การสำรวจประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ถูกทำให้เสียหายล่วงหน้าด้วยเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

Investigation of healing performance on pre-damaged mortar specimens using MICP bacterial vegetative cell

นัชชา นพคุณ[1,*] พรเพ็ญ ลิมปนิลชาติ[2] ภัทรพล จินดาศิริพันธ์[3] พิชชา จองวิวัฒสกุล[4] วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี[5] และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง[6]

[1,3,4] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม
[5] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ
[6] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address nutcha.npk@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์โดยใช้วิธีการหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. สร้างรอยร้าวด้วยแรงกด ให้มีขนาดความกว้างสองขนาดคือ ขนาดไม่เกิน 175 µm และขนาด 175 - 350 µm จากนั้นซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการหยดแบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สฟีรีคัส และสารอาหาร โดยปริมาณการหยดเชื้อแบคทีเรียต่อสารอาหารต่อวันเท่ากับ 20:500 µL และ 40:1000 µL ในระหว่างการซ่อมแซมชิ้นตัวอย่างจะอยู่ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง 7 รอบ หลังจากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการวัดความกว้างของรอยร้าวผ่านกล้องจุลทรรศน์ จากผลการทดสอบรอยร้าวขนาดเล็กกว่า 175 µm ที่หยดเชื้อแบคทีเรียต่อสารอาหารต่อวันเท่ากับ 20:500 µL และ 40:1000 µL มีค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลง 90.1% และ 97.0% ตามลำดับ สำหรับรอยร้าวขนาดความกว้างไม่เกิน 350 µm มีค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลง 54.0% นอกจากนี้เมื่อติดตามค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของทุกกลุ่มตัวอย่างพบว่ารอยร้าวได้รับการซ่อมแซมอย่างต่อเนื่องจนครบ 7 รอบ และมีแนวโน้มว่าอาจจะพัฒนาต่อไปได้ หากใช้เวลาในการซ่อมแซมที่มากขึ้น

คำสำคัญ: เซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย, เอ็มไอซีพี, รอยร้าว, การซ่อมแซมรอยร้าว

Abstract

This study aims to investigate the healing performance of cracked mortars using bacterial vegetative cell. Cylindrical samples of mortar with diameter of 100 mm and depth of 50 mm were prepared. Cracks were induced by a compression machine with crack widths of ≤175 µm and 175-350 µm. Crack healing procedures were conducted by dropping the *Bacillus sphaericus* bacterial vegetative cell and nutrient to the crack. Bacteria-to-nutrient ratios of 20:500 µL and 40:1000 µL were applied each day. Cracked specimens were repaired for 7 cycles under the wet-dry cycle condition. Then, the healing ratio was determined by measuring crack width using microscope. The results show that healing ratios of crack width of ≤175 µm healed by bacteria-to-nutrient ratios of 20:500 µL and 40:1000 µL were 90.1% and 97.0%, respectively. On the other hand, healing ratio of crack width of 175-350 µm was 54.0%. Moreover, the results of healing ratios in every repairing cycle indicate that the cracks in all specimens were continuously repaired until 7 cycles and exhibited a tendency of further remediation.

Keywords: Vegetative cells, MICP, Mortar, Crack Healing

1. บทนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน คอนกรีตถือเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้รับความนิยมแพร่หลายสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีแหล่งผลิตที่ครอบคลุมเข้าถึงได้ง่าย และราคาถูก เหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไป แต่ด้วยข้อเสียของคอนกรีตนั้นคือเป็นวัสดุเปราะ และมักเกิดรอยร้าวที่ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้างได้ โดยสาเหตุของความเสียหายเหล่านั้นเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น การออกแบบส่วนผสม วิธีการก่อสร้าง การบ่มที่ไม่ดี หรือสภาพแวดล้อมที่ตั้งอยู่ของโครงอาคารนั้น เป็นต้น จากสาเหตุเหล่านี้ เมื่อบริเวณที่เกิดรอยร้าวนั้นได้สัมผัสกับน้ำ หรืออากาศเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้รอยร้าวสามารถพัฒนาขนาดความกว้างให้ใหญ่ขึ้น จนน้ำหรืออากาศสามารถเข้าถึงบริเวณเหล็กเสริมและทำให้เกิดสนิม เมื่อไม่ได้รับการซ่อมแซมปัญหาเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อความคงทนของโครงสร้าง และอายุการใช้งานที่สั้นลง

ในปัจจุบันพบกระบวนการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตมีความสามารถในการฟื้นฟูคุณสมบัติเชิงกลหลังการแตกร้าวของวัสดุซีเมนต์ที่ระดับจุลภาคได้ [1] งานวิจัยในอดีตมีการศึกษาการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตที่แตกต่างกันออกไป เช่น การซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ (Autogenous process) คือคอนกรีตที่สามารถซ่อมแซมด้วยตัวเองได้เมื่อเกิดรอยร้าว เนื่องจากส่วนผสมภายในคอนกรีตทำปฏิกิริยาต่อกัน [2] การซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตแบบอัตโนมัติ (Autonomous process) คือ การนำสารเคมีหรือสารทางชีวภาพมาผสมรวมกับส่วนผสมของคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าว สารเหล่านี้ที่ได้สัมผัสกับน้ำหรืออากาศ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและสร้างสารชนิดอื่นขึ้นมาเพื่ออุดช่องว่างรอยร้าว และสุดท้าย คือ การซ่อมแซมจากภายนอก (Manual process) ซึ่งจะเป็นการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการหยดสารเหล่านี้

ลงไปโดยตรงบริเวณที่เกิดรอยร้าว เพื่อกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมรอยร้าวจากกระบวนการซ่อมแซมด้วยตัวเองดังกล่าว ทำให้เกิดแนวคิดที่นำสารที่สามารถซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีต มาใช้เพื่อยืดอายุการใช้งาน เพิ่มความคงทน และยังช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม หรือการก่อสร้างใหม่ที่ต้องใช้งบประมาณสูง

การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรียกลุ่มชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือกลุ่มเอ็มไอซีพี (Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation, MICP) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความสามารถช่วยฟื้นฟูคุณสมบัติเชิงกลหลังการแตกร้าวขนาดเล็ก โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายยูเรีย ที่มีเอนไซม์ยูรีเอสจากแบคทีเรียจำพวก UPB (Urease-producing bacteria) กระตุ้นและทำให้เกิดผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตมาเติมเต็มรอยร้าว โดยข้อดีของวิธีการนี้คือขั้นตอนการเพาะเลี้ยงที่ไม่ซับซ้อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [3] และยังสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน ซึ่งเป็นกรอบทิศทางการพัฒนาโลกที่สหประชาชาติได้กำหนดไว้อีกด้วย

จากการศึกษาที่ผ่านมาที่นำแบคทีเรียจำพวก UPB สายพันธุ์บาซิลลัส สฟีรีคัส มาศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีตที่ผสมเชื้อแบคทีเรียในรูปแบบไมโครแคปซูล ด้วยการใช้วิธีการซ่อมแซมรูปแบบต่างๆ จากการทดลองทำให้ทราบได้ว่า วิธีการที่ทำให้การซ่อมแซมได้ประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นคือการซ่อมแซมรอยร้าวภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycle) [3-5] ต่อมามีงานวิจัยที่ทดลองการซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์จากภายนอกด้วยการใช้เชื้อแบคทีเรียรูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย โดยให้ความสูงครึ่งหนึ่งของตัวอย่างแช่น้ำต่อเนื่องและทำการซ่อมแซมเป็นเวลา 20 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวลดลงเฉลี่ยได้ถึง 85.4% [6]

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ด้วยวิธีการหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สฟีรีคัส พร้อมสารอาหาร ภายใต้สภาวะในการซ่อมแซมคือสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแบคทีเรียและสารอาหารที่ใช้ในการซ่อมแซม 2 ระดับ เพื่อซ่อมแซมรอยร้าวในมอร์ต้าร์ที่มีขนาด 2 ช่วง คือ ขนาดเล็กกว่า 175 µm และรอยร้าวขนาด 175-350 µm

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป มวลรวมละเอียด น้ำ และเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย และสารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรีย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก.2594-2556 [12]
2. มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
3. น้ำประปา
4. เซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย (Vegetative cell) สายพันธุ์บาซิลลัส สฟีรีคัส หรือ *Bacillus sphaericus LMG 22557* (Belgian coordinated collection of microorganisms, Ghent) ความเข้มข้น 10^6 เซลล์/มล. ดังแสดงในรูปที่ 1
5. สารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ สารสกัดจากยีสต์, ยูเรีย และแคลเซียมไนเตรท $Ca(NO_3)_2$-$4H_2O$ ด้วยอัตราส่วน 0.85 : 4 : 8 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ



รูปที่ 1 เซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สฟีรีคัส

2.2 การเตรียมเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรีย (Vegetative cell)

ขั้นตอนการเตรียมเชื้อแบคทีเรียรูปแบบหยด เริ่มจากการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียสายพันธุ์ บาซิลลัส สฟีรีคัส หรือ *Bacillus sphaericus LMG 22557* ในอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อซึ่งประกอบด้วย Nutrient Broth, $NaHCO_3$ และ Urea ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °ซ เป็นเวลา 15 นาทีก่อนนำมาใช้งาน โดยเชื้อแบคทีเรียถูกควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างที่พีเอชเท่ากับ 8.0 และบ่มที่อุณหภูมิ 37 °ซ พร้อมเขย่าด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 24-48 ชม. ถัดมาในขั้นตอนการคัดแยกเซลล์ เริ่มจากทำการปั่นเหวี่ยง 8,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 °ซ เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลานำเซลล์แบคทีเรียที่แยกได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ และนำไปเก็บรักษาไว้ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 4 °ซ

2.3 การเตรียมผสมมอร์ตาร์

วิธีการผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C305-14 [7] โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 0.6 และมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1:2.75 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสม

ชื่อตัวอย่าง	ความกว้างรอยร้าว (µm)	ซีเมนต์ (g)	ทราย (g)	น้ำ (g)	รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิต	
					เซลล์ที่มีชีวิต (µL)	สารอาหาร (µL)
V1-FC	≤ 175	100	275	60	20	500
V2-FC	≤ 175	100	275	60	40	1000
V2-LC	≤ 350	100	275	60	40	1000

หมายเหตุ :
V1 หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียในการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้ปริมาณเชื้อแบคทีเรียต่อสารอาหาร เท่ากับ 20 : 500 µL
V2 หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียในการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้ปริมาณเชื้อแบคทีเรียต่อสารอาหาร เท่ากับ 40 : 1,000 µL

ขั้นตอนการผสมเริ่มจากผสมน้ำสะอาดและปูนซีเมนต์ในเครื่องผสมมอร์ตาร์เป็นเวลา 30 วินาที ด้วยความเร็วต่ำ ต่อมานำทรายแม่น้ำเทลงเครื่องผสม ภายในระยะเวลา 30 วินาที ขณะที่เครื่องยังดำเนินอยู่ด้วยความเร็วต่ำ จบการผสมครั้งที่ 1 ปิดเครื่องพักไว้เป็นเวลา 90 วินาที โดยในขณะที่พักเครื่องจะทำการปาดส่วนผสมที่ติดบริเวณด้านข้างหม้อผสม ให้ลงไปภายในหม้อด้านล่าง จากนั้นทำการเปิดเครื่องเริ่มการผสมครั้งที่ 2

โดยใช้ความเร็วปานกลาง เป็นเวลา 60 วินาที เมื่อเสร็จสิ้นวิธีการจนกระทั่งได้มอร์ตาร์สด

หลังจากนั้นนำมาทดสอบอัตราการไหลแผ่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1437-20 [8] ด้วยการนำมอร์ตาร์เทลงในแบบหล่อสำหรับทดสอบอัตราการไหลแผ่ที่มีความสูง 50 มม. ที่วางอยู่บนโต๊ะทดสอบ โดยเทมอร์ตาร์ครั้งแรกที่ระดับความสูงประมาณ 25 มม. จากนั้นใช้ไม้กระทุ้ง 20 ครั้ง และทำซ้ำเช่นเดิมในการเทครั้งที่สอง ปาดผิวหน้าในเรียบ พร้อมสำหรับการทดสอบ เมื่อยกแบบหล่อออก มอร์ตาร์ที่อยู่กึ่งกลางโต๊ะทดสอบจะถูกเคาะจำนวน 25 ครั้ง ภายในเวลา 15 วินาที เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้นั้นถูกวัดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยให้มีอัตราการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 สมการที่ใช้คำนวณดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\text{Flow} = \frac{\text{Dia.}_{\text{avg.}} - \text{Dia.}_{\text{mold}}}{\text{Dia.}_{\text{mold}}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ Flow = อัตราการไหลแผ่ (%)
Dia._{avg} = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางหลังทดสอบ (มม.)
$\text{Dia.}_{\text{mold}}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของฐานแบบหล่อ (มม.)

จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยขนาดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. โดยแบ่งการเทเป็น 2 ครั้ง ในครั้งแรกเทประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงและใช้ไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง เป็นเวลา 10 วินาที และทำซ้ำเช่นเดิมในครั้งที่ 2 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปบ่มในสภาวะความชื้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 และควบคุมอุณหภูมิ 23±2 °ซ ด้วยการห่อฟิล์มพลาสติก เป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน

2.4 ขนาดของรอยร้าวและการสร้างรอยร้าวบนมอร์ตาร์

2.4.1 ขนาดของรอยร้าว

ความกว้างของรอยร้าวแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ความกว้างรอยร้าว น้อยกว่า 175 ไมโครเมตร (≤175 μm) (FC)
- ความกว้างรอยร้าว ระหว่าง 175-350 ไมโครเมตร (175-350 μm) (LC)

โดยขนาดความกว้างของรอยร้าวบนมอร์ตาร์อ้างอิงตามมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งานของประเทศไทย มยผ. 1332-55 [9] สำหรับงานทั่วไปที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง อันเนื่องมาจากเป็นค่าความกว้างรอยร้าวมากสุดที่ยอมรับได้ หากมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (c) มากกว่าหรือเท่ากับ 100 มม. (≥100 มม.) ความกว้างของรอยร้าวที่ยอมรับได้ของงานทั่วไป คือ 0.0035 x c มม. ทำให้การกำหนดขนาดรอยร้าวมีความกว้างมากสุดที่น้อยกว่า 350 ไมโครเมตร ส่วนความกว้างรอยร้าวที่น้อยกว่า 175 ไมโครเมตร (≤175 μm) ถูกนำมาทดสอบโดยพิจารณาการลดสัดส่วนปริมาณแบคทีเรียที่ใช้ซ่อมแซมรอยร้าวสองระดับ คือ ปริมาณแบคทีเรียต่อสารอาหารต่อวัน เท่ากับ 20:500 μL และ 40:1000 μL

2.4.2 การสร้างรอยร้าวบนมอร์ตาร์

หลังจากการบ่มชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นเวลา 28 วัน ขั้นตอนถัดไปคือการสร้างรอยร้าวบนก้อนตัวอย่าง โดยนำชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. ที่สวมในท่อ PE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. วางในเครื่องกดทดสอบ (Universal Test Machine, UTM) ด้วยอัตราเร็ว 0.5 มม./นาที ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อทำการสร้างรอยร้าว จากนั้นทำการกำหนดจุดอ้างอิงบนชิ้นตัวอย่างด้านละ 3 จุด ทั้งสองด้าน รวมทั้งหมด 6 จุด [10] เพื่อทำการวัดรอยร้าวหลังจากทำการกดก้อนตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 2 การสร้างรอยร้าวในชิ้นตัวอย่าง

รูปที่ 3 การวัดขนาดความกว้างรอยร้าวด้วยซอร์ฟแวร์จากกล้องจุลทรรศน์

2.5 การซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์

2.5.

$$\Delta W = \left| \frac{W_{fi.} - W_{ini.}}{W_{ini.}} \right| \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ ΔW = ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลง (%)
$W_{ini.}$ = ความกว้างของรอยร้าวเริ่มต้น (μm)
$W_{fi.}$ = ความกว้างของรอยร้าวสุดท้าย (μm)

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 การไหลแผ่ (Flow)

การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : น้ำ : ทราย เท่ากับ 1 : 0.6 : 2.75 เมื่อทำการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-14 [7] และนำไปทดสอบการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1437-20 [8] ผลลัพธ์ที่ได้คิดเป็นร้อยละ 114 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110±5 จากนั้นจึงนำมอร์ตาร์สดไปขึ้นรูปในลำดับถัดไป

3.2 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าว (Crack healing)

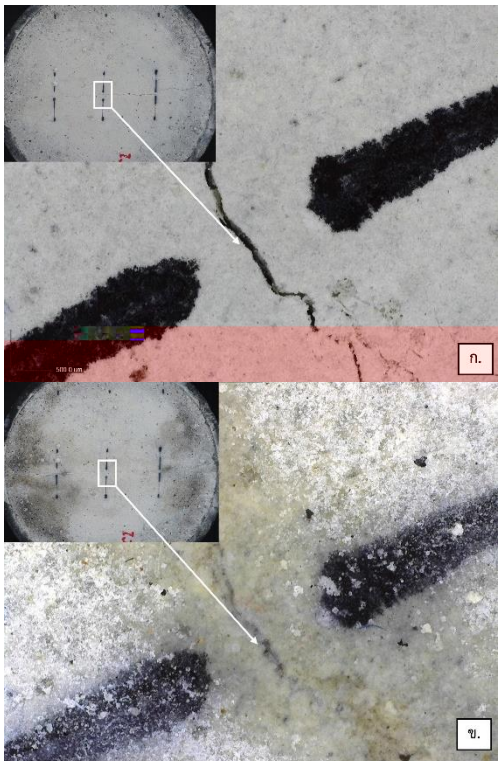
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการซ่อมแซมราวด้วยเซลล์แบคทีเรียที่มีชีวิตทั้งหมด 3 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ V1-FC, V2-FC และ V2-LC จากผลดังกล่าวนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตามหัวข้อดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

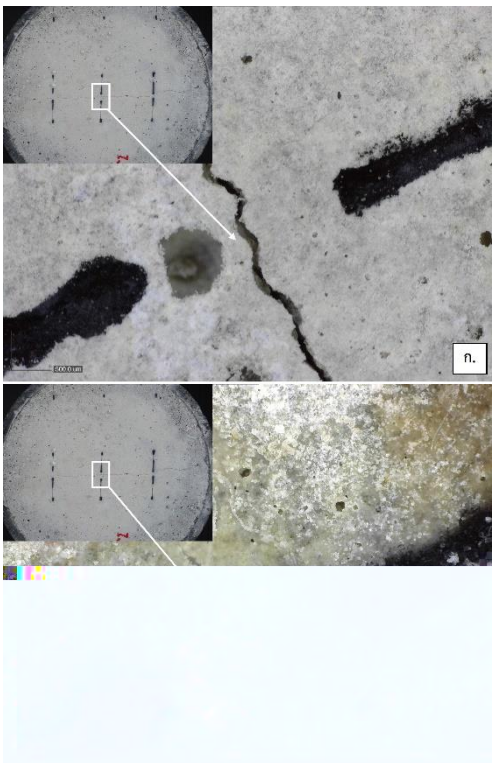
ชนิดตัวอย่าง	ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบ (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
V1-FC	26.7	55.1	71.2	76.5	76.6	79.5	90.1
V2-FC	16.4	43.3	52.2	67.6	76.0	87.9	97.0
V2-LC	9.3	25.1	31.5	34.5	39.9	45.9	54.0

3.2.1 กลุ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียในการซ่อมแซมรอยร้าว สำหรับรอยร้าวขนาดเล็ก

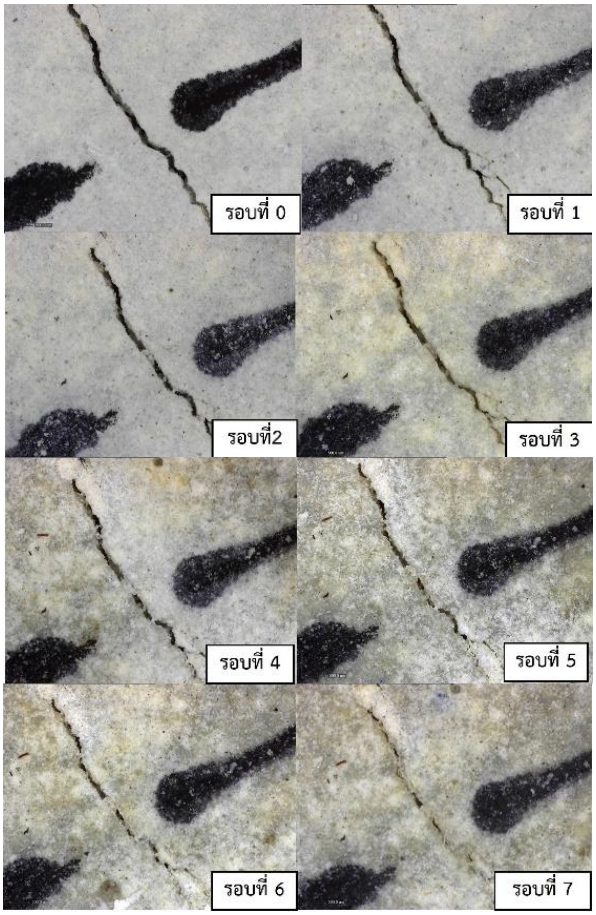
สำหรับกลุ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียในการซ่อมแซมรอยร้าวที่มีขนาดเล็ก จากรูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพในการประสานรอยร้าวของตัวอย่าง V1-FC โดย รูปที่ 4ก. คือภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงขนาดช่องว่างของรอยร้าวที่ยังไม่มีการก่อตัวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เมื่อทำการซ่อมแซมจนครบ 7 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4ข. จะสังเกตเห็นปริมาณของผลึกสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ก่อตัวขึ้นเพื่อปิดรอยร้าวบริเวณพื้นผิว [5] โดยมีค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของชนิดตัวอย่าง V1-FC เท่ากับ 90.1% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ารอยร้าวขนาดเล็กบริเวณรอบข้าง สามารถปิดได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการประสานรอยร้าวของตัวอย่าง V1-FC ก. รอยร้าวเริ่มต้น และ ข. รอยร้าวรอบที่ 7 ของการซ่อมแซม



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพในการประสานรอยร้าวของตัวอย่าง V2-FC ก. รอยร้าวเริ่มต้น และ ข. รอยร้าวรอบที่ 7 ของการซ่อมแซม



รูปที่ 6 ผลการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวจากกล้องจุลทรรศน์ของชนิดตัวอย่าง V2-LC

รูปที่ 5 แสดงรอยร้าวเริ่มต้นและรอยร้าวหลังจากการซ่อมแซม 7 รอบของตัวอย่าง V2-FC เมื่อเริ่มทำการซ่อมแซมในรอบที่ 1 ยังไม่พบการก่อตัวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เมื่อทำการซ่อมแซมครบ 7 รอบพบว่ามีผลึกสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตก่อตัวขึ้นมาปิดรอยร้าวเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 5ข. และมีค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงสูงถึง 97.0% ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบจากทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง

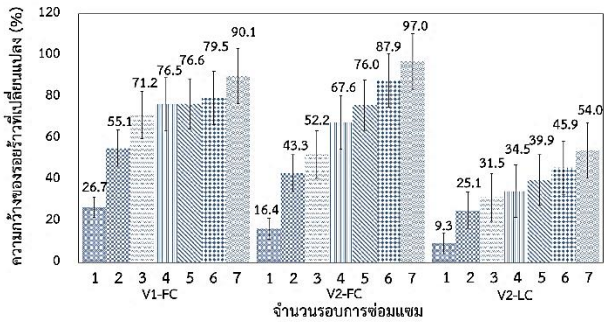
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของกลุ่มตัวอย่างที่มีรอยร้าวขนาดไม่เกิน 175 µm ได้แก่ V1-FC และ V2-FC ซึ่งมีการใช้ปริมาณแบคทีเรียและสารอาหารในการซ่อมแซมรอยร้าวที่แตกต่างกัน (20:500 µL สำหรับ V1 และ 40:1000 µL สำหรับ V2) พบว่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง มีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 7.0% จึงอาจทำให้เห็นว่าในรอยร้าวขนาดเล็ก การใช้ปริมาณเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

3.2.2 กลุ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียในการซ่อมแซมรอยร้าว สำหรับรอยร้าวขนาดใหญ่

จากผลความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของชนิดตัวอย่างที่มีรอยร้าวขนาดใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 2 เห็นได้ว่าเมื่อครบ 7 รอบของการซ่อมแซม ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของ V2-LC เท่ากับ 54.0% ซึ่งสอดคล้องกับภาพการซ่อมแซมรอยร้าวดังรูปที่ 6 ซึ่งสังเกตพบว่าเมื่อติดตามภาพการเปลี่ยนแปลงของความกว้างรอยร้าวในแต่ละรอบของการซ่อมแซมจะเห็นได้ว่าผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการก่อตัวอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบของการซ่อมแซม แต่ยังคงมีรอยร้าวที่ไม่ถูกปิดด้วยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตหลงเหลืออยู่หลังการซ่อมแซมครบ 7 รอบ

3.2.3 ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยในแต่ละรอบของการซ่อมแซม

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละกลุ่มตัวอย่างตามรอบการซ่อมแซม พบว่าทั้งสามกลุ่มตัวอย่างมีความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนครบการซ่อมแซม 7 รอบ และอาจมีแนวโน้มที่ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงจะสามารถพัฒนาต่อไปได้เมื่อมีระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อทำการเฉลี่ยค่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของกลุ่มตัวอย่างพบว่า ตัวอย่าง V1-FC และ V2-FC มีค่าเท่ากับ 20.6% และ 24.7% ตามลำดับ ซึ่งมีความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยที่ใกล้กัน ถึงแม้ว่ามีการใช้ปริมาณแบคทีเรียและสารอาหารที่แตกต่างกัน และสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ปริมาณแบคทีเรียและสารอาหารมากกว่า (V2) เพื่อซ่อมแซมขนาดรอยร้าวเล็ก และรอยร้าวขนาดใหญ่ จะเห็นว่าตัวอย่าง V2-FC และ V2-LC สามารถพัฒนาประสิทธิภาพการซ่อมแซมได้ดีขึ้นเมื่อรอบการซ่อมแซมมากขึ้น แต่ตัวอย่าง V2-FC มีแนวโน้มให้ผลการซ่อมแซมที่ดีกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบจากความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยจะพบว่าตัวอย่าง V2-FC ที่มีค่าเท่ากับ 24.7% ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่ามากกว่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของตัวอย่าง V2-LC ที่มีค่า 12.3% อาจเนื่องมาจากขนาดรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่าง V2-LC มีขนาดกว้างจึงทำให้เชื้อแบคทีเรียและสารอาหารที่ทำการหยดไหลลงสู่ด้านล่าง จึงเกิดการซ่อมแซมบริเวณผิวได้น้อยลง



รูปที่ 7 ความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง V1-FC, V2-FC และ V2-LC

4. บทสรุป

จากการซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ด้วยการใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิตและสารอาหาร 2 ระดับ ในตัวอย่างที่มีรอยร้าว 2 ขนาด คือ ความกว้างขนาดเล็กไม่เกิน 175 µm และขนาดใหญ่ความกว้างไม่เกิน 350 µm ด้วยการใช้แบคทีเรีย บาซิลลัส สฟีรีคัส ภายใต้การทำสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 รอบ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ที่ใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิต พบว่าความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงมีความใกล้เคียงกันในตัวอย่างที่มีรอยร้าวขนาดเล็ก (ไม่เกิน 175 µm) ถึงแม้ใช้ปริมาณของแบคทีเรียไม่เท่ากัน โดยสามารถซ่อมแซมรอยร้าวได้อยู่ในช่วง 90-97% เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 รอบ
2. สำหรับตัวอย่างรอยร้าวขนาดใหญ่ (175-350 µm) การซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ที่ใช้รูปแบบหยดเซลล์ที่มีชีวิต สามารถซ่อมแซมรอยร้าวได้ 54% เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 7 รอบ

3. จากผลความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มตัวอย่างพบว่า ในรอยร้าวขนาดเล็ก (ไม่เกิน 175 µm) แต่มีปริมาณเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารที่ใช้ซ่อมแซมแตกต่างกัน มีความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ยในแต่ละรอบที่ใกล้เคียงกันคือ 20.6-24.7% และเมื่อเปรียบเทียบการพิจารณาขนาดของรอยร้าวที่ใหญ่ขึ้น (175-350 µm) แต่ใช้ปริมาณสารในการซ่อมแซมเท่ากัน พบว่ามีความกว้างของรอยร้าวที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 12.3% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่มีรอยร้าวขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเกิดจากเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารที่ทำการหยดไหลลงสู่ด้านล่างของรอยร้าว ทำให้เกิดการซ่อมแซมบนผิวรอยร้าวน้อยลง

เอกสารอ้างอิง

[1] Muhammad, N. Z., Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Ghoshal, S., Yasouj, S. E. M., Ganiyu, A. A., Kouchaksaraei, M. S., Kamyab, H., & Taheri, M. M. (2016). Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 1123-1132.

[2] Talaiekhozani, A., & Abd Majid, M. Z. (2014). A review of self-healing concrete research development. *Journal of Environmental Treatment Techniques,* 2(1), 1-11.

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

[4] Wang, J., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and concrete research, 56, 139-152.

[5] Intarasoontron, J., Pungrasmi, W., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., & Likitlersuang, S. (2021). Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing. *Construction and Building Materials*, 302, 124227.

[6] Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W., & Likitlersuang, S. (2019). Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Construction and Building Materials*, 212, 737-744.

[7] ASTM, International. (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. (ASTM C305). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials

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

[9] มยผ 1332. (2555). มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.

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

[11] Maes, M., Snoeck, D., & De Belie, N. (2016). Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. *Construction and Building Materials*, 115, 114-124.

[12] *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก* (มอก.2594-2556). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.