



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ประสิทธิภาพคอนกรีตซ่อมแซมตัวเองด้วยการใช้
สปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียม
คาร์บอเนต

โดย ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง
ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
และ รศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์

พฤษภาคม 2563

สัญญาเลขที่ RGU6280001

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ประสิทธิภาพคอนกรีตซ่อมแซมตัวเองด้วยการใช้
สปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียม
คาร์บอเนต

ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

และ รศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว.และต้นสังกัดไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract (บทคัดย่อ)

Project Code (รหัสโครงการ): RGU6280001

Project Title: Performance of self-healing concrete using bacterial spores of microbial induced calcium carbonate precipitation

(ชื่อโครงการ) ประสิทธิภาพคอนกรีตซ่อมแซมตัวเองด้วยการใช้สปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

Investigator: Prof. Suched Likitlersuang, Centre of Excellence in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

(ชื่อนักวิจัย) ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสัณฐานศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address: fceslk@eng.chula.ac.th

Project Period: 1 years

(ระยะเวลาโครงการ) 1 ปี (1 พ.ค. 2562 – 30 เม.ย. 2563)

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินคุณสมบัติของการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการใช้สปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต หรือวิธีเอ็มไอซีพี (Microbial induced carbonate precipitation; MICP) โดยใช้แบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สฟิรีคัส ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มที่สามารถตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เพราะเลี้ยงแบคทีเรียสายพันธุ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบสปอร์เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการผสมในคอนกรีตด้วยการห่อหุ้มสปอร์ด้วยโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) และผ่านเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying technique) จากผลการศึกษาพบว่า วิธีเอ็มไอซีพีสามารถซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 84.9 และยังสามารถทำให้กำลังอัดและความทนน้ำของตัวอย่างที่ซ่อมแซมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมที่จะเพิ่มระดับการผลิต (upscale) เพื่อจัดทำเป็นผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้งานจริงต่อไป

Keywords: จุลินทรีย์ที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต; คอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง; การซ่อมแซมรอยร้าว; การผลิตสารห่อหุ้มระดับไมโคร

(คำ ห ลัก): Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP); Self-healing concrete; Crack healing; Microencapsulation

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติเด่นคือ สามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ และหลังจากแปรสภาพเป็นของแข็งจะมีความแข็งแรงคงทน รองรับแรงอัดหรือน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต แต่เมื่อคอนกรีตผ่านการใช้งานไปสักระยะเวลาหนึ่ง มักเกิดรอยร้าวจากสาเหตุต่าง ๆ ซึ่งเป็นปัญหาหลักของโครงสร้าง ทั้งการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรง หรือความคงทนและอายุการใช้งานลดลง ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างได้ จึงต้องหาแนวทางแก้ไขเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวด้วยการซ่อมแซมรอยร้าว เพื่อรับขนาดของรอยร้าวไม่ให้ขยายตัว และทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตกลับมาใกล้เคียงดั้งเดิม แต่เนื่องด้วยการซ่อมแซมคอนกรีตในปัจจุบันมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ต้องอาศัยแรงงานคน สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย และบางกรณีอาจดำเนินการไม่สะดวก ดังนั้นการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตโดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation; MICP) จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา

จุลินทรีย์บางกลุ่มสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง (Basophilic microorganism) และสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอส (Ureolytic microorganism) จึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสะสมแร่ชีวภาพ (Biomineralisation) ด้วยการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งช่วยเชื่อมประสานอนุภาคขนาดเล็กได้ เรียกจุลินทรีย์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าวว่า MICP เช่น แบคทีเรียในกลุ่มของ *Bacillus* และ *Sporosarcina* การเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่เรียกว่า ยูรีโอไลซิส (Ureolysis) โดยเอนไซม์ยูรีเอส (Urease) จะช่วยเร่งการย่อยสลายยูเรียไปเป็นแอมโมเนียมและคาร์บอเนต เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกปลดปล่อยออกนอกเซลล์ จะทำให้สภาพแวดล้อมโดยรอบเซลล์ของจุลินทรีย์มีสภาพความเป็นด่างเหมาะแก่การจับตัวกันระหว่างแคลเซียมไอออนกับประจุลบบนผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ และการจับตัวของแคลเซียมไอออนกับคาร์บอเนต เกิดเป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตล้อมรอบเซลล์ จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาข้างต้น จึงได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการสะสมแร่ชีวภาพของจุลินทรีย์ที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในการซ่อมแซมหรือปรับปรุงวัสดุก่อสร้าง ดังนี้ 1) การเสริมความแข็งแรงของดินและโครงสร้างทางธรณีวิทยา โดยการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติในการรับกำลังได้มากขึ้น 2) การบูรณะสิ่งก่อสร้างทางประวัติศาสตร์ เนื่องจากร่องรอยการซ่อมแซมด้วยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความสวยงาม และ 3) การปรับปรุงหรือซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต เช่น ปรับปรุงกำลังรับแรงอัด เพิ่มความแข็งแรงคงทน ลดการซึมผ่านของน้ำ และการซ่อมแซมรอยแตก เป็นต้น

ที่ผ่านมา ทีมงานนักวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เริ่มศึกษา ประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ด้วย แบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สเฟียริกัส แอลเอ็มจี 22257 (กานต์ จันทรประสิทธิ์, 2561) [1] จากนั้นยัง ได้เริ่มเพาะเลี้ยงแบคทีเรียสายพันธุ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบสปอร์ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการผสม ในคอนกรีตด้วยการห่อหุ้มสปอร์ด้วยโซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate) และผ่านเทคนิคการทำ แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying technique) (จิรภา อินทรสุนทร, 2561) [2] ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จะเป็นการต่อยอดจากองค์ความรู้พื้นฐานของผู้เสนอโครงการ โดยงานวิจัยนี้จะเป็น การประยุกต์ใช้แบคทีเรียกลุ่ม MICP ในการซ่อมแซมรอยแตกของโครงสร้างคอนกรีต และเป็นนำไปสู่ การพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ซึ่งจะช่วยลดการใช้สารเคมีที่ใช้ในการซ่อมแซม รอยร้าวและยังเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดองค์ความรู้เดิมสู่การใช้ประโยชน์ด้านพาณิชย์ โดยจะสร้างผลงานวิจัยให้เป็น นวัตกรรม และ/หรือ ผลิตภัณฑ์ใหม่ ไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยจะร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีกับโครงสร้างคอนกรีต
2. ออกแบบผลิตภัณฑ์และวิธีการใช้งานให้เหมาะสมในเชิงพาณิชย์
3. เสนอแนวทางการร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อผลักดันให้เป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนหลักตามเนื้อหา ได้แก่ ส่วนการสำรวจประสิทธิภาพ การซ่อมแซมรอยร้าวในมอร์ตาร์ (หัวข้อ 3.1) และ การประเมินการใช้เทคนิคการห่อหุ้มสำหรับสปอร์ แบคทีเรีย (หัวข้อ 3.2) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การสำรวจประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวในมอร์ตาร์ด้วยวิธีแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการ ตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

3.1.1 การเตรียมเชื้อแบคทีเรียและอาหารเลี้ยงเชื้อ

แบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ บาซิลลัส สเฟียริกัส (*Bacillus sphaericus*) โดยเพาะเลี้ยงหัวเชื้อ แบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว (Medium broth) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อเพื่อ ลดการปนเปื้อนด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส แรงดัน ไอน้ำ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งในอาหารเลี้ยงเชื้อ 100 มิลลิลิตร ประกอบไปด้วย ยูเรีย

ปริมาณ 1 กรัม โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ปริมาณ 0.212 กรัม และ Nutrient broth ปริมาณ 0.3 กรัม ถ่ายเชื้อแบคทีเรียลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ (Aseptic technique) จากนั้นนำหัวเชื้อไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 – 48 ชั่วโมง ทำการคัดแยกเซลล์แบคทีเรียโดยการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 8,000 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แยกสารละลายส่วนใสทิ้งไป และนำตะกอนเปียกของเซลล์แบคทีเรียไปใช้งาน

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Urea – CaCl_2 broth แยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สารละลายยูเรีย และอาหารเลี้ยงเชื้อผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ สารละลายยูเรียประกอบด้วยยูเรีย 5.625 กรัม ในน้ำกลั่น 375 มิลลิลิตร ขณะที่อาหารเลี้ยงเชื้อผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ประกอบด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 41.625 กรัม ในน้ำกลั่น 375 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านปรับค่าความเป็นกรดต่างโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ให้มีพีเอชเท่ากับ 8 และ Nutrient broth 2.7 กรัม ต่อมานำเชื้อจุลินทรีย์ที่เตรียมได้ผสมลงในสารละลายข้างต้น เพื่อให้ได้เป็นสารละลายแบคทีเรีย (Bacterium solution) สำหรับการหยอดลงบนรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สารละลายที่ผสมเชื้อแบคทีเรียและสารละลายยูเรีย

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการทดสอบ

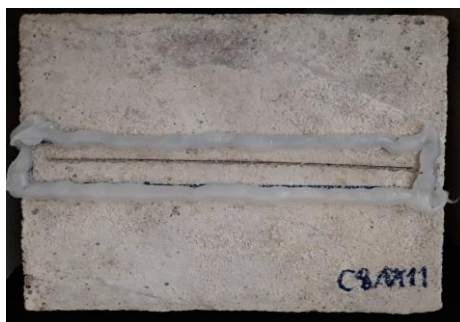
งานวิจัยได้นำแบ่งตัวอย่างมอร์ตารออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งประกอบไปด้วย

- (1) กลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว (Series I)
- (2) กลุ่มตัวอย่างที่มีรอยร้าว (Series II)
- (3) กลุ่มตัวอย่างที่เตรียมรอยร้าวสำหรับการซ่อมแซม (Series III)

- ตัวอย่างมีมอร์ตาร์ขนาด 150x150x150 มิลลิเมตร โดยทำการหล่อตัวอย่างโดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำต่อทรายเท่ากับ 1:0.5:3 ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างเป็นเวลา 1 วันจึงถอดแบบและนำตัวอย่างที่ได้ไปบ่มในน้ำสะอาดเป็นเวลา 28 วัน
- การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างทำโดยการใช้แผ่นทองแดงขนาดยาว 120 มิลลิเมตร หนา 0.4 มิลลิเมตร โดยทำการเสียบแผ่นทองแดงลงไปลึก 20 มิลลิเมตร ขณะที่คอนกรีตสดยังอยู่ในแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงจึงทำการถอดแผ่นทองแดงออก จากนั้นเมื่อทำการบ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการฉีดยาซิลิโคนเป็นแนวล้อมรอบบริเวณแนวรอยร้าว เพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อแบคทีเรียไหลออกทางด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- การซ่อมแซมทำโดยการหยอดสารละลายแบคทีเรีย ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และสารละลายยูเรีย 6.25 มิลลิลิตรต่อวัน จากนั้นติดตามการซ่อมแซมตัวเองของชิ้นตัวอย่างในแต่ละวัน



รูปที่ 3.2 การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 รูปแบบรอยร้าวบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ

3.1.3 การประเมินผลการซ่อมแซม

ตารางที่ 3.1 แสดงวิธีการประเมินผลการซ่อมแซม ซึ่งประกอบด้วย

- (1) การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรอยแตกร้าวที่บริเวณผิว (Crack observation)

(2) การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ตลอดจนวิเคราะห์ธาตุด้วย x-ray diffraction (EDS) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบการเกิดของแคลเซียมคาร์บอเนต

(3) การประเมินผลการซ่อมแซมภายในโดยใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV)

(4) การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

(5) การดูดซึมน้ำ (Sorptivity)

(6) การทดสอบหาระยะการซึมผ่าน (Water Permeability Test)

ตารางที่ 3.1 วิธีการประเมินผลการซ่อมแซม

Testing	Specifications	Specimens	Number of sample		
			Series I	Series II	Series III
Crack observation	-	15 cm cube	-	-	9
SEM with EDS	-	Fracture surface	-	-	Yes
UPV	ASTM C597 (2016)	15 cm cube	3	3	9
Compressive strength	BS EN 12390-3:2009 (2009)	15 cm cube	10	3	6
Sorptivity	ASTM C1585 (2013)	15 cm cube	3	3	3
Water permeability	DIN 1048 part 5 (1991)	15 cm cube	2	2	3

เอกสารอ้างอิง:

ASTM C1585-13. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM C597-16. Standard test method for pulse velocity through concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2016.

BS EN 12390-3:2009. Testing hardened concrete — part 3: compressive strength of test specimens, British Standards Institution, UK, 2009.

DIN 1048, 1991, Testing Concrete: Testing of hardened concrete (Specimens prepared in mould), Beton und Stahlbeton 1, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton of the Normnausschuß Bauwesen, UDC.

3.2 การประเมินการใช้เทคนิคการห่อหุ้มสำหรับสปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับการใช้กับคอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง

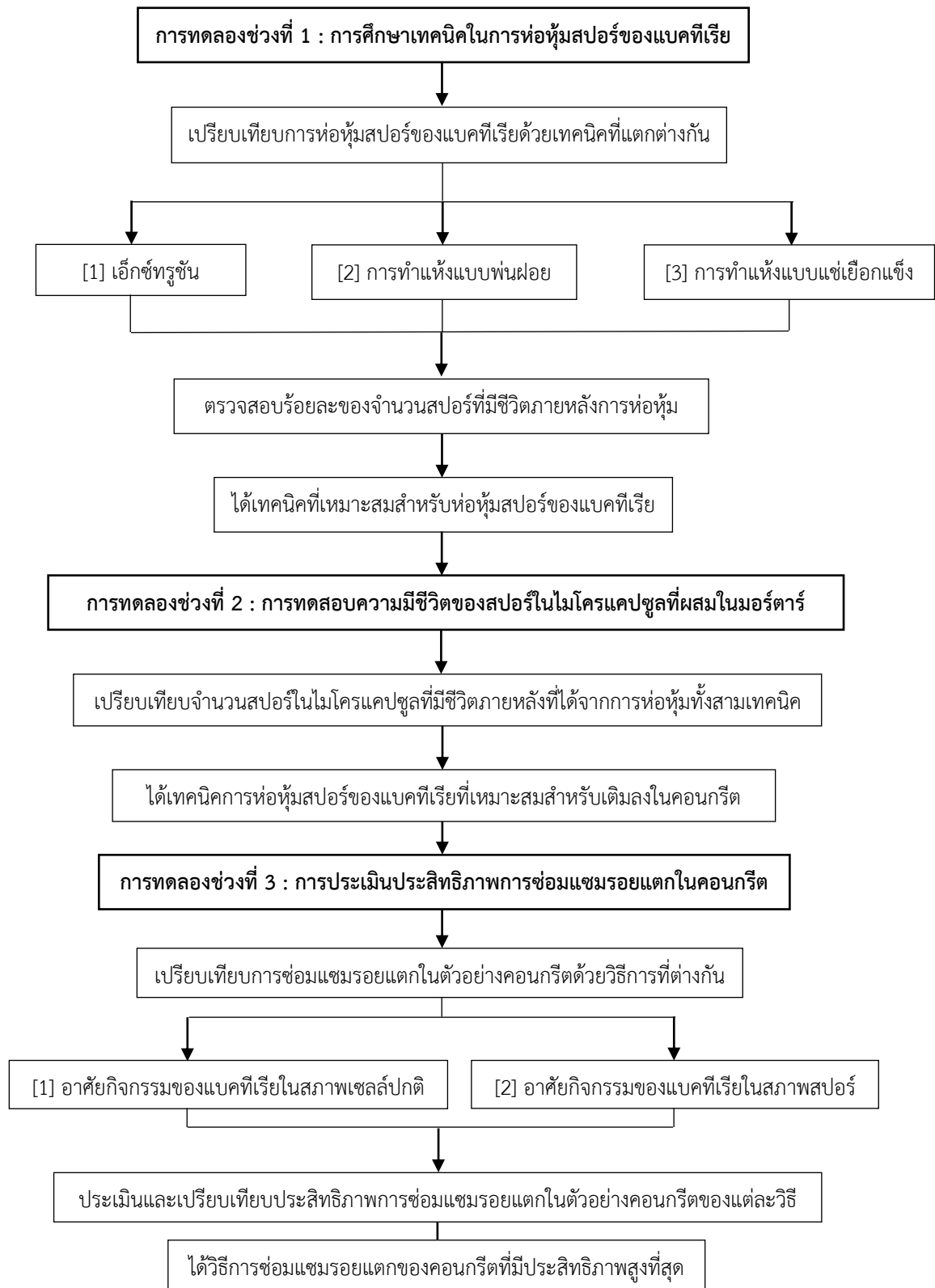
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง

3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาเทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรีย

เปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการห่อหุ้มสปอร์ของ *Bacillus sphaericus* LMG 22257 โดยศึกษากระบวนการห่อหุ้ม 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคอิเล็กโทรซัน เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย และเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อศึกษาลักษณะของไมโครแคปซูลและติดตามการรอดชีวิตของแบคทีเรียภายหลังการห่อหุ้มด้วยโซเดียมอัลจิเนต โดยตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการนับจำนวนแบคทีเรียที่มีชีวิตด้วยวิธี Standard plate count เพื่อคำนวณหาร้อยละของจำนวนสปอร์ที่มีชีวิตหลังผ่านการห่อหุ้มจากค่า Encapsulation yield ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้จะทำให้ทราบเทคนิคที่เหมาะสมในการห่อหุ้มสปอร์

3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2 การทดสอบความมีชีวิตของสปอร์ในไมโครแคปซูลที่ผสมในมอร์ตาร์

ศึกษาความมีชีวิตของสปอร์แบคทีเรียในไมโครแคปซูลภายหลังผสมลงในมอร์ตาร์ โดยวิธีการทางอ้อมด้วยการตรวจสอบปริมาณยูเรียที่ถูกย่อยสลายจากปฏิกิริยายูรีโอไลซิส ทั้งนี้ปริมาณยูเรียดังกล่าว บ่งบอกว่าภายในสปอร์ของแบคทีเรียยังคงเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) โดยทดสอบกับสปอร์ที่ผ่านการห่อหุ้มด้วยการห่อหุ้มทั้งสามเทคนิค ได้แก่ อิเล็กโทรซัน การทำแห้งแบบพ่นฝอย และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้จากแต่ละเทคนิคในการปกป้องสปอร์ในระหว่างกระบวนการผสมและแข็งตัวของคอนกรีต และการทนทานของสปอร์ต่อสภาพแวดล้อมภายในคอนกรีตที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ผลการทดลองที่ได้นี้จะเป็แนวทางในการเลือกเทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรียเพื่อรักษาความมีชีวิต เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการซ่อมแซมตัวเองของรอยแตกในโครงสร้างคอนกรีต



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปภาพรวมการดำเนินงานของงานวิจัย

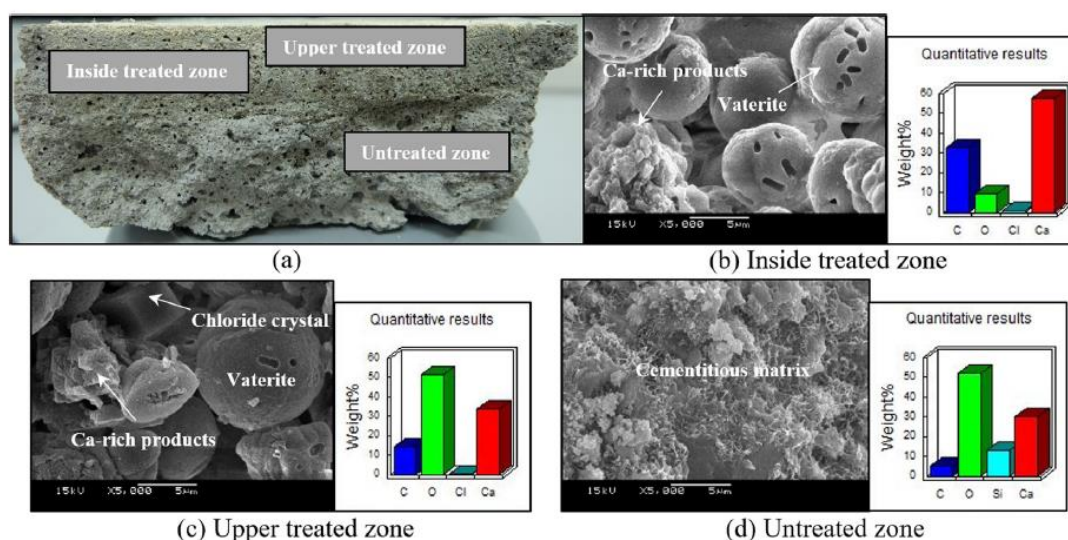
3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกในคอนกรีต

ศึกษาวิธีการซ่อมแซมตัวเองของรอยแตกในโครงสร้างคอนกรีตด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยแบ่งวิธีการซ่อมแซมรอยแตกเป็น 2 วิธี ดังนี้ 1) อาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในสภาพเซลล์ปกติ และ 2) อาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในสภาพสปอร์ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการซ่อมแซมรอยแตกในคอนกรีตด้วยวิธีการที่แตกต่างกันและประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกของแต่ละวิธีโดยการวัดขนาดของรอยแตกทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม และคำนวณหาร้อยละของขนาดรอยแตกที่ซ่อมแซมได้จากค่า Healing ratio พร้อมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดจากการซ่อมแซมที่ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะเป็แนวทางในการเลือกวิธีการซ่อมแซมตัวเองของรอยแตกในโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม

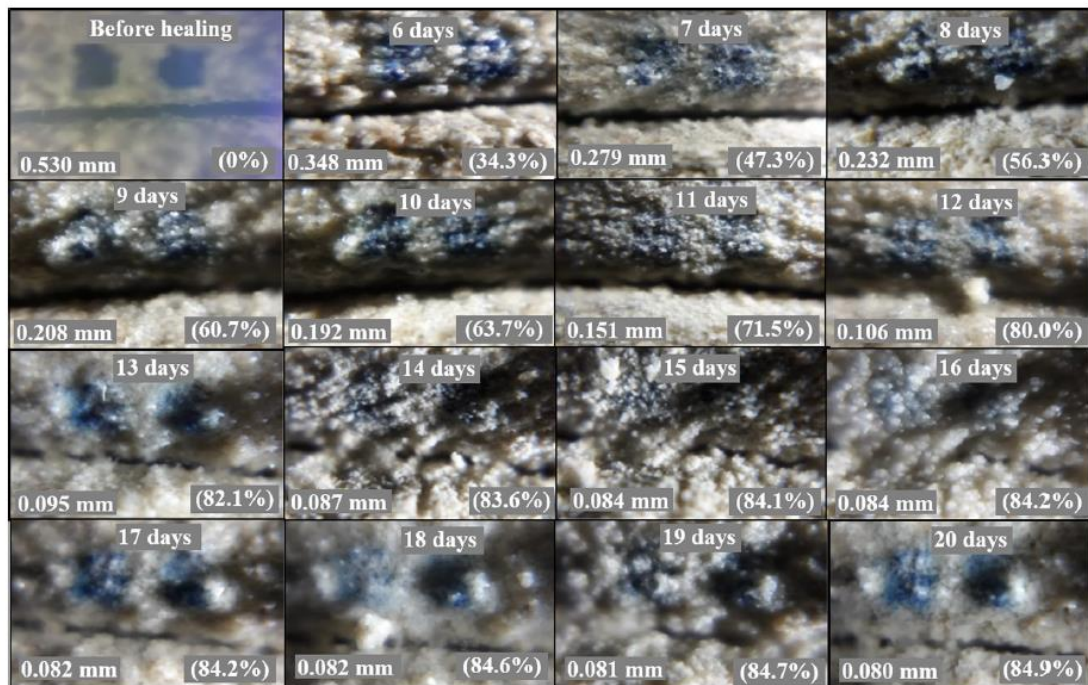
4. ผลงานวิจัย

4.1 การสำรวจประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวในมอร์ตาร์ด้วยวิธีแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

งานวิจัยนำเสนอวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีตด้วยสารละลายแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (MICP) การศึกษาเลือกใช้ตัวอย่างคอนกรีตมอร์ตาร์ที่สร้างรอยร้าวไว้ล่วงหน้า และทำการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการหยดสารละลายแบคทีเรียบริเวณรอยร้าวทุกวัน การประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมกระทำทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การทดสอบกำลังอัด การสังเกตโครงสร้างจุลภาค การทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก และการทดสอบดูดซับน้ำ ผลการศึกษาพบว่ารอยร้าวสามารถถูกพอกด้วยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่สร้างจากกิจกรรมของแบคทีเรีย ส่งผลให้ตัวอย่างที่ซ่อมแซมแล้วมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและมีความทึบน้ำสูงขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการซ่อมแซม



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) ของมอร์ตาร์เปรียบเทียบในบริเวณที่มีการปรับปรุงและไม่ปรับปรุง



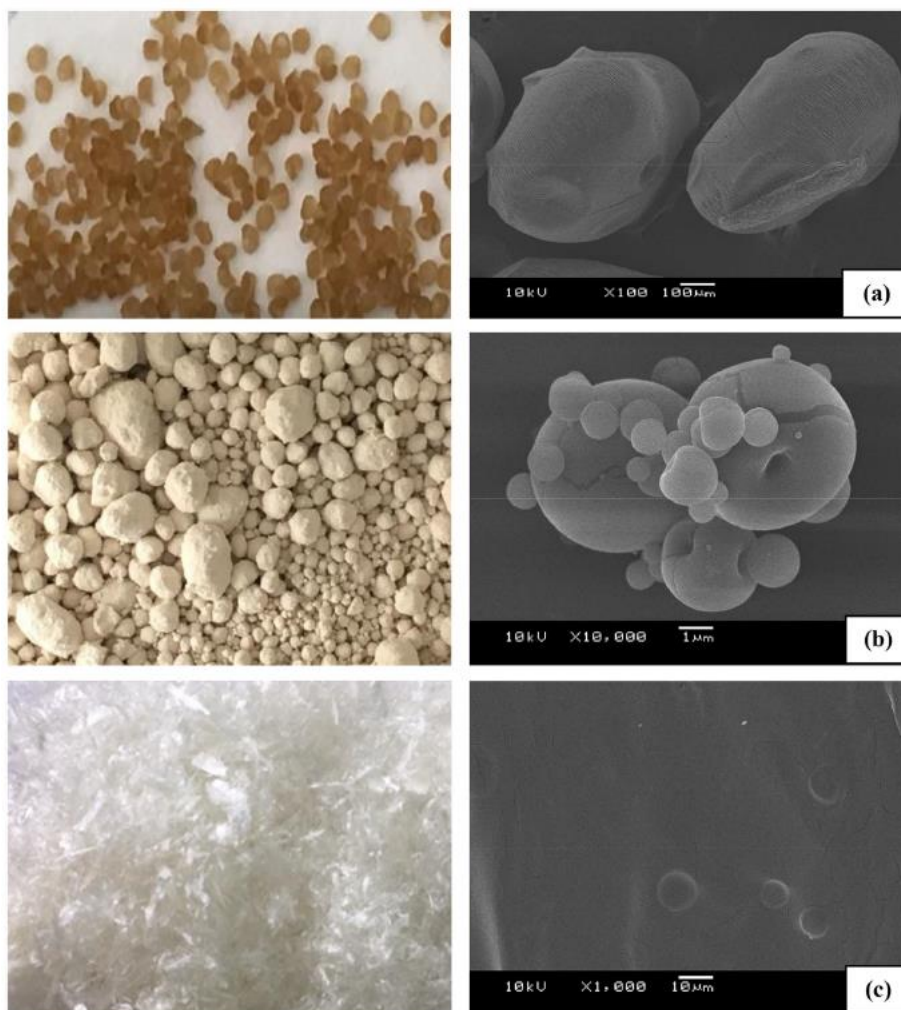
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายบริเวณรอยร้าวของมอร์ตาร์ที่มีการซ่อมแซมด้วยตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตในแต่ละวัน

เอกสารอ้างอิง: Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W. and Likitlersuang S. (2019) “Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method” Construction and Building Materials Vol. 212, 10 July 2019, pp. 737-744 doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035

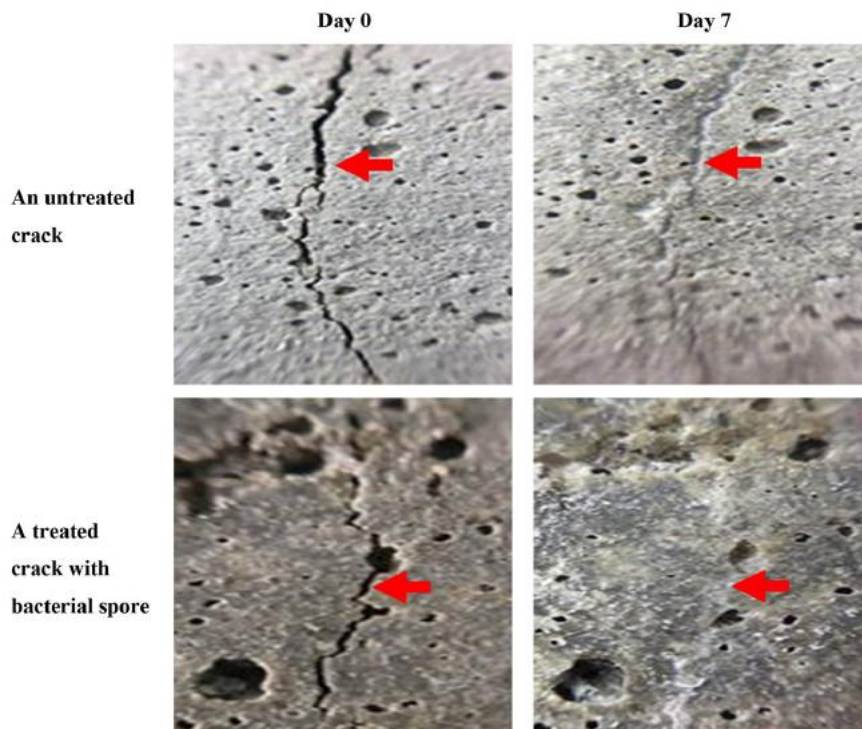
4.2 การประเมินการใช้เทคนิคการห่อหุ้มสำหรับสปอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับการใช้กับคอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง

รอยร้าวในคอนกรีตควรจะต้องถูกซ่อมแซมอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้าง และเพื่อยืดอายุโครงสร้างของอาคารหรือสิ่งก่อสร้างประเภทอื่น ๆ คอนกรีตที่ซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีทางเลือกล่าสุด โดยเกี่ยวข้องกับการใช้ปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ชนิดแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต การศึกษาจะเลือกใช้เทคโนโลยีห่อหุ้มที่เหมาะสมสำหรับการผลิตสปอร์แบคทีเรียบาซิลลัสสเฟียริกัส (*Bacillus sphaericus*) สายพันธุ์ LMG 22257 ด้วยโซเดียมแอลจิเนต เพื่อป้องกันสปอร์แบคทีเรียขณะทำการผสมและแข็งตัวของคอนกรีต โดยเทคโนโลยีที่เป็นไปได้ในการผลิตสปอร์ด้วยโซเดียมแอลจิเนตที่เลือกใช้ 3 ชนิดคือ เทคนิคอิเล็กโทรซัน เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย และเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ผลการศึกษาพบว่าวิธีการแช่แข็งอบแห้งจะให้อัตราการมีชีวิตของแบคทีเรียสูงสุดถึงร้อยละ 100 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพ่นแห้งและวิธีอัดขึ้นรูปที่มีอัตราการมีชีวิตของแบคทีเรียอยู่ที่ร้อยละ 93.8 และ 79.9 ตามลำดับ นอกเหนือจากนั้นการศึกษาได้ดำเนินการวิเคราะห์การย่อยสลายยูเรียเพื่อที่จะ

ยืนยันผลการทำางานสพอร์แบคทีเรียหลังจากการผสมกับคอนกรีต ซึ่งผลยืนยันว่าสพอร์แบคทีเรียที่ห่อหุ้มด้วยวิธีการทำาแห้งแบบพ่นฝอยมีระดับการย่อยสลายยูเรียสูงที่สุด นั้นหมายความว่าสพอร์แบคทีเรียยังคงความมีชีวิตสูง ดังจะเห็นได้จากกิจกรรมการเผาผลาญพลังงานและปฏิกิริยาชีวเคมีของเซลล์ ดังนั้นการตรวจสอบด้วยวิธีนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าศักยภาพในการห่อหุ้มสพอร์แบคทีเรียด้วยวิธีการทำาแห้งแบบแช่เยือกแข็งเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ ส่วนผลการสังเกตการซ่อมรอยร้าวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยไมโครแคปซูลสพอร์จากการทำาแห้งแบบแช่เยือกแข็งแสดงอัตราส่วนการซ่อมแซมที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมด้วยสพอร์แบคทีเรีย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการทำาแห้งแบบแช่เยือกแข็งน่าจะเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงในการห่อหุ้มสพอร์แบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับคอนกรีตที่ซ่อมแซมตัวเองได้



รูปที่ 4.3 รูปร่างสพอร์แบคทีเรียที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี 3 ชนิดคือ (a) การอัดขึ้นรูป (extrusion); (b) การพ่นแห้ง (spray drying) และ (c) การแช่แข็งอบแห้ง (freeze drying)



รูปที่ 4.4 การซ่อมรอยร้าวของตัวอย่างmortarที่ผสมด้วยสปอร์แบคทีเรียแบบแช่แข็งอบแห้ง

นอกจากนี้ผลการสังเกตการซ่อมรอยร้าวของตัวอย่างmortarที่ผสมด้วยสปอร์แบคทีเรียที่ผ่านการห่อหุ้มด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งชี้ให้เห็นว่า มีอัตราส่วนการซ่อมแซมที่ 7 วันสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมด้วยสปอร์แบคทีเรีย ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารอ้างอิง: Pungrasmi W., Intarasoontron, J., Jongvivatsakul, P. and Likitlersuang S. (2019) “Evaluation of Microencapsulation Techniques for MICP Bacterial Spores Applied in Self-Healing Concrete” Scientific Reports Vol. 9, 28 August 2019, Article No. 12484 doi:10.1038/s41598-019-49002-6

5. กิจกรรมภายใต้โครงการ



เมื่อวันที่ 14-17 ต.ค. 2562 ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง หัวหน้าศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสัณฐาน และนางสาวสร้อยสน อาภาจิรกุล นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เดินทางไปเข้าร่วมการประชุมปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมธรณีเทคนิคภูมิภาคเอเชียครั้งที่ 16 (The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) ที่ เมืองไทเป ไต้หวัน โดยได้นำเสนอบทความวิชาการจำนวน 3 บทความคือ

1. Influence of the spatial variability of hydraulic parameters on rainfall-induced landslides by Thanh Son Nguyen and S. Likitlersuang
2. Treatment conditions used in microbial induced calcite precipitation for sandy soil improvement by Soyson Arpajirakul, S. Likitlersuang and W. Pungrasmi
3. Engineering properties of controlled low-strength material (CLSM) as an alternative fill material by Thanakorn Chompoorat, S. Likitlersuang, and P. Jongvivatsakul

และ ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง ได้ทำหน้าที่เป็นประธานช่วงการประชุม (Session Chair) พร้อมกันนี้ยังได้แลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์วิจัยกับนักวิจัยชาวต่างชาติเป็นจำนวนมาก



ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง หัวหน้าศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสัณฐาน ได้รับเชิญไปเป็นวิทยากรบรรยาย (Invited speaker) ในหัวข้อการประยุกต์กระบวนการแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลไซต์ในงานวัสดุก่อสร้าง (Applications of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation in Construction and Building Materials) ในงานประชุมนานาชาติของสมาคมวิจัยวัสดุแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 (The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference, MRS-Thailand 2019) ที่จัดขึ้นระหว่างวันที่ 10-12 ก.ค. 2562 ที่โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา

6. บทสรุป

สามารถสรุปผลการวิจัยจากโครงการนี้ ได้ดังนี้

1. แบคทีเรียบาซิลลัสสเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) LMG 22257 สามารถซ่อมแซมรอยร้าวของมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 84.9 โดยการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพียังสามารถทำให้กำลังอัดและมีความทึบน้ำของตัวอย่างที่ซ่อมแซมเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่างก่อนการซ่อมแซม
2. การปกป้องสปอร์ก่อนเติมลงในมอร์ตาร์โดยการห่อหุ้มด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพในการปกป้องสปอร์สูงสุด ดังจะเห็นได้จากอัตราการรอดชีวิตและความมีชีวิตของสปอร์ที่สูงกว่าเทคนิคเอ็กซ์ทูรชันและการทำแห้งแบบพ่นฝอย
3. การซ่อมแซมตัวเองของรอยแตกในคอนกรีตโดยกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี สามารถชะลอการขยายตัวของรอยแตกและประสานรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดภายหลังที่เกิดรอยแตกร้าวให้กลับมาใกล้เคียงก่อนเสียหายได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเทคโนโลยีคอนกรีต

ผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพีสำหรับวัสดุคอนกรีต โดยผลลัพธ์จากโครงการนี้สามารถเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และได้ดำเนินการยื่นจดสิทธิบัตรเรียบร้อยแล้ว โดยต้องมีการเพิ่มระดับการผลิต (upscale) เพื่อจัดทำเป็นผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้งานจริงต่อไป

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และ หน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 - 1.1 ชื่อเรื่อง Evaluation of Microencapsulation Techniques for MICP Bacterial Spores Applied in Self-Healing Concrete
วารสาร Scientific Reports
สถานะ published ปี 2019 ฉบับ 9, 28 August 2019 บทความเลขที่ 12484
Pungrasmi W., Intarasoontron, J., Jongvivatsakul, P. and Likitlersuang S. (2019)
“Evaluation of Microencapsulation Techniques for MICP Bacterial Spores Applied in Self-Healing Concrete” Scientific Reports Vol. 9, 28 August 2019, Article No. 12484 doi:10.1038/s41598-019-49002-6 (IF2018=4.011)
 - 1.2 ชื่อเรื่อง Effect of hybrid polypropylene-steel fibres on strength characteristics of UHPFRC
วารสาร Advances in Concrete Construction
สถานะ Under review
 - 1.3 ชื่อเรื่อง Efficiency of Microbially-Induced Calcite Precipitation in Natural Clays
วารสาร Engineering Geology
สถานะ Under review
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - 2.1 เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป): มีการพูดคุยความเป็นไปได้ในการร่วมมือกับบริษัทเอกชนเพื่อนำไปผลิตในเชิงพาณิชย์
 - 2.2 เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับ หรือวิธีทำงาน): ไม่มี
 - 2.3 เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง): ไม่มี
 - 2.4 เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่): มีการนำเอาองค์ความรู้ไปใช้ในการเรียนการสอนระดับชั้นปริญญาตรี และเป็นหัวข้องานวิจัยที่เป็นส่วนหนึ่งของหัวข้อวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษาคือ
 - นายกานต์ จันทรประสิทธิ์ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ หัวข้อวิทยานิพนธ์ "การประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวคอนกรีตโดยวิธีการ

ตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์” จบการศึกษาวិชาการศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2560

- นางสาวจิรา อินทรสุนทร นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้วข้อวิทยานิพนธ์ “การประเมินประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองในคอนกรีตด้วยสปอร์ของแบคทีเรียที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต” จบการศึกษาวิชาการศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2560
- นางสาวสร้อยสน อาภาจิรกุล นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้วข้อวิทยานิพนธ์ “ประสิทธิภาพการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว” จบการศึกษาวิชาการศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2561
- นางสาววนาลี ภาณุประพงค์ นิสิตปริญญาโท ห้วข้อวิทยานิพนธ์ “ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเองโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียประเภทชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต” กำลังศึกษา

3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ:

ระดับชาติ

วนาลี ภาณุประพงค์, ภัม เหนือคลอง, พิชชา จงวิวัฒน์สกุล, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์ และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2563) “ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเองโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียชนิดชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 25, วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563.

ระดับนานาชาติ

Arpajirakul, S., Likitlersuang, S. and Pungrasmi, W. (2019) “Treatment conditions used in microbial induced calcite precipitation for sandy soil improvement” the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16 ARC), October 14 – 18, 2019, Taipei Int. Convention Center, Taiwan.

การจดสิทธิบัตร:

- ยื่นจดอนุสิทธิบัตร “สปอร์ของแบคทีเรียที่ห่อหุ้มด้วยสารประกอบอัลจิเนตในรูปไมโครแคปซูลเพื่อใช้ในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต และกระบวนการเตรียม” เลขที่คำขอ 1903002349 เมื่อวันที่ 12 ก.ย. 2562
- ยื่นจดอนุสิทธิบัตร “กรรมวิธีปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยใช้แบคทีเรีย” เลขที่คำขอ 1903000548 เมื่อวันที่ 1 มี.ค. 2562