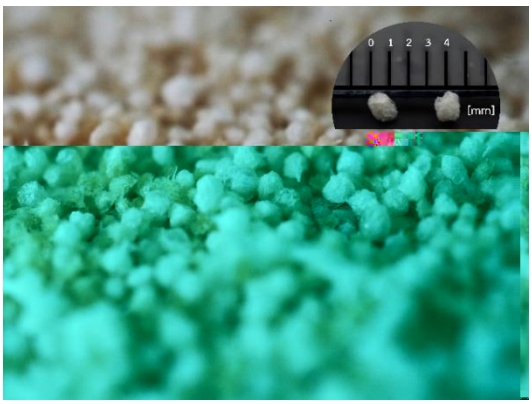
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มวลรวมละเอียด น้ำ ไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรีย และสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย มีรายละเอียดดังนี้

1. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) เป็นทรายแม่น้ำที่มีค่าคุณสมบัติพื้นฐาน ดังแสดงในตารางที่ 1
2. ไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรีย (Bacterial spore microcapsule) มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม สีขาวขุ่น ดังรูปที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.565 มม. ภายในบรรจุสปอร์ของแบคทีเรีย LMG 22257 (Belgian Coordinated Collection of Microorganisms, Ghent) ความเข้มข้น 2.31×10^5 cfu/g และห่อหุ้มด้วยสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate) เข้มข้นร้อยละ 2 (w/v) ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ร่วมกับวิธีแช่แข็งอบแห้ง (Freeze-drying) โดยมีค่าสมบัติพื้นฐาน ดังแสดงในตารางที่ 1
3. สารอาหารสำหรับแบคทีเรีย (Bacterial nutrients) เพื่อกระตุ้นให้เกิดกระบวนการย่อยสลายยูเรีย (Ureolysis) และการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (MICP) ประกอบด้วย สารสกัดยีสต์ (Yeast Extract) ยูเรีย (Urea) และแคลเซียมไนเตรท ($Ca(NO_3)_2$-$4H_2O$) โดยสารแต่ละชนิดจะเติมตามสัดส่วนร้อยละต่อน้ำหนักซีเมนต์ ที่ระบุในหัวข้อ 2.2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าคุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	ไมโครแคปซูล
ความถ่วงจำเพาะ	2.57	0.20
หน่วยน้ำหนักอบแห้ง (kg/m^3)	1664	166.60
การดูดซึมน้ำ (%)	0.7	-
โมดูลัสความละเอียด	2.42	-



รูปที่ 1 ไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรีย LMG 22257

ส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

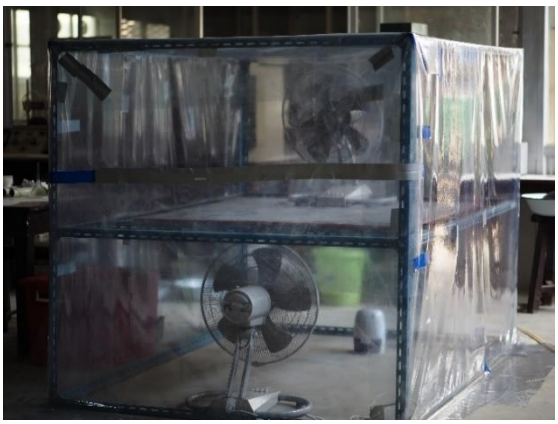
การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบ ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6 ซึ่งอัตราส่วนผสมดังกล่าวได้จากการทดสอบอัตราการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1437-15 [6] ให้มีอัตราการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 จากนั้นผสมสารอาหารที่เป็นส่วนประกอบหลักในปฏิกิริยาของการชักนำให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ ซึ่งประกอบด้วย สารสกัดยีสต์ ยูเรีย และแคลเซียมไนเตรทปริมาณร้อยละ 0.85, 4 และ 8 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ [3] โดยสำหรับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของสารอาหารจะต้องปรับลดปริมาณน้ำลงร้อยละ 2.44 ของปริมาณน้ำเดิม เนื่องจากแคลเซียมไนเตรทมีน้ำเป็นองค์ประกอบร้อยละ 30.5 ของน้ำหนักสารทั้งหมด โดยจำแนกตัวอย่างมอร์ตาร์ได้เป็น 4 ชนิด ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ (g)	ทราย (g)	น้ำ (g)	สารอาหาร	ไมโครแคปซูล (g)
C	100	275	60		
S-0			58.54		
S-0.5			58.54		0.5
S-1			58.54		1

การสร้างรอยแตกบนตัวอย่างมอร์ตาร์

ชนิดของรอยแตกที่เหมาะสมกับการซ่อมแซมทางชีวภาพด้วยวิธีเอ็มไอซีพี คือรอยแตกขนาดเล็ก ขนาดความกว้างรอยแตกประมาณ 1 มม. โดยวิธีการสร้างรอยแตกที่ใช้กันทั่วไปคือ การกระทำแรงไปที่ชิ้นตัวอย่าง แต่วิธีการดังกล่าวจะควบคุมขนาดรอยแตกได้ยาก เนื่องจากชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นวัสดุที่มีความเปราะสูง งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการสร้างรอยแตกด้วยการควบคุมสภาวะแวดล้อมเพื่อให้เกิดรอยแตกหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) ซึ่งเป็นรอยแตกขนาดเล็กบริเวณผิวของคอนกรีตในช่วงอายุต้นเนื่องจากการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วบริเวณผิวที่สัมผัสอากาศ โดยปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกชนิดนี้ คือ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ดังนั้นภายหลังการผสมมอร์ตาร์เสร็จ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่จะใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกจะต้องนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 [7] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมสำหรับเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์

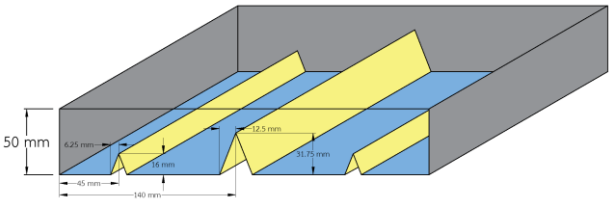
การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

การผสมตัวอย่างมอร์ตาร์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C305-14 [2] แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ใช้เวลาผสมทั้งหมด 4 นาที โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมผสมน้ำและสารอาหารให้เข้ากันในภาชนะด้วยแท่งแก้ว
2. เติมน้ำและสารอาหารพร้อมกับปูนซีเมนต์ในโม่ผสม เปิดเครื่องผสมที่ความเร็วต่ำ เป็นเวลา 30 วินาที
3. เติมทรายและไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรีย ตามลำดับ เปิดเครื่องผสมต่อเป็นเวลา 30 วินาที
4. เพิ่มความเร็วเครื่องผสมเป็นความเร็วกลาง และผสมต่อเป็นระยะเวลา 30 วินาที
5. หยุดเครื่องผสม 90 วินาที โดย 15 วินาทีแรกจะต้องปาดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ติดบริเวณผิวด้านบนของโม่ เพื่อนำลงมาผสมกับมอร์ตาร์ในโม่ด้านล่าง
6. เปิดเครื่องผสมต่อที่ความเร็วกลางเป็นระยะเวลาอีก 60 วินาที แล้วจึงหยุดเครื่องผสม

การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [8] โดยเทมอร์ตาร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วใส่แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.^{3} แบ่งเทเป็น 2 ชั้นและทำการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กชั้นละ 16 ครั้ง ภายใน 10 วินาที นำตัวอย่างไปบ่มในสภาวะอุณหภูมิ 23±2°ซ และความชื้นสัมพันธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งควบคุมความชื้นโดยการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก เป็นเวลา 24 ชม. หลังจากถอดแบบแล้วจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 23±2°ซ เป็นเวลา 28 วัน

การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการประสานรอยแตกดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1579-06 [7] โดยเทมอร์ตาร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วใส่แบบหล่อขนาด 280 x 177.5 x 50 มม.^{3} มีรอยบากบริเวณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3 นำตัวอย่างไปบ่มในสภาวะอุณหภูมิ 36±3°ซ ความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 30±10 และความเร็วลมไม่ต่ำกว่า 4.7 ม./วินาที เพื่อให้เกิดรอยแตกจากการหดตัวแบบพลาสติกบริเวณผิวหน้าหลังจากเกิดรอยแตกนำตัวอย่างไปบ่มในสภาวะอุณหภูมิ 28±2°ซ ความชื้นสัมพันธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80



รูปที่ 3 แบบหล่อมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการประสานรอยแตกดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1579-06 [7]

การทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณไมโครแคปซูลที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความพรุนและการดูดซึมน้ำ และศึกษาประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

. . กำลังรับแรงอัด ( )

ทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [8] สมการคำนวณดังสมการที่ 1

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

เมื่อ f_c' หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุ 28 วัน (MPa)
P หมายถึง แรงสูงสุดที่กระทำ (N)
A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดด้านที่แรงกระทำ (mm^2)

. . ความพรุนและการดูดซึมน้ำ ( )

ทดสอบหาความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [9] โดยนำมอร์ตาร์ไปอบที่อุณหภูมิ 105±5°ซ เป็นระยะเวลา 24 ชม. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอบแห้ง ( ) หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ ( ) และสุดท้ายนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 ชม.

หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเป็นระยะเวลา 14 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก ในอากาศและในน้ำ เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งหลังต้มน้ำ ( ) และน้ำหนักที่ชั่งในน้ำ ( ) ตามลำดับ สมการคำนวณดังสมการที่ 2 และ 3

ความพรุน (%) = $\frac{W_{SD-b} - W_{OD}}{W_{SD-b} - W_{sub}} \times 100$ (2)

การดูดซึมน้ำ (%) = $\frac{W_{SD-s} - W_{OD}}{W_{OD}} \times 100$ (3)

เมื่อ W_{OD} หมายถึง น้ำหนักอบแห้ง
W_{SD-s} หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่ในน้ำ
W_{SD-b} หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ
W_{sub} หมายถึง น้ำหนักขณะชั่งในน้ำ

. . ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตก ( )

ทดสอบความสามารถในการประสานรอยแตก โดยวัดขนาดความกว้างของรอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ตำแหน่งเดียวกัน เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนซ่อมแซม (Healing Ratio) นิยามดังสมการที่ 4 เก็บข้อมูลโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิตอลในวันที่ 1, 7 และ 14 นับจากวันที่เริ่มต้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง

Healing Ratio (%) = $\frac{d_0 - d_i}{d_0} \times 100$ (4)

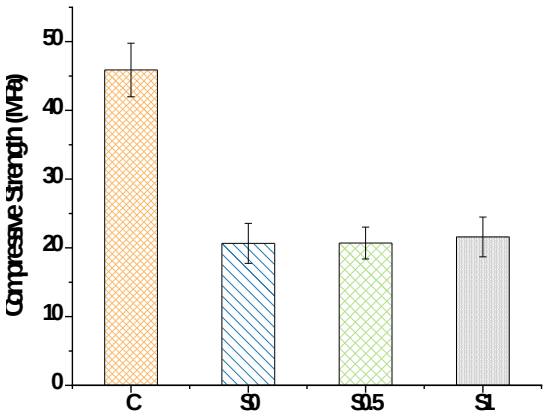
เมื่อ d_0 หมายถึง ขนาดความกว้างของรอยแตกของวันที่ 1
d_i หมายถึง ขนาดความกว้างของรอยแตกของวันที่ 7 หรือ 14

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

กำลังรับแรงอัด ( )

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย (S-0) เปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ผสมสารอาหาร (C) ดังรูปที่ 4 พบว่าการผสมสารอาหารในมอร์ตาร์จะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง คิดเป็นร้อยละ 54.97 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปกติ โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสารอาหารและผสมสารอาหารมีค่าเท่ากับ 45.9 MPa และ 20.7 MPa ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย (S-0.5 และ S-1) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย (S-0) ดังรูปที่ 4 พบว่าการผสมสปอร์ในมอร์ตาร์ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของสปอร์ร้อยละ 0, 0.5 และ 1 มีค่าเท่ากับ 20.7 MPa 20.7 MPa และ 21.6 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าสารอาหารสำหรับแบคทีเรียที่ผสมเพิ่มในมอร์ตาร์ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากสารอาหารนั้นมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ได้แก่ สารสกัดยีสต์และยูเรียที่ส่งผลในเชิงลบต่อการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ [10] โดยปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับน้ำจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์โดยการดึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปใช้แทนในปฏิกิริยาดังกล่าว [11] ในขณะที่การผสมสปอร์ในมอร์ตาร์จะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากตะกอนของแคลเซียมคาร์บอร์เนตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำ สปอร์ของแบคทีเรีย และสารอาหารนั้นไม่สามารถสร้างแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวรอยแตกมากเพียงพอที่จะพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ได้ ผลผลิตจากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงมีคุณสมบัติในการเติมเต็มช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการขึ้นรูปไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปร่วมกับวิธีแช่แข็งอบแห้งมีความเหมาะสมกับการนำมาผสมกับมอร์ตาร์เนื่องจากไมโครแคปซูลที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีดังกล่าวจะไม่ส่งผลในเชิงลบต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ในขณะที่ไมโครแคปซูลที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) จะส่งผลให้กำลังแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อผสมไมโครแคปซูลในปริมาณที่มากขึ้น [2] สำหรับการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งานจริง มีความจำเป็นจะต้องพิจารณาอัตราส่วนลดของกำลังที่ลดลง

ความพรุนและการดูดซึมน้ำ ( )

ผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรียที่ปริมาณแตกต่างกันเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่าการผสมสารอาหารและสปอร์ของแบคทีเรียส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ผสมและไม่ผสมสารอาหาร (C และ S-0) จะพบว่าตัวอย่างที่ผสมสารอาหาร (S-0) มีความพรุนและการดูดซึมมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมอาหาร (C) และตัวอย่างที่มีปริมาณสปอร์มากที่สุด (S-1) มีความพรุนและการดูดซึมน้ำมากที่สุด คือ ร้อยละ

21.20±0.15 และ ร้อยละ 10.51±0.09 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารอาหารเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนและการดูดซึมสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมสปอร์แบคทีเรีย

ชนิดตัวอย่าง	ความพรุน* (%)	การดูดซึมน้ำ* (%)
C	16.00±0.16	7.40±0.08
S-0	19.37±0.34	10.21±0.14
S-0.5	20.24±0.23	10.33±0.16
S-1	21.20±0.15	10.51±0.09

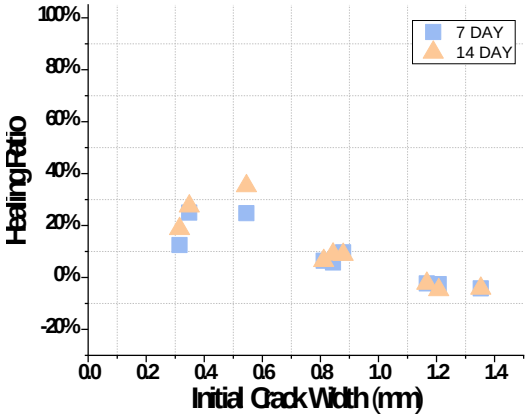
หมายเหตุ *ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำเป็นค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำการทดสอบกับตัวอย่าง 3 ซ้ำ

ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตก

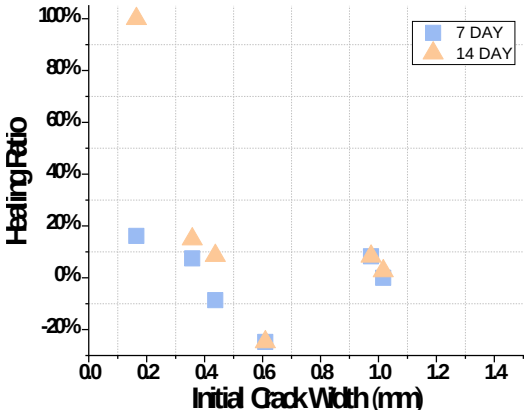
ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์แบคทีเรียในปริมาณที่แตกต่างกัน (S-0 S-0.5 และ S-1) แสดงในรูปที่ 5(ก), 5(ข) และ 5(ค) ตามลำดับ จากรูปพบว่า เมื่อสัดส่วนของสปอร์แบคทีเรียที่ผสมในมอร์ตาร์มากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

ตัวอย่างมอร์ตาร์ S-0 เป็นตัวอย่างที่ผสมเฉพาะสารอาหารไม่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย มีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกอยู่ในช่วงร้อยละ 5.8 ถึงร้อยละ 35 ที่รอยแตกขนาด 0.84 มม. และ 0.54 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการซ่อมแซมรอยแตกของวันที่ 7 และ 14 พบว่าไม่มีการซ่อมแซมตัวเองเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

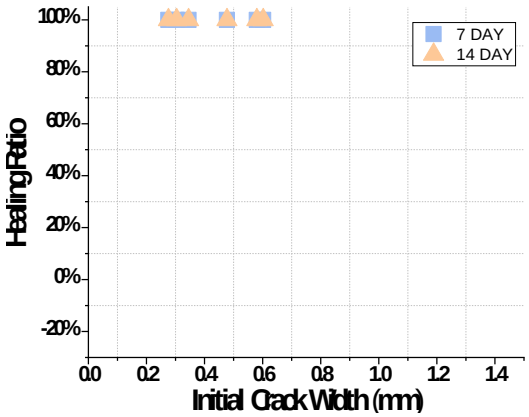
จากรูปที่ 5(ข) ขนาดรอยแตกของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนสปอร์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (S-0.5) มีแนวโน้มลดลง สำหรับรอยแตกที่มีขนาดไม่เกิน 0.44 มม. สามารถซ่อมแซมรอยแตกเมื่อระยะเวลาผ่านไป ในวันที่ 14 มีอัตราการซ่อมแซมร้อยละ 8.55 และสำหรับรอยแตกที่มีขนาดกว้างกว่า 0.44 มม. จะพบว่าไม่มีการซ่อมแซมตัวเองเพิ่มเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ยังพบว่ามีรอยแตกบางช่วงขยายกว้างขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการฉีดน้ำไปบริเวณรอยแตกที่ไม่มีแบคทีเรียเสมือนกับมีแรงไปกระทำบริเวณรอยแตกให้ขยายใหญ่ขึ้น และบริเวณนั้นไม่มีแบคทีเรียจึงไม่เกิดกระบวนการซ่อมแซม ดังนั้นสัดส่วนสปอร์ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักซีเมนต์อาจจะมีปริมาณน้อยเกินไป ส่งผลให้การกระจายตัวของสปอร์ในเนื้อมอร์ตาร์ไม่เพียงพอต่อการซ่อมแซมรอยแตกให้สมบูรณ์ได้ เมื่อพิจารณารอยแตกที่มีขนาดเล็กกว่า 0.6 mm พบว่ามีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย อาจมีสาเหตุมาจากบริเวณรอยแตกของตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์มีผงซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์จึงส่งผลให้เกิดการซ่อมแซมรอยแตกด้วยปฏิกิริยาของมอร์ตาร์เอง (Autogenous Healing) ซึ่งปฏิริยาดังกล่าวนี้จะสามารถเกิดขึ้นกับรอยแตกในช่วงอายุต้น (Early Age) และสามารถซ่อมแซมรอยแตกได้สมบูรณ์ที่ขนาดกว้างที่สุด 0.1 มม. [12]



รูปที่ 5(ก) ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของตัวอย่าง S-0



รูปที่ 5(ข) ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของตัวอย่าง S-0.5



รูปที่ 5(ค) ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของตัวอย่าง S-1

ขนาดรอยแตกของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนสปอร์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (S-1) มีแนวโน้มลดลงกว่าตัวอย่างอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 6(ก) และ 6(ข) ที่แสดงการเปรียบเทียบปฏิกิริยาการประสานรอยแตกร้าวที่พื้นผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ S-1 ในวันที่ 1 และ 7 ตามลำดับ จะพบว่าบริเวณรอยแตกที่เคยมองเห็นได้อย่างชัดเจนในวันที่ 1 จะถูกเติมเต็มด้วยตะกอนสีขาวจนปกคลุมและประสานรอยแตกร้าว

จนเป็นเนื้อเดียวได้ในวันที่ 7 ผลการทดสอบดังกล่าวช่วยยืนยันว่าตัวอย่าง S-1 มีประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกดีที่สุด โดยสามารถซ่อมแซมรอยแตกร้าวที่มีขนาดความกว้างมากที่สุดถึง 0.60 มม. ได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 7 วันหลังจากเริ่มกระบวนการซ่อมแซม

(ก) วันที่ 1 (ข) วันที่ 7

รูปที่ 6 การประสานรอยแตกร้าวจากปฏิกิริยาชีวภาพที่ผิวของตัวอย่าง S-1

4. บทสรุป

ไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรีย LMG 22257 ที่ห่อหุ้มด้วยสารละลายโซเดียมอัลจิเนตและขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปร่วมกับวิธีแช่แข็งอบแห้ง มีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้กับมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง โดยสามารถช่วยคงสภาพความมีชีวิตเมื่อสปอร์อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมของการผสมและขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ อีกทั้งยังสามารถฉีกขาดเมื่อมอร์ตาร์เกิดรอยแตกร้าวผ่านบริเวณที่มีไมโครแคปซูล เพื่อให้สปอร์ของแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับน้ำและอากาศ ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายยูเรียและการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิคการกระตุ้นสปอร์ด้วยการฉีดพ่นน้ำและตากแห้งเป็นวัฏจักร สามารถช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาชีวภาพของสปอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเองพบว่า สารอาหารสำหรับแบคทีเรียเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มตัวอย่างที่มีส่วนผสมของสารอาหาร พบว่าสปอร์ของแบคทีเรียไม่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด ความพรุน และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดสอบประสิทธิภาพการประสานรอยแตกพบว่าการผสมสปอร์ของแบคทีเรียในมอร์ตาร์ส่งผลให้เกิดการซ่อมแซมรอยแตกในระยะยาว เมื่อผสมสปอร์ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการซ่อมแซมรอยแตกสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใส่สปอร์ในปริมาณที่มากเพียงพอจะส่งผลให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกได้สมบูรณ์อย่างรวดเร็วอีกด้วย

in. or [50-mm] cube specimens (ASTM C109-02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

[9] ASTM International. (2006). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete (ASTM C642-06). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

[10] Hana, S., Petr, B., Josef, F., Karel, S., Roman, C. and Tomas, T. (2019). Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. , 11. unpaged.

[11] Shaaban, M., Toshiki, A. and Kenji, S. (1997). Influence of urea in concrete. , 27(5), pp.733-745.

[12] Maes, M., Snoeck, D., and Belie, N.D. (2016). Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. 115, pp.114-124.