Evaluation of performance of the cracked concrete repairing with microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique

เบญญทิพย์ มุ่งดี[1,*] พรเกษม จงประดิษฐ์[1,] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[1,] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[1,]
นนท์ ทรัพย์มั่นคงทวี[2,] ดุจเดือน วราโห[2,] ณัฐสุดา ชัยมุสิก[3] และ จิรายุส เอื้อนรเศรษฐ์[3]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2]หลักสูตรวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[3]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
*Corresponding author; E-mail address: benyatipbentip@gmail.com

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินสมรรถนะการรักษารอยร้าวของคอนกรีตที่ใช้กระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตทางจุลชีววิทยา (MICP) ด้วยแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 40 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน แบ่งคอนกรีตออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150×150×150 มม.^{3} ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด และ 2) คานคอนกรีตขนาด 150×150×600 มม.^{3} เสริมด้วยเหล็กกลม 2 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เพื่อประเมินความสามารถในการรักษารอยร้าว และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต สำหรับการสร้างรอยร้าวของตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ใช้แผ่นพลาสติกความกว้าง 0.2 มม. ลึก 20 มม. และยาว 90 มม. สำหรับรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เกิดจากการดัดคานแบบให้น้ำหนักกดสี่จุด (Four-point loading) จนได้ความกว้างของรอยร้าวประมาณ 0.2-0.3 มม. ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่รักษารอยร้าวด้วยเทคนิค MICP มีสมรรถนะสูงกว่าทั้งในด้านกำลังรับแรงอัด และลดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้รับการรักษา แต่ยังมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวเล็กน้อย นอกจากนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่รักษาโดยวิธี MICP พบว่าผลิตภัณฑ์หลักคือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งเกิดจากกระบวนการ MICP ผลลัพธ์นี้ยังชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้แบคทีเรียด้วยเทคนิค MICP ในการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตได้

คำสำคัญ: *Lysinibacillus sphaericus*, กระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตทางจุลชีววิทยา (MICP), การรักษารอยร้าวของคอนกรีต

Abstract

This article aims to evaluate the cracked concrete repaired by using the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique with *Lysinibacillus sphaericus* strains LMG 22257 and EW-S2. The concrete sample used in this study had a compressive strength of about 40 MPa at 28 days, and two types of concrete shapes were prepared, i.e., 1) cube concrete with a dimension of 150x150x150 mm^3 which was used to determine the compressive strength, and 2) concrete beam having a dimension of 150x150x600 mm^3 and reinforced with 2-RB12 mm steel bar, which was used to evaluate the corrosion of steel reinforcement embedded in concrete and the ability of crack healing. The crack concrete was made in cube samples to have 0.2 mm in width, 20 mm in depth, and 90 mm in length by using a plastic sheet. For reinforced concrete beams, the crack was created by four-point loading until a crack width of 0.2-0.3 mm was obtained. The results found that that the concrete repaired with the MICP technique exhibited higher performance in terms of higher compressive strength and lower steel corrosion compared to the concrete without repairing but slightly lower than the concrete without crack. Moreover, the microstructure analysis of the repaired concrete showed that the main product was calcium carbonate ($CaCO_3$), which was caused by the MICP. These results also suggested that the use of bacteria via the MICP technique could be to use to repair the concrete crack.

Keywords: *Lysinibacillus sphaericus*, MICP, crack repairing concrete

1.

รอยร้าวในคอนกรีตเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากรอยร้าวสามารถเปิดช่องทางให้สารละลายเคมีแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและความทนทานโดยรวมของคอนกรีต การแก้ไขปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันมักใช้วิธีการเคลือบผิว การใช้วัสดุยึดเกาะ หรือการใช้กาวชนิดต่างๆ แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะมีความเหมาะสมในระดับหนึ่ง แต่ยังพบปัญหาด้านต้นทุนและการหลุดร่อนของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม จึงมีความพยายามในการค้นหาวิธีการทดแทนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งในวิธีการที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันคือการใช้แบคทีเรียเพื่อผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งการตกตะกอนทางชีวภาพของแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สามารถรักษารอยร้าวได้มากถึงร้อยละ 80 ภายใต้สภาวะการบ่มแบบเปียก [1] โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นจากการสลายตัวของแคลเซียม และยูเรียที่แบคทีเรียสร้างขึ้นเพื่อผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต แบคทีเรียหลั่งยูรีเอสและทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการตกตะกอน ซึ่งทำให้ยูเรียถูกไฮโดรไลซ์เป็นแอมโมเนียมและไอออนของคาร์บอเนต [2] ดังสมการ (1)

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{Urease}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

ไอออนคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับไอออนแคลเซียมที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากแคลเซียมคลอไรด์ที่มีอยู่ในสารละลาย ผลลัพธ์จากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของแคลไซต์ ดังสมการ (2)

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตมีผลมาจากการเผาผลาญต่าง ๆ ของเชื้อแบคทีเรียที่นำไปสู่การผลิตคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่มีอยู่ ดังนั้นการก่อตัวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจึงเกิดขึ้น [3] การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตที่จำเป็นต้องใช้แบคทีเรียที่สามารถผลิตยูรีเอส (Urease) ได้ หลักการคือการกระตุ้นเชื้อแบคทีเรียให้เกิดการตกตะกอน อาศัยแบคทีเรียที่เข้าสู่กระบวนการยูรีโอไลติก (Ureolytic) โดยสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอส (Enzyme urease) เพื่อการย่อยสลายยูเรีย โดยเมื่อมีปริมาณแคลเซียมไอออน (Calcium Ion) ที่เหมาะสมจะสามารถทำปฏิกิริยาจนชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ [4] นอกจากสามารถซ่อมรอยร้าวได้แล้ว การใช้เชื้อแบคทีเรียสามารถเติมรอยร้าวในคอนกรีตเสริมเหล็กได้ แม้ว่าวิธีนี้จะไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง แต่จะช่วยเสริมความทนทานโดยการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายเพิ่มเติมและรักษาความสมบูรณ์ของเหล็กเสริมไว้ [5]

โดยแบคทีเรียที่เลือกใช้จัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีความเสี่ยงหรือเสี่ยงน้อยต่อบุคคลและชุมชน และเป็นแบคทีเรียที่มีวิธีการเลี้ยงเชื้อ อาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อ มีช่วงเวลาที่ผลิตแคลไซต์ที่ค่อนข้างละเอียดและสามารถทดสอบได้ทันที คือสายพันธุ์ *Lysinibacillus sphaericus* ที่มีคุณสมบัติและความทนทานครบถ้วน สามารถทนต่อความเป็นเบสสูง มีความสามารถในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สูง เป็นแบคทีเรียที่สามารถอาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมเปิดได้ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ [6]

สำหรับเวลาในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์ยูรีเอสในช่วง 12-24 ชั่วโมง มีแนวโน้มความหนาแน่นของแบคทีเรียที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตมากที่สุด และเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต [7] เมื่อแบคทีเรียถูกกระตุ้นทำให้เกิดการหลั่งยูรีเอสออกมา ทำให้ต้องมีการทดสอบหาปริมาณยูรีเอส การทดลองอินดิเคเตอร์จะสามารถบ่งชี้ความเข้มข้นของเอนไซม์ยูรีเอส (สถานะเป็นเบส) ที่แบคทีเรียปลดปล่อยออกมาได้ สำหรับสายพันธุ์ LMG 22257 พบว่าการผลิตยูรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12-20 ชั่วโมง และสายพันธุ์ EW-S2 พบว่าการผลิตยูรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12 ชั่วโมง [8]

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากแบคทีเรีย รวมถึงการประเมินผลสมรรถนะทางกายภาพ และความทนทานของคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซม ด้วยแบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* เปรียบเทียบ 2 สายพันธุ์ คือ LMG 22257 (สายพันธุ์ที่ใช้กันแพร่หลายในงานวิจัยด้าน MICP) และ EW-S2 (สายพันธุ์ที่คัดแยกได้ในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยทำการคัดแยกจากมูลไส้เดือนดิน) [8] โดยขั้นตอนแรกทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีรอยร้าว บ่มคอนกรีตเป็นเวลา 90 วันและทำการทดสอบเพื่อหาเวลาในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอสได้ในปริมาณสูง เมื่อบ่มคอนกรีตได้ครบกำหนดแล้ว จากนั้นเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียด้วยชั่วโมงที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอสได้ในปริมาณสูง เพื่อให้เชื้อแบคทีเรียมีความเข้มข้นสูง จึงนำเชื้อแบคทีเรียไปปั่นให้ตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge) จากนั้นเตรียมสารละลายทางเคมี นำเชื้อที่ตกตะกอนมาผสมกันแล้วนำไปซ่อมรอยร้าวของคอนกรีต

2.

2.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 40 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และมีค่าการยุบตัว 100 ± 25 มม. อัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1

1 สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตร

ซีเมนต์ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน (กก.)	น้ำ (กก.)	สารผสมเพิ่ม* (มล.)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
440	760	1045	171	1980	0.4

**สารหน่วงการก่อตัว Type D (SCCO 1001)*

2.2 การเตรียมแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ

2.2.1 สภาวะของแบคทีเรียในการทดสอบ

สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียนั้นจำเป็นต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม แบคทีเรียแต่ละชนิดต้องการช่วงอุณหภูมิในการเจริญเติบโตแตกต่างกันไป เช่น อุณหภูมิต่ำ (Minimum temperature) แบคทีเรียมีการแบ่งตัวน้อยและดำเนินกิจกรรมทางด้านเมตาบอลิซึมน้อย อุณหภูมิปานกลาง (Optimum temperature) เป็นอุณหภูมิเหมาะสมที่สุดสำหรับ

การเจริญเติบโต แบ่งตัวได้เร็วที่สุดและมีอัตราของเมตาบอลิซึมสูงสุด และอุณหภูมิสูงสุด (Maximum temperature) หากอุณหภูมิสูงขึ้นอีกเล็กน้อยจะทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียหยุดลง ถ้ายังคงสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งเอนไซม์ (Enzyme) และกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) จะถูกทำให้สูญเสียการทำงานหรือเรียกว่า Inactivation อย่างถาวร และแบคทีเรียจะตายในที่สุด ซึ่งเป็นหลักการทั่วไปที่นำไปใช้ในการทำลายแบคทีเรียด้วยความร้อน สำหรับแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แบคทีเรียสายพันธุ์ *Lysinibacillus sphaericus* LMG 22257 และ EW-S2 เป็นเชื้อที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลางในช่วงอุณหภูมิ 25-45 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิต่ำสุดในการเจริญเติบโตคือ 5-25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 37 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดที่เจริญเติบโตได้คือ 43 องศาเซลเซียส

2.2.2 ขั้นตอนและวิธีการเพิ่มจำนวนแบคทีเรีย

เวลาในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์ยูรีเอส และผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากในการซ่อมแซมรอยร้าว ทำการทดสอบโดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบในตู้บ่มเชื้อเป็นเวลา 3 วันหรือจนกว่าจะสังเกตุเห็นกลุ่มเชื้อ (colony) และทำการนับจำนวนกลุ่มเชื้อที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมง สำหรับสายพันธุ์ *Lysinibacillus sphaericus* ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Nutrient broth (NB) ปริมาณ 13 กรัมต่อลิตร โดยสายพันธุ์ LMG 22257 เลี้ยงเชื้อด้วยความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และสายพันธุ์ EW-S2 ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ในขวดรูปชมพู่อย่างละ 250 มล เลี้ยงด้วยเครื่องเขย่าสารโดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ประมาณ 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าว

2.2.3 สารละลายทางเคมี

สารประกอบทางเคมี (Chemical Solution) เป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตทางจุลชีววิทยา (MICP) สารเคมี และความเข้มข้นที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2 [2]

2 สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

สารประกอบทางเคมี		
อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Nutrient broth (NB)	3.00	กรัม/ลิตร
ยูเรีย	0.50	โมลาร์
แอมโมเนียคลอไรด์	10.00	กรัม/ลิตร
โซเดียมไบคาร์บอเนต	2.12	กรัม/ลิตร
แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต	0.50	โมลาร์

2.2.4 การผสมเชื้อเข้ากับสารละลายทางเคมี

ขั้นแรกเตรียมเชื้อแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์ ที่มีการเจริญเติบโตในช่วง 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียไปปั่นให้ตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge) ดังรูปที่ 1 ด้วยความเร็วในการหมุนคือ 4500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเชื้อมีการตกตะกอนแล้ว ทำการเทอาหารเลี้ยงเชื้อออก จากนั้นใช้อัตราส่วนเชื้อแบคทีเรียต่อสารละลายทางเคมี 5:1 ผสมเชื้อที่ตกตะกอนกับสารละลายให้เข้ากัน และใช้ปิเปตทำการฉีดของเหลวที่ผสมแล้วลงที่รอยร้าวของคอนกรีตตัวอย่างละ 5 มล. เพื่อซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการซ่อมแซมรอยร้าวของตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์และตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ของเหลวในปริมาณเท่ากัน



(ก) เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน



(ข) เชื้อก่อนทำการปั่นเหวี่ยงตกตะกอน



(ค) เชื้อหลังทำหารปั่นเหวี่ยงตกตะกอน



(ง) เชื้อหลังทำการผสมกับสารละลายทางเคมี

1 การปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge)

2.3 การสร้างรอยร้าวของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150×150×150 มม.^{3} ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด สำหรับการสร้างรอยร้าวใช้แผ่นพลาสติกสร้างให้รอยร้าวมีความกว้าง 0.2 มม. ลึก 20 มม. และยาว 90 มม. โดยการเสียบแผ่นพลาสติก ดังรูปที่ 2 ทำการเสียบให้ตรงลงในเนื้อคอนกรีตสดในคราวเดียวและใช้คอนยางทุบด้านข้างของแบบเพื่อไล่ฟองอากาศแล้วทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง หรือคอนกรีตเริ่มมีการก่อตัวแล้ว ทำการดึงแผ่นพลาสติกออก จะได้รอยร้าวที่มีขนาด ความกว้างประมาณ 0.2 มม. ลึก 20 มม. และยาว 90 มม.



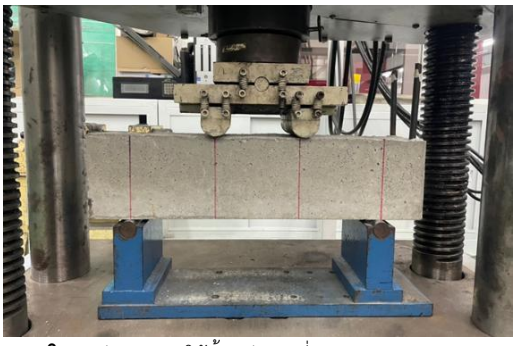
2 ลักษณะการเสียบแผ่นพลาสติกเพื่อสร้างรอยร้าว

สำหรับตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 150x150x600 มม.^{3} เสริมด้วยเหล็กกลม 2 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เพื่อประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าว สำหรับรอยร้าวของคานคอนกรีต เกิดจากการดัดคานแบบให้น้ำหนักกดสี่จุด (Four-point loading) ดังรูปที่ 3 โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมกับโปรแกรมซอฟต์แวร์ CoolingTech เพื่อตรวจสอบรอยร้าวบริเวณใต้คานให้มีขนาดความกว้างของรอยร้าวประมาณ 0.2-0.3 มม. โดยทำการให้น้ำหนักทีละนิดสลับกับการส่องดูรอยร้าวให้ได้ขนาดของรอยร้าวที่ต้องการ โดยการแบ่งชุด

ตัวอย่างสำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์และตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงดังตารางที่ 3

$$W(\%) = \frac{wi-wt}{wi} x100 \quad (3)$$

ร้อยละการซ่อมแซมรอยร้าวประเมินได้โดยการลดลงของขนาดรอยร้าวเริ่มต้น w_i ขนาดรอยร้าวเริ่มต้นจะถูกลบด้วยขนาดรอยร้าวในช่วงเวลาที่กำหนด w_t แล้วนำผลลัพธ์ไปหารด้วยขนาดรอยร้าวเริ่มต้น [9] ดังสมการที่ 3 ในการวัดขนาดความกว้างรอยร้าวใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ ร่วมกับโปรแกรมซอฟต์แวร์ CoolingTech ทำการวัดรอยร้าวเริ่มต้น จากนั้นทำการวัดรอยร้าวทุก ๆ 7 14 21 และ 28 วัน ตามการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรีย



3 การดัดคานแบบให้น้ำหนักกดสี่จุด (Four-point loading) เพื่อสร้างรอยร้าว

3 ชุดตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่าง	ลักษณะรอยร้าว	จำนวนตัวอย่าง	
		คอนกรีตทรงลูกบาศก์	คานคอนกรีตเสริมเหล็ก
NC	ไม่มีรอยร้าว	3	1
LMG	ซ่อมแซมรอยร้าว*	3	1
S2	ซ่อมแซมรอยร้าว**	3	1
Cr	ไม่ได้ซ่อมแซมรอยร้าว	3	1

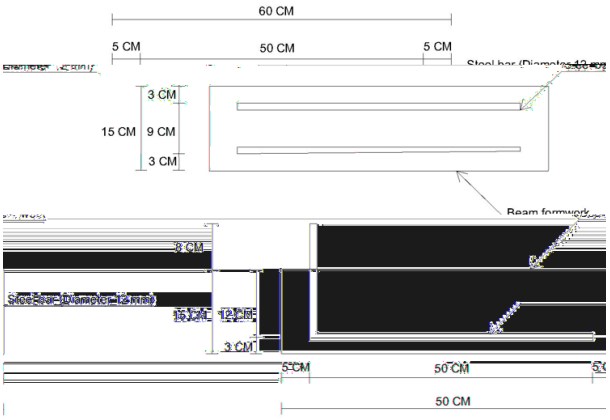
ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257

**ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2*

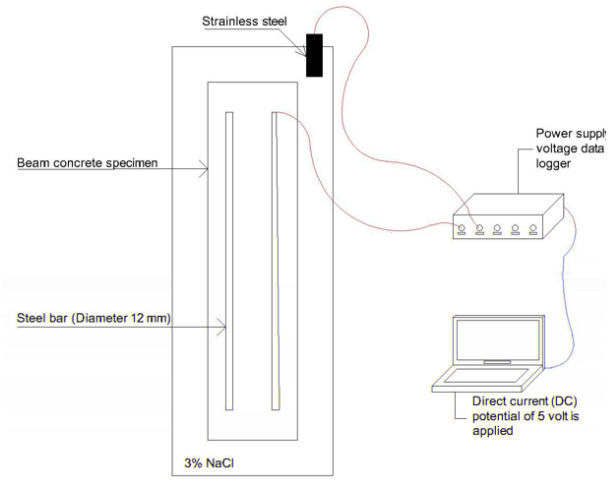
2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12390-3 (2019) [10] ใช้คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 มม.^{3} โดยทำการเจียรผิวหน้าตัวอย่างเพื่อให้มีความเรียบ ก่อนทำการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรีย เมื่อรอยร้าวได้รับการซ่อมแซมจนปิดสนิท แล้วจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยเปรียบกำลังรับแรงอัดระหว่างคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว คอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิด และคอนกรีตที่มีรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม

2.5 การทดสอบการเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม



(ก) รูปแบบการติดตั้งเหล็กเสริม



(ข) รูปแบบการติดตั้งชุดทดสอบ



(ค) ขณะทำการทดสอบ

4 การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตทดสอบโดยประยุกต์ตามมาตรฐาน NT Build 356 (1989) [11] โดยเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีตขนาด 150×150×600 มม.^{3} เสริมด้วยเหล็กเส้นกลม 2 เส้น ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 12 มม. ดังรูปที่ 4(ก) และชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมเพื่อเป็นค่าเริ่มต้น โดยลักษณะการติดตั้งเหล็กเสริมเป็นไปตามงานวิจัยของ [12] ดังรูปที่ 4(ข) จากนั้นทำการหล่อคานโดยเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในแบบหล่อ แกะแบบหลังจากหล่อ 24 ชั่วโมง และทำการบ่มคอนกรีตในน้ำ 90 วัน

ทำการสร้างรอยร้าวบริเวณใต้คานโดยการดัดคานแบบให้น้ำหนักกดสี่จุด (Four-point loading) ดังรูปที่ 3 ให้มีขนาดรอยร้าวประมาณ 0.2-0.3 มม. และทำการซ่อมแซมรอยร้าวตามหัวข้อที่ 2.2 เป็นเวลา 28 วัน จนรอยร้าวถูกซ่อมแซมจนปิดสนิทด้วยการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตของเชื้อแบคทีเรียเริ่มทำการทดสอบความสามารถของคลอไรด์ในการซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตภายใต้แรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน NT Build 356 รูปแบบการติดตั้งชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร แช่ตัวอย่างที่ความสูง 7.5 เซนติเมตร โดยบันทึกข้อมูลทุก ๆ 6 ชั่วโมง จนครบ 168 ชั่วโมงหรือ 7 วัน จากนั้นทำลายคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมด้วยการกดคานคอนกรีตแบบผ่าซีก นำเหล็กด้านในมาทำความสะอาด และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM G1 [13] โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 500 มิลลิลิตร ร่วมกับเฮกซามีน ($(CH_2)_6N_4$) ในปริมาณ 3.5 กรัม เติมลงในน้ำจนมีปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร แช่เหล็กที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของเหล็ก

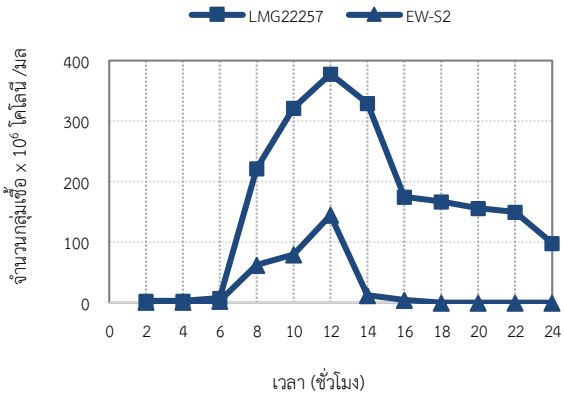
2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ทำการทดสอบโดยการเก็บตัวอย่างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผิวคอนกรีตหลังเกิดการซ่อมแซมรอยร้าวของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ และการทดสอบการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มีกำลังขยายสูง ใช้ศึกษาลักษณะของตัวอย่างที่คาดว่าเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยการแสดงผลลัพธ์รูปแบบ 3 มิติ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) คือเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้น เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีหรือธาตุของตัวอย่าง

3.

3.1 ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

จากรูปที่ 5 พบว่าช่วงเวลาที่ดีที่สุดในการผลิตเอนไซม์ยูรีเอส คือ ชั่วโมงที่ 12 สำหรับสายพันธุ์ LMG 22257 มีปริมาณกลุ่มเชื้อเท่ากับ $378x10^6$ โคโลนี/มล และสำหรับสายพันธุ์ EW-S2 มีปริมาณกลุ่มเชื้อเท่ากับ $144.5x10^6$ โคโลนี/มล จะเห็นว่าการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 มีจำนวนกลุ่มเชื้อที่มากกว่าสายพันธุ์ EW-S2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพงศกร และคณะ [8] เกิดจากความสามารถเฉพาะสายพันธุ์ในการเจริญเติบโตหรือกระตุ้นการแบ่งตัวของเซลล์ได้มากให้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งช่วยให้มีจำนวนเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลา 8-12 ชั่วโมง ในขณะเดียวกันสายพันธุ์ EW-S2 ซึ่งมีข้อจำกัดในการแบ่งตัวของเซลล์ที่มากกว่านั้น ทำให้มีจำนวนกลุ่มเชื้อที่น้อยกว่า แต่มีการเจริญเติบโตหรือกระตุ้นการแบ่งตัวของเซลล์ที่มากขึ้นในช่วงเวลา 8-12 ชั่วโมงเช่นกัน

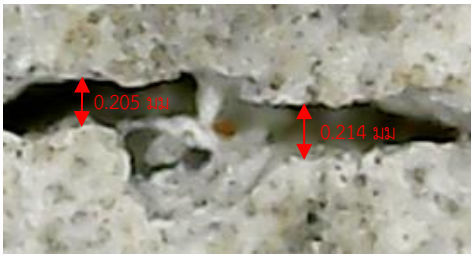


5 ความสัมพันธ์ระหว่างชั่วโมงต่อจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่สร้างเอมไซม์ต่อมิลลิลิตร

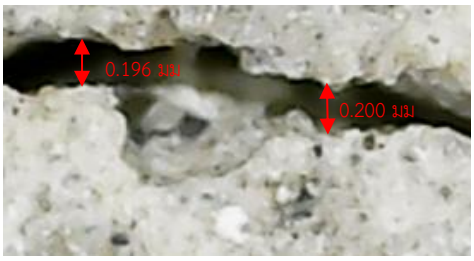
3.2 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าว

จากรูปที่ 6 สำหรับตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 ก่อนได้รับการซ่อมแซมมขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.201 มม. หลังจากลงเชื้อแบคทีเรียที่ผสมกับสารละลายทางเคมีเป็นเวลา 7 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.198 มม. รอยร้าวได้รับการซ่อมแซมร้อยละ 1.49 ซึ่งถือว่ามีการซ่อมแซมรอยร้าวน้อย เนื่องจากการซ่อมแซมในช่วงแรกของเหลวจะลงไปสร้างผลึกด้านล่างของรอยร้าวทำให้ยังไม่สามารถสังเกตุเห็นได้ แต่ที่ผิวของคอนกรีตจะเริ่มพบผลึกสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น หลังจากผ่านไป 14 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.158 มม. รอยร้าวได้รับการซ่อมแซมร้อยละ 21.39 ที่ผิวหน้าคอนกรีตเกิดผลึกสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้น มีลักษณะคล้ายฟิล์มสีขาวเคลือบที่ผิวคอนกรีต และเมื่อผ่านไป 21 วัน พบว่ามีการซ่อมแซมรอยร้าวได้อย่างสมบูรณ์

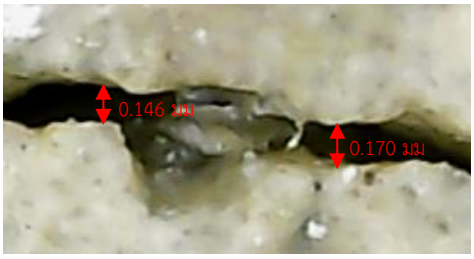
จากรูปที่ 7 สำหรับตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 ก่อนได้รับการซ่อมแซมมขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.212 มม. หลังจากลงเชื้อแบคทีเรียที่ผสมกับสารละลายทางเคมีเป็นเวลา 7 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.209 มม. รอยร้าวได้รับการซ่อมแซมร้อยละ 1.42 ซึ่งถือว่ามีการซ่อมแซมรอยร้าวน้อยเช่นเดียวกับการซ่อมแซมด้วยสายพันธุ์ LMG 22257 หลังจากผ่านไป 14 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.169 มม. รอยร้าวได้รับการซ่อมแซมร้อยละ 20.28 ที่ผิวหน้าคอนกรีตเกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตคล้ายกับสายพันธุ์ LMG 22257 แต่มีลักษณะเป็นฟิล์มสีขาวเหลืองและมีความชื้นมากกว่า เมื่อผ่านไป 21 วัน พบว่าขนาดรอยร้าวมีความกว้างเฉลี่ย 0.055 มม. รอยร้าวได้รับการซ่อมแซมร้อยละ 74.06 และเมื่อผ่านไป 28 วัน สามารถซ่อมแซมรอยร้าวได้อย่างสมบูรณ์



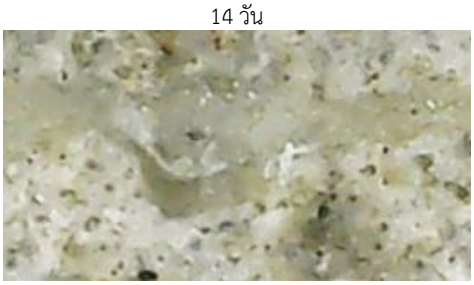
0 วัน



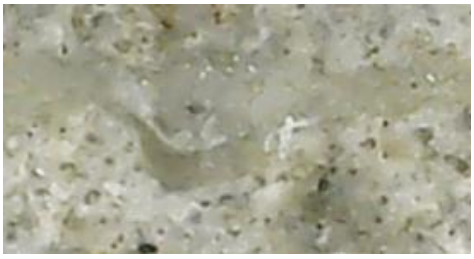
7 วัน



14 วัน



21 วัน



28 วัน

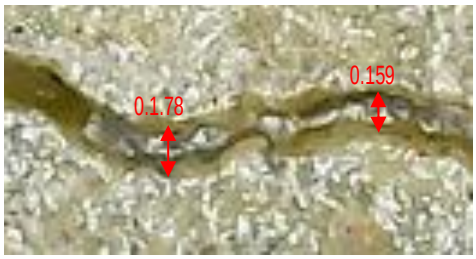
6 ลักษณะการซ่อมรอยร้าวของแบคทีเรีย LMG 22257



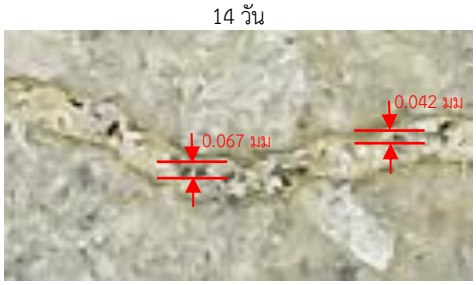
0 วัน



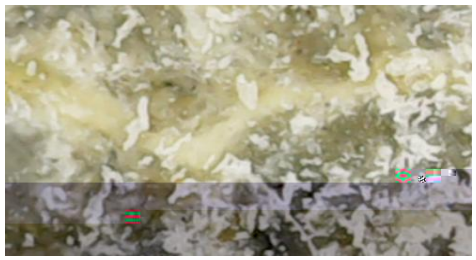
7 วัน



14 วัน



21 วัน



28 วัน

7 ลักษณะการซ่อมรอยร้าวของแบคทีเรีย EW-S2

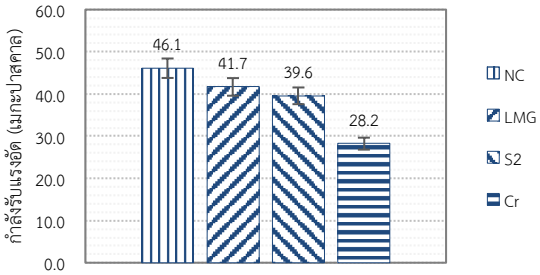
จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ซ่อมแซมด้วยแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สามารถใช้การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานวิจัย Algaifi และคณะ [9] สำหรับสายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 สามารถสร้างแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อซ่อมแซมรอยร้าวขนาดความกว้าง 0.2 มม. ลึก 20 มม. และยาว 90 มม. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าในช่วงแรกมีการซ่อมแซมรอยร้าวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากทันทีหลังจากการซ่อมแซม เชื้อแบคทีเรียและสารละลายทางเคมีที่เป็นของเหลวจะไหลลงไปในรอยร้าวและถูกดูดซับอย่างรวดเร็วโดยโครงสร้างรูพรุนของคอนกรีต ผลการซ่อมแซมจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจนกว่าโครงสร้างรูพรุนจะเต็มไปด้วยการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจาก 7 วัน จึงเริ่มเห็นการซ่อมแซมของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น และบริเวณผิวหน้าคอนกรีตมีผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นทั่วผิวหน้า เพราะมีการดูดซึมของเหลวที่ช้าลงทำให้สามารถสังเกตุเห็นการซ่อมแซมที่เพิ่มขึ้น โดยสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถซ่อมรอยร้าวได้สมบูรณ์ภายใน 21 วัน ซึ่งเร็วกว่าสายพันธุ์ EW-S2 ที่ซ่อมได้สมบูรณ์ภายใน 28 วัน แสดงว่าการสร้างผลึกของแคลเซียม

คาร์บอเนตด้วยสายพันธุ์ LMG 22257 มีความหนาแน่นและมีประสิทธิภาพมากกว่า

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ไม่มีรอยร้าว (NC) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดเท่ากับ 46.1 เมกะปาสคาล เนื่องจากเป็นคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว และมีความสมบูรณ์ของคอนกรีตที่สุด จึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด สำหรับคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและทำการซ่อมแซมรอยร้าวจนปิดสนิทด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 (LMG) และสายพันธุ์ EW-S2 (S2) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำลงมาเล็กน้อยเท่ากับ 41.7 เมกะปาสคาล และ 39.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ผ่านการสร้างรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม (Cr) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุดเท่ากับ 28.2 เมกะปาสคาล เนื่องจากเป็นคอนกรีตที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและได้รับการซ่อมแซม ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถอุดรอยร้าวได้สนิทและแน่น ทำให้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต จึงทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า และเนื่องจากคอนกรีตที่มีรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม มีช่องว่างของการสร้างรอยร้าวอยู่ ส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด

แสดงว่าการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตในรอยร้าวของคอนกรีต สามารถอุดรอยร้าวให้เต็มแน่นและมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nasser และคณะ [14]



8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบกำลังอัดและตัวอย่างคอนกรีต

3.4 การเกิดสนิมและการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

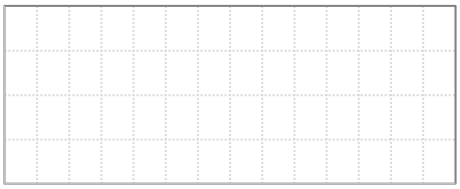
3.4.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต

การทดสอบนี้ใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้วัดความสามารถของคลอไรด์ในการซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตภายใต้แรงดันไฟฟ้า ตามมาตรฐาน NT Build 356 (1989) [11] ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าของตัวอย่างทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว (NC) พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 28 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยมีอัตราเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้ามากขึ้นในช่วง 0 ถึง 60 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าลดลง เนื่องจากไอออนของคลอไรด์แทรกซึมไปที่เหล็กเสริมด้านในของคอนกรีตได้ยากกว่าตัวอย่างอื่นเพราะไม่มีรอยร้าว

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและทำการซ่อมแซมรอยร้าวจนปิดสนิทด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 (LMG) พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้ามากขึ้นเป็นอันดับที่ 2 โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 40 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยมีการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ค่อนข้างน้อยและคงที่ในช่วง 0 ถึง 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วง 72 ถึง 90 ชั่วโมง และลดลงเล็กน้อยจนถึงชั่วโมงที่ 108 จากนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จะเห็นว่ามีแนวโน้มของอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟมีความใกล้เคียงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าวการ แต่มีค่าที่มากกว่าเนื่องจากการซ่อมแซมรอยร้าวที่ถึงแม้จะปิดสนิทดีแล้วแต่การยึดเกาะไม่ดีเท่ากับคอนกรีตธรรมดาเหมือนกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว ทำให้ไอออนของคลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านไปในคอนกรีตได้มากกว่า อย่างไรก็ตามคานตัวอย่างนี้มีค่าที่น้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม (Cr) อยู่มาก แสดงว่าการซ่อมแซมคอนกรีตด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถลดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้ดี

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและทำการซ่อมแซมรอยร้าวจนปิดสนิทด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 (S2) มีค่ากระแสไฟฟ้ามากขึ้นเป็นอันดับที่ 3 โดยค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 56 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลา 168 ชั่วโมง ในช่วง 0 ถึง 24 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและทำการซ่อมแซมรอยร้าวจนปิดสนิทด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 แต่หลังจากนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงจนถึงชั่วโมงที่ 168 หรือจนทำการทดสอบเสร็จ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 จะค่าที่สูงกว่าของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว เกิดจากการซ่อมแซมรอยร้าวที่ถึงแม้จะปิดสนิทดีแล้วแต่ผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นอาจมีความหนาแน่นน้อยกว่าการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านไปในคอนกรีตได้มากกว่า นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการไหลผ่านของกระแสไฟที่ใกล้เคียงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว และมีค่าที่น้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมอยู่มาก แสดงว่าการซ่อมแซมคอนกรีตด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 สามารถลดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้ดี

สำหรับตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม (Cr) โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ 73 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีค่ามากที่สุด โดยมีการเพิ่มขึ้นสูงตั้งแต่เริ่มการทดสอบและมีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 168 หรือจนทำการทดสอบเสร็จ เนื่องจากมีรอยร้าวที่บริเวณใต้คานคอนกรีตทำให้ไอออนของคลอไรด์สามารถแทรกซึมได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว และคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรีย



9 ความสัมพันธ์ระหว่างการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาทดสอบ

สรุปได้ว่าการซ่อมแซมรอยร้าวคานคอนกรีตเสริมเหล็กของเชื้อแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 นั้นมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวได้ เพราะผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่สร้างขึ้นสามารถทนต่อการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ได้ จึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมของคอนกรีตได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Schlangen และคณะ [5]

3.4.2 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ใช้เพื่อตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต เมื่อทำการทดสอบความสามารถของคลอไรด์ในการซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตภายใต้แรงดันไฟฟ้าแล้ว จากนั้นหาปริมาณการกัดกร่อนของสนิม ตามวิธีของ ASTM G1 [13]

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว (NC) มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 1.16 เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวจึงเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมต่ำ ทำให้เกิดสนิมน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ภายใต้แรงดันไฟฟ้า ลักษณะการเกิดสนิมคือ บริเวณเหล็กเสริมมีการเกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย บริเวณส่วนใหญ่มีความสมบูรณ์ของเหล็กเสริม หลังทำการขจัดสนิมออกจึงมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อย

4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมคอนกรีต

ตัวอย่าง	ลักษณะการเกิดสนิม	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม
NC		1.16
LMG		1.73
S2		1.75
Cr		2.89

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวและทำการซ่อมแซมรอยร้าวจนปิดสนิทด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 (LMG) และเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ใกล้เคียงกันมากคือ ร้อยละ 1.73 และร้อยละ 1.75 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการสร้างรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม (Cr) โดยการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 มีค่าต่ำกว่าของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 เพียงเล็กน้อย แสดงว่าถึงแม้การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากกว่า แต่เหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันกับตัวอย่าง สังเกตุจากลักษณะการกัดกร่อนพบว่าเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนบริเวณผิวหน้าของเหล็กค่อนข้างมาก เกิดจากผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตน้อยทำให้มีการกัดกร่อนที่มาก หลังจากทำการขจัดสนิมออกจึงมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว แต่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการซ่อมแซม แสดงว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตในรอยร้าวของคอนกรีตสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้รับการซ่อมแซม มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุดคือ ร้อยละ 2.89 เนื่องจากเป็นคอนกรีตที่ผ่านการสร้างรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม ไอออนของของคลอไรด์จึงเข้าไปกัดกร่อนที่เหล็กเสริม ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในปริมาณที่มากที่สุด บริเวณผิวหน้าเหล็กเสริมจึงมีการกัดกร่อนสูง สังเกตุได้ว่าที่ผิวของเหล็กเสริมเกิดสนิมขึ้นทั้งหมด หลังจากทำการขจัดสนิมออกจึงมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียกับตัวอย่างไม่มีรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม พบว่าการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเชื้อแบคทีเรียสามารถลดการการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tayebani และคณะ [15] ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตถูกกัดกร่อนน้อยลง ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิมได้ และทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเกิดขึ้นน้อยลง

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

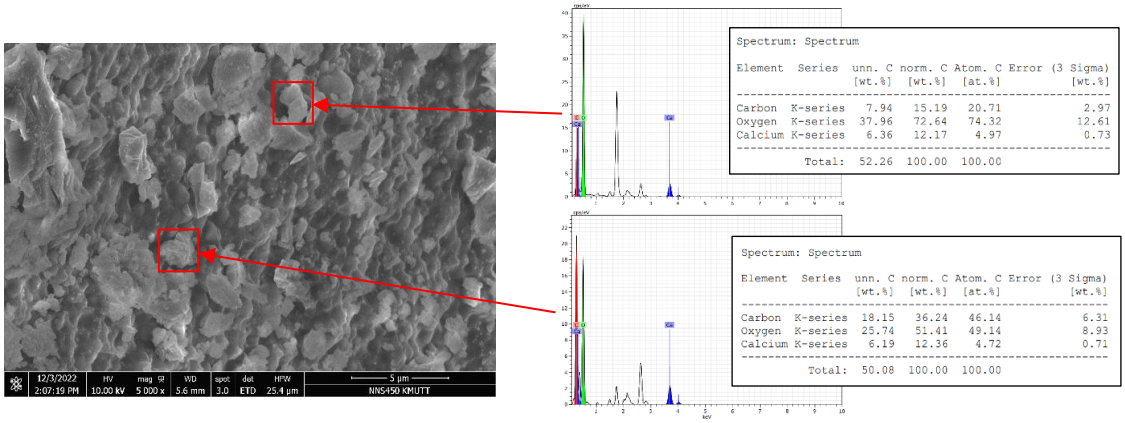
จากรูปที่ 10 แสดงภาพกำลังขยายของตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 ที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่ามีโครงสร้างของผลึกสีขาวขนาดเล็กกว่าผลึกของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 ผลึกที่มีลักษณะเด่น คือ ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการกระจายอยู่ทั่วบริเวณ แสดงให้เห็นว่าเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และ แคลเซียม (Ca) เป็นหลัก ซึ่งเป็นธาตุประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการสุ่มเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุเป็นร้อยละน้ำหนักพบว่ามีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ร้อยละ 52.26 และร้อยละ 50.28 แสดงว่าเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถผลิตสารประกอบที่มีผลิตภัณฑ์หลัก คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ได้จริง

จากรูปที่ 11 แสดงภาพกำลังขยายของตัวอย่างที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 ที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่ามีโครงสร้างของผลึกสีขาวขนาดใหญ่กว่าผลึกของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 ผลึกที่มีลักษณะเด่น คือ ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการเกาะกลุ่มของแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด

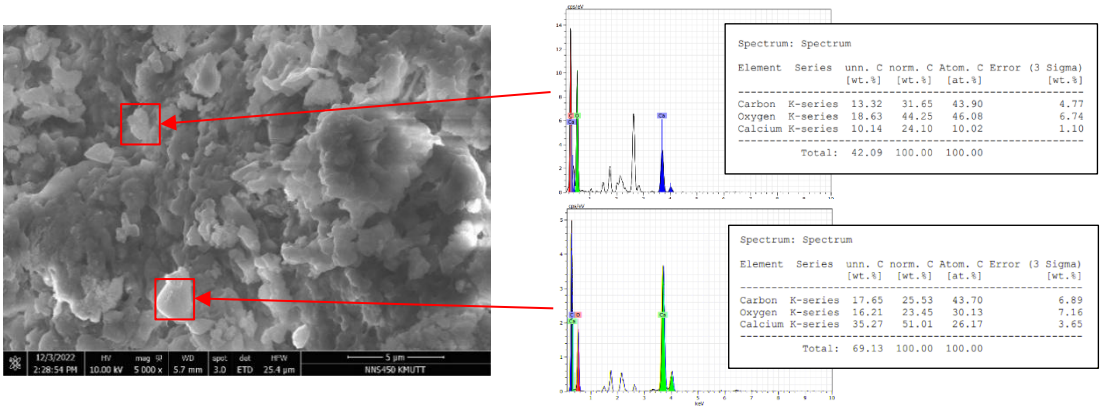
ใหญ่ แสดงให้เห็นว่าเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2 สามารถผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (EDS) พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และแคลเซียม (Ca) เป็นหลัก ซึ่งเป็นธาตุประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการสุ่มเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุเป็นร้อยละน้ำหนักพบว่ามีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ร้อยละ 42.09 และร้อยละ 69.13 แสดงว่าเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถผลิตสารประกอบที่มีผลิตภัณฑ์หลัก คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ได้จริง

จากรูปที่ 10 และ 11 จะเห็นลักษณะการเกิดผลึกของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ เชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 มีขนาดของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็ก และมีการกระจายตัวที่ดี ต่างจากสายพันธุ์ EW-S2 ที่มีขนาดใหญ่ และมีการเกาะกลุ่ม ทำให้มีปริมาณองค์ประกอบธาตุของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า ถึงแม้ว่าสายพันธุ์ LMG 22257 จะมีขนาดเล็กกว่า แต่การมีขนาดเล็กนั้นสามารถทำการซ่อมแซมรอยร้าวขนาดเล็กได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับทุกการทดสอบคือ เชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 สามารถซ่อมแซมรอยร้าวได้มีประสิทธิภาพมากกว่าสายพันธุ์ EW-S2 เสมอ

อย่างไรก็ตามผลการทดสอบชี้ให้เห็นแล้วว่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* ทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถผลิตธาตุประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meghna และคณะ [2] และงานวิจัยของพงศกร และคณะ [8]



10 การวิเคราะห์ SEM-EDS ของการซ่อมรอยร้าวด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257



11 การวิเคราะห์ SEM-EDS ของการซ่อมรอยร้าวด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ EW-S2

4. บทสรุป

งานวิจัยทำการศึกษาสมรรถนะการรักษารอยร้าวของคอนกรีตที่ใช้กระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตทางจุลชีววิทยา (MICP) ด้วยแบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ช่วงเวลาที่ดีที่สุดในการผลิตเอนไซม์ยูรีเอส และทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต คือ ชั่วโมงที่ 10-12

2) การซ่อมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 ใช้เวลาในการซ่อมแซมรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้สมบูรณ์ภายใน 21 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

3) การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเชื้อแบคทีเรียสามารถลดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้จริง ทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์เกิดขึ้นได้น้อยลง ส่งผลให้สามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตได้

4) การซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเชื้อแบคทีเรียสามารถลดการการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตถูกกัดกร่อนน้อยลง ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิมได้ และทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเกิดขึ้นน้อยลง

5) การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรีย สามารถซ่อมแซมคอนกรีตที่มีรอยร้าวให้มีความหนาแน่น และมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีรอยร้าวแต่ไม่ได้รับการซ่อมแซม

6) เชื้อแบคทีเรียสามารถผลิตธาตุประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าวได้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยนำร่องในการศึกษาศักยภาพของการใช้แบคทีเรียชนิด *Lysinibacillus sphaericus* สายพันธุ์ LMG 22257 และ EW-S2 เพื่อซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีต อย่างไรก็ตามถึงแม้สายพันธุ์ LMG 22257 จะได้เปรียบมากกว่าในหลายด้าน แต่สายพันธุ์ EW-S2 เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ท้องถิ่น หากทำการศึกษาเพิ่มเติม ใช้ตัวกระตุ้นที่เหมาะสม หรือปรับวิธีในการทดลอง อาจพัฒนาให้เชื้อแบคทีเรียชนิดนี้มีความสามารถในการรักษารอยร้าวของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสนับสนุนมูลฐาน (Fundamental Fund 2567 : โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0 และ Fundamental Fund 2568 : โครงการนวัตกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน)

[1] Guo, S. and Chidiac, S. (2019). Self-Healing concrete: A critical review. *CSCE Annual Conference*, Laval (Greater Montreal), 12-15 June 2016

[2] Meghna, S., Neelima, S. and Krishna, R. R. (2021). Rock-like behavior of biocemented sand treated under non-sterile environment and various treatment conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13, pp. 705-716

[3] Šovljanski, O., Tomić, A. and Markov, S. (2022). Relationship between Bacterial Contribution and Self-Healing Effect of Cement-Based Materials. *Microorganisms,* 10, pp. 7

[4] Zhu, X., Mignon, A., Nielsen, D. S., Zieger, E. S., Koren, K., Boon, N. and Belie, D. N. (2021). Viability determination of *Bacillus sphaericus* after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements. *Cement and Concrete Composites*, 119, pp. 104006

[5] Schlangen, E. and Sangadji, S. (2013). Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self-Healing Mechanisms - Recent Advances in Self-Healing Concrete and Asphalt. *Procedia Engineering*, 54, pp.39-57

[6] Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T. and Gholampour, A. (2022). A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. *Journal of Building Engineering,* 49, pp. 104038

[7] มุกอันดา สุวัณณะสังข์, พรเกษม จงประดิษฐ์, ชนา พุทธนานนท์, ธนเดช นันทนะวานิช และ ศักดิ์สิทธิ์ โชตนิธิสุวรรณ (2565). ศักยภาพการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตต่ออิฐและมอร์ตาร์โบราณด้วยจุลินทรีย์ *Bacillus sphaericus* ร่วมกับจุลินทรีย์ท้องถิ่น. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565

[8] พงศกร ศิริสิงห์อำไพ, พรเกษม จงประดิษฐ์, ดุจเดือน วราโห, พรีดา พรหมมีเนตร, สุภาภรณ์ ชีวะธนรักษ์ และ สุรพงษ์ รัตนกุล (2565). ผลกระทบของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการเกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565

[9] Algaifi, A. H., Bakar, A. S., Alyousef, R., Mohd Sam, R. A., Ibrahim, M.H., Shahidan, S., Ibrahim, M. and Salami, A. B. (2021). Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new B. pseudomycoides species. *Journal of materials research and technology*, 12, pp. 967-981

[10] British Standard European Norm (2019). BS EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, *British Standards Institution, London*

[11] Nordtest method, Approved. (1989). Concrete, repairing materials and protective coating: Embedded steel method, chloride permeability, NT BUILD 356, *NordTest, Espoo, Finland*

[12] ธีรเดช ทัพภะ, เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์, นันทวัฒน์ ขมหวาน, ชิษณุพงษ์ สุธัมมะ และ สุบรรณ สนิทอินทร์ (2566). การปรับปรุงคุณภาพวัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาเพื่อพัฒนาศักยภาพในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566

[13] American Society for Testing and Materials (2017). ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, *ASTM International, West Conshohocken.*

[14] Nasser, A. A., Sorour, M. N., Saafan, A. M. and Abbas, N. R. (2022). Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using *Bacillus pasteurii* and *Bacillus sphaericus*. *Heliyon*, 8, e09879

[15] Tayebani, B. and Mostofinejad, D. (2019). Penetrability, Corrosion Potential, and Electrical Resistivity of Bacterial Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, pp. 04019002-8