

การประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวคอนกรีตโดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียม
คาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF MICROBIALLY INDUCED CALCIUM
CARBONATE PRECIPITATION PERFORMANCE FOR CONCRETE CRACK REPAIR



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าว
คอนกรีตโดยวิธีการตักตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย
จุลินทรีย์

โดย

นายกานต์ จันทร์ประสิทธิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรวิทย์ ลีละวัฒน์)

กานต์ จันทรประสิทธิ์ : การประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวคอนกรีตโดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ (EVALUATION OF MICROBIALLY INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION PERFORMANCE FOR CONCRETE CRACK REPAIR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินคุณสมบัติของการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีการชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์ หรือวิธีเอ็มไอซีพี (Microbially induced calcium carbonate precipitation; MICP) โดยใช้แบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สปีริคัส สายพันธุ์ ATCC22257 ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มที่สามารถตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ การเตรียมสารเคมีทำโดยการแยกสารละลายออกเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วย ยูเรีย และสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเชื้อจุลินทรีย์ แคลเซียมคลอไรด์ และสารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรีย ในการซ่อมแซมคอนกรีตนั้นจะทำการหยอดสารเคมีทุก 24 ชม. เป็นเวลา 20 วัน ในการศึกษาจะเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 15 ลบ.ซม. โดยตัวอย่างที่มีรอยร้าวจะเตรียมโดยใช้แผ่นทองแดงความหนา 0.4 มม. ใส่ไว้ที่ความลึก 2 ซม. ระหว่างการหล่อก้อนตัวอย่าง ทำการประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมด้วย 1) การวัดขนาดของรอยร้าวโดยใช้เลนส์ขยายขนาด 40 เท่าด้วยกล้องถ่ายภาพโทรศัพท์มือถือ 2) การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด 3) การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ และ 4) การวัดคลื่นความถี่อัลตราโซนิก โดยเปรียบเทียบผลการประเมินระหว่างตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่มีรอยร้าว และตัวอย่างที่ซ่อมแซม ผลการทดลองพบว่าขนาดของรอยร้าวลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากทำการซ่อมแซมไปทั้งสิ้น 6 วัน และการเปลี่ยนแปลงขนาดรอยร้าวเริ่มคงที่เมื่อผ่านไป 12 วัน โดยหลังทำการซ่อมแซมทั้งสิ้น 20 วัน พบว่าสามารถลดขนาดรอยร้าวได้ถึงร้อยละ 84.87 ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าความเร็วคลื่นความถี่อัลตราโซนิกที่ส่งผ่านตัวอย่าง โดยความเร็วคลื่นความถี่หลังผ่านการซ่อมแซมมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 82.06 อีกทั้งหลังการซ่อมแซมพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นกว่าตัวอย่างแบบมีรอยร้าวร้อยละ 27 และคิดเป็นร้อยละ 89.4 จากตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว นอกจากนี้หลังการซ่อมแซมยังพบว่าระยะการซึมของน้ำลดลงจากตัวอย่างที่มีรอยร้าวร้อยละ 27.21 และมากกว่าตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวร้อยละ 108.86 จึงสรุปได้ว่าการซ่อมแซมโดยวิธีชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์นั้นสามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวได้

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970109521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: SELF HEALING CONCRETE / BIOCONCRETE / CRACK REPAIR / MICP

KARN JANPRASIT: EVALUATION OF MICROBIALLY INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION PERFORMANCE FOR CONCRETE CRACK REPAIR.
ADVISOR: ASST. PROF. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, Ph.D., 88 pp.

This research aims to evaluate performance of the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method on concrete crack repairing. *Bacillus sphaericus* (ATCC22257) which can produce calcium carbonate or calcite is used in this study. In this method, chemical solutions consist of bacteria solution (Bacteria, Calcium chloride and Nutrient broth) and Urea are applied on cracked mortar specimens every 24 hrs for 20 days. 15 cm cubic mortar specimens are prepared, in which a 0.4 mm thick copper plate is placed at 2 cm depth for preparing cracked specimens. The tests including 1) visual inspection via 40x zoom smart lens, 2) compressive strength test, 3) ultrasonic pulse velocity (UPV) test, and 4) permeability test are used to evaluate the performance of MICP on crack repairing. All tests are performed with at least 3 replications for control specimens, cracked specimens and treated specimens. The results show that crack width decreased rapidly after 6 days and it was almost constant after 12 days. After 20 days, the crack area are healed by 84.87% and ultrasonic pulse velocity increased by 82.06 %. The compressive strength of treated specimens increased by 27% from cracked specimens and recovered to 89% of those of cracked specimens and control specimens, respectively. In addition, the depth of penetration of treated specimens reduced by 27.21% from cracked specimens and was 108.86% of control specimens. According to the results, it can be concluded that MICP method can be used as alternative technique for crack repair.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล และศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง ที่ได้คอยให้คำปรึกษา ทั้งความรู้และคำแนะนำในการทำวิจัยต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนั้นยังขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณนายวิศิษฐ์ ศิริโสม ที่คอยช่วยเหลือตัวอย่างในการทดสอบ นายอดิศร ชวนปี สำหรับการดูแลเรื่องเครื่องมือ สำหรับการทดสอบต่างๆ และบิดา มารดา ของข้าพเจ้า นายจักรกฤษณ์ จันทร์ประสิทธิ์ และนางสาวกัญญา จันทร์แรม ที่คอยสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง ‘.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
2.1.2 หลักการชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอนเนตของแบคทีเรีย.....	5
2.1.3 กลไกการทำงานของแบคทีเรียและหลักการซ่อมแซมทางชีวภาพของคอนกรีต.....	8
2.1.4 ความสามารถในการรักษารอยร้าวของคอนกรีตโดยการใช้แบคทีเรีย.....	8
2.1.5 คุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต.....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.2.1 การซ่อมแซมและการฟื้นฟูประสิทธิภาพของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	23
2.2.2 การฟื้นฟูคอนกรีตโดยใช้อินนุภาคจุลินทรีย์.....	25
2.2.3 การประเมินสาเหตุและการซ่อมแซมรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต.....	26

2.2.4 การซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีตด้วยวิธีทางชีวภาพที่แตกต่างกัน	27
2.2.5 การจำแนกขนาดรอยร้าว	29
2.2.6 การประเมินผลการซ่อมแซมโดยใช้การทดสอบการซึมน้ำ.....	30
2.2.6 การซ่อมแซมโดยการรักษาจากภายนอก	34
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	36
3.1 บทนำ	36
3.2 การทดสอบ	36
3.2.1 การประเมินผลด้วยสายตา	36
3.2.2 การทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก	38
3.2.3 การประเมินผลโดยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก	40
3.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	40
3.2.5 การทดสอบความสามารถในการซึมน้ำ.....	44
3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการทดสอบ	46
3.3.1 การเตรียมเชื้อแบคทีเรียที่ใช้สำหรับการทดสอบประสานรอยแตกร้าว	50
3.4 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	60
3.5 การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	61
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปราย	62
4.1 ผลการวิเคราะห์การซ่อมแซมรอยร้าว	62
4.1.1 การประเมินผลการซ่อมแซมภายนอก	62
4.1.2 ผลการประเมินการซ่อมแซมรอยร้าวภายในด้วยการใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก.....	67
4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก	69
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด	71
4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว	71

4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแบบมีรอยร้าว	72
4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากผ่านการซ่อมแซมโดยวิธีเอ็มไอซีพี.....	73
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ.....	75
4.4.1 ผลการทดสอบการหาความลึกในการซึมผ่านของน้ำ.....	75
4.4.2 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ.....	77
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	79
4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM).....	79
4.5.2 การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	81
4.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย	83
บทที่ 5 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	88

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 สปอร์ของแบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สฟิเรคัส (Bacillus sphaericus).....	5
รูปที่ 2.2 โมเดลจำลองกระบวนการย่อยสลายยูเรียของจุลินทรีย์กลุ่ม MICP.....	7
รูปที่ 2.3 ร้อยละการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการซ่อมแซมรอยร้าวภายใน 4 สัปดาห์.....	10
รูปที่ 2.5 การดูดซับน้ำของตัวอย่างที่เวลา และภายใต้เงื่อนไขต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของคลื่นอัลตราโซนิกก่อนและหลังการซ่อมแซมด้วยวิธีต่าง ๆ (A) ที่ ความลึก 10 มม. และ (B) ที่ความลึก 20 มม.....	12
รูปที่ 2.7 การดูดซับน้ำที่ลดลงเนื่องจากการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้แบคทีเรีย.....	12
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของการซ่อมแซมผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ภายใต้เงื่อนไขการซ่อมแซมต่างๆ ...	13
รูปที่ 2.9 ผลการซ่อมแซมโดยวิธีตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และการแช่น้ำกลั่น โดยรูป.....	17
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยร้าวและปริมาณการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต.....	18
รูปที่ 2.11 อัตราการซ่อมแซมตัวอย่างที่ขนาดรอยร้าวต่างๆ.....	18
รูปที่ 2.12 อัตราการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการบ่มด้วยวิธีต่างๆ.....	19
รูปที่ 2.13 อัตราการซ่อมแซมรอยร้าวที่อายุของรอยร้าวต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.14 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน ภายใต้เงื่อนไขการซ่อมแซมต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.15 การอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียเนื่องจากผลของระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต.....	22
รูปที่ 2.16 การพัฒนากำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตปกติที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์.....	22
รูปที่ 2.17 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากแบคทีเรีย.....	23
รูปที่ 2.18 น้ำหนักบรรทุกแตร้าวของพื้นหลังจากการซ่อมแซม.....	24
รูปที่ 2.19 น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของพื้นหลังจากการซ่อมแซม.....	24
รูปที่ 2.20 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการซ่อมแซม.....	25
รูปที่ 2.21 ความเครียดภายในคอนกรีตที่แรงอัดเท่ากับ 50 กิโลนิวตัน.....	25

รูปที่ 2.22 (ก) การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก และ (ข) รอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว.....	27
รูปที่ 2.23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	28
รูปที่ 2.24 ผลการประเมินผลประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยแบคทีเรีย.....	28
รูปที่ 2.25 รูปแบบรอยร้าวทั่วไปบนผิวด้านรับแรงดึงของคาน ECC.....	30
รูปที่ 2.26 การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test).....	31
รูปที่ 2.27 (ก) ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำและ (ข) ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต.....	32
รูปที่ 2.28 ปริมาณความพรุนของตัวอย่างที่ผสมเชื้อแบคทีเรียเทียบกับตัวอย่างปกติ.....	33
รูปที่ 2.29 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ (ก) บ่ม 7 วัน และ (ข) บ่ม 28 วัน ที่ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียต่างๆ.....	33
รูปที่ 2.30 การซ่อมแซมรอยร้าวบริเวณคานโดยใช้วิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต.....	34
รูปที่ 2.31 การติดตั้งยางเพื่อกักเก็บเชื้อและสารอาหารสำหรับการซ่อมแซม.....	35
รูปที่ 2.32 การซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้แบคทีเรียชนิด <i>Bacillus pasteurii</i> และ <i>Bacillus sphaericus</i>	35
รูปที่ 3.1 ซียูสมาร์ทเลนส์ (CU Smart Lens).....	37
รูปที่ 3.2 ซอฟต์แวร์อิมเมจ เจ (ImageJ).....	37
รูปที่ 3.3 การวัดพื้นที่รอยร้าวด้วยซอฟต์แวร์ Image J.....	38
รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก.....	40
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	42
รูปที่ 3.6 รูป (ก) เครื่องผสมมอร์ตาร์ และรูป (ข) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	43
รูปที่ 3.7 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร.....	43
รูปที่ 3.8 (ก) ชุดเครื่องมือทดสอบหาระยะการซึมน้ำ และ (ข) ขณะทำการทดสอบ.....	45
รูปที่ 3.9 รายละเอียดการทดสอบการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test).....	46
รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งแผ่นทองแดง และแนวซิลิโคน.....	47

รูปที่ 3.11 การติดตั้งแผ่นทองแดงเพื่อทำการสร้างรอยร้าว	47
รูปที่ 3.12 ผลึกปูนซีเมนต์ไฮบริด	49
รูปที่ 3.13 สารเคมีที่ใช้สำหรับการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย.....	50
รูปที่ 3.14 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนความเร็วสูง (Microcentrifuge).....	51
รูปที่ 3.15 ภายในเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนความเร็วสูง (Microcentrifuge).....	51
รูปที่ 3.16 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter).....	52
รูปที่ 3.17 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclaved).....	52
รูปที่ 3.18 ตู้ปลอดเชื้อ.....	53
รูปที่ 3.19 รูป (ก) ส่วนประกอบของสารอาหารเหลวสำหรับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ และรูป (ข) หลังจากเติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร และคนให้เข้ากัน	54
รูปที่ 3.20 การนำอาหารเหลวไปทำการฆ่าเชื้อภายในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ	54
รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการลดอุณหภูมิสารอาหารเหลวสำหรับการเพาะเชื้อ	55
รูปที่ 3.22 เชื้อแบคทีเรียภายในอาหารแข็ง.....	55
รูปที่ 3.23 (ก) เข็มเขี่ยเชื้อ และ (ข) ตะเกียงแอลกอฮอล์.....	56
รูปที่ 3.24 แบคทีเรียในสภาพพร้อมใช้งาน.....	56
รูปที่ 3.25 การเตรียมสารอาหารเหลว	58
รูปที่ 3.26 เครื่องกวนสารละลายพร้อมแผ่นให้ความร้อน	58
รูปที่ 3.27 สารละลายของส่วนผสมสำหรับเตรียมสารอาหารเหลว.....	59
รูปที่ 3.28 การเคลือบอนุภาคทองคำก่อนทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	60
รูปที่ 3.29 เครื่องมือสำหรับการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และการวิเคราะห์ธาตุ.....	61
รูปที่ 4.1 บริเวณที่ทำการถ่ายภาพด้วยเลนส์ขยาย 40 เท่า.....	62
รูปที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวจากเลนส์ขยายอัจฉริยะ 40 เท่า ของตัวอย่าง C9 ใน กลุ่มที่ 3	66
รูปที่ 4.3 ผลการประเมินผลการซ่อมแซมความกว้างรอยร้าวเฉลี่ยที่บริเวณผิวของตัวอย่าง	66

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก	69
รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก	70
รูปที่ 4.6 สภาพตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวหลังผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของตัวอย่าง C2 ในกลุ่มที่ 1	72
รูปที่ 4.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบมีรอยร้าว ของตัวอย่าง C1 ในกลุ่มที่ 2....	73
รูปที่ 4.8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการซ่อมแซม ของตัวอย่าง C2 ในกลุ่มที่ 3.....	74
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทั้ง 3 เงื่อนไข	75
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาระยะความลึกในการซึมผ่านน้ำ	76
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างผลการทดสอบระยะการซึมผ่านน้ำ	77
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test)	78
รูปที่ 4.13 ผลึกของตัวอย่างในบริเวณที่แตกต่างกัน	80
รูปที่ 4.14 ผลการส่องกล้องจุลทรรศน์และการวิเคราะห์ธาตุ.....	80
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันบริเวณที่ไม่มีการซ่อมแซม	82
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันบริเวณผิวด้านบนของส่วนที่มีการ ซ่อมแซม	82
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันบริเวณผิวด้านในของส่วนที่มีการ ซ่อมแซม	82

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	กระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตทางอ้อม	6
ตารางที่ 2.2	การจำแนกขนาดรอยร้าวโดยใช้เกณฑ์ความกว้าง	29
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร	48
ตารางที่ 3.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮบริดจากการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี	49
ตารางที่ 3.3	จำนวนตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ	59
ตารางที่ 4.1	การเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยร้าวที่บริเวณผิวตัวอย่าง (มิลลิเมตร).....	64
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบการซ่อมแซมรูพรุนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (เมตรต่อวินาที)	68
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก.....	70
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว	71
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยร้าว	73
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังผ่านการซ่อมแซม	74
ตารางที่ 4.7	ผลการทดสอบหาความลึกในการซึมผ่านของน้ำ	76
ตารางที่ 4.8	ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำ	77
ตารางที่ 4.9	ค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวต่อ 1 ตร.ชม. ด้วยวิธีต่างๆ.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันคอนกรีตถือเป็นวัสดุที่สำคัญในงานก่อสร้าง ซึ่งข้อดีของคอนกรีตก็คือ ทำงานง่าย ทนทาน ไม่ผุกร่อน ราคาคง และสามารถรับกำลังอัดได้ดี แต่ในทางกลับกันข้อเสียของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างที่เกิดขึ้น เช่น กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ตัวอย่างเช่นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการผลิตปูนซีเมนต์ถือเป็น 5% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในโลก (Worrell et al., 2001) และนอกจากนั้นปัญหาที่สำคัญของคอนกรีตคือ คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ต่ำจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง โดยรอยแตกร้าวนั้นมีตั้งแต่ระดับเล็กไปจนถึงระดับที่ส่งผลต่อความคงทนต่อโครงสร้าง ซึ่งทำให้ความสามารถในการซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น (Permeability) และอาจนำมาซึ่งปัญหาในระยะยาว เช่น น้ำไหลซึมผ่านรอยร้าวเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม ทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) เหล็กเป็นและทำให้เกิดสนิม ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างต่ำลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องเกิดการซ่อมบำรุงอยู่บ่อยครั้ง และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง โดยวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น การฉีดอีพ็อกซี (Epoxy Injection) การฉีดปูนเกร้าท์ (Grout Cement) และการเสริมแรงต่างๆ เช่น การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber strip) และวิธีอื่นๆ ซึ่งการซ่อมเหล่านี้ล้วนมีกระบวนการผลิตที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

ดังนั้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการคิดค้นวิธีการซ่อมแซมคอนกรีตที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวิธีหนึ่งที่น่าสนใจก็คือวิธีการสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต หรือแคลไซต์ (CaCO₃) โดยใช้หลักการทางชีวภาพ หรือที่เรียกว่า Microbially induced carbonate precipitation (MICP) โดยใช้แบคทีเรียที่สามารถทำปฏิกิริยากับยูเรียได้ (Ureolytic Bacteria) (Van Tittelboom et al., 2010) ซึ่งอาศัยการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแบคทีเรีย ซึ่งอันที่จริงแล้วคอนกรีตปกตินั้นก็มีความสามารถในการรักษาตนเองอยู่บ้าง ซึ่งเกิดจากเมื่อเกิดรอยร้าวเกิดขึ้นและมีน้ำไหลซึมผ่านเข้าไป ความชื้นเหล่านี้ก็จะไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ที่หลงเหลือจากปฏิกิริยาคั้งก่อน แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือไม่สามารถรักษาคอนกรีตได้เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องมีการคิดค้นวิธีอื่นขึ้นมาแทน โดยตระกูลแบคทีเรียที่นิยมใช้นั้นก็คือตระกูลบาซิลลัส (*Bacillus*) ซึ่งมีความสามารถในการอยู่รอดในสภาวะสปอร์ได้ถึง 200 ปี (Khaliq and Ehsan, 2016) แต่จะต้องทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่ทำให้

แบคทีเรียสามารถทนอยู่ในสภาวะกระด้างของคอนกรีตได้ (Harsh Condition) ซึ่งถือเป็นตัวแปรหนึ่ง ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา

โดยที่ผ่านมาการซ่อมแซมรอยร้าวโดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะนิยมใช้การผสมเชื้อแบคทีเรียลงไปในตัวอย่างเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวทั้งภายในและภายนอก แต่ในความเป็นจริงนั้นอาคารที่ทำการก่อสร้างมานานแล้วนั้นไม่สามารถจะใส่เชื้อแบคทีเรียลงไปได้ ดังนั้นจึงต้องมีแนวทางในการรักษาซ่อมแซมจากภายนอกซึ่งใช้หลักการซ่อมแซมแบบเดียวกัน โดยงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวจากภายนอก โดยจะทำการวิเคราะห์ความสามารถในการซ่อมแซมตัวอย่างด้วยวิธีเอ็มไอซีพีจากภายนอก โดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) ซึ่งทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยร้าวในแต่ละวัน ซึ่งในแต่ละวันตัวอย่างจะถูกซ่อมแซมจากเชื้อแบคทีเรีย และสารละลายอื่นๆ โดยใช้ซอฟต์แวร์ อิมเมจ เจ และเลนส์ขยายขนาด 40 เท่า สำหรับการเก็บข้อมูลขนาดรอยร้าว และใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนภายใน จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุหลังจากการซ่อมแซม ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัด และการทดสอบความสามารถในการซึมน้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพีเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานเทคโนโลยีคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตโดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรีย์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1). งานวิจัยนี้ใช้แบคทีเรียบาซิลลัส สเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) ATCC 22257
- 2). ศึกษาคุณสมบัติวัสดุหลังผ่านการซ่อมแซม เช่น กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และ ความสามารถในการซึมผ่านน้ำ (Permeability)
- 3). ศึกษาพฤติกรรมการรักษาตัวเองของคอนกรีต โดยใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น วิธีคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อติดตามผลการซ่อมแซมภายในของตัวอย่างหรือรูพรุนของตัวอย่างซึ่งไม่สามารถประเมินด้วยตาเปล่าได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าวบนผิวคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอซีพี ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับงานคอนกรีตเทคโนโลยีในอนาคต



บทที่ 2

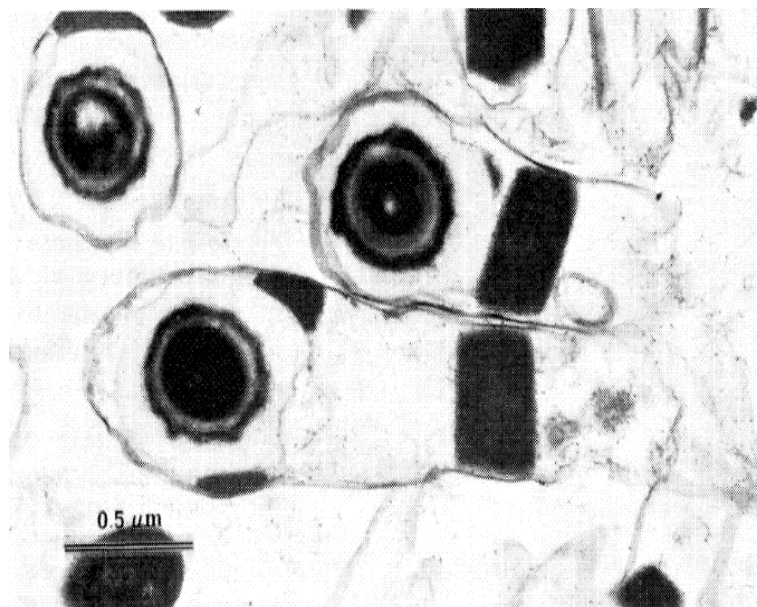
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

จุลินทรีย์กลุ่มตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตหรือ MICP จะอาศัยกิจกรรมทางชีวภาพร่วมกับกระบวนการทางธรณีเคมี ในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในโครงสร้างของดิน โดยจุลินทรีย์กลุ่มหลัก คือ กลุ่มที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ (Photosynthetic Microorganisms) เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate-reducing Bacteria) และจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรไนโตรเจน นอกจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำให้เกิดกลไกการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแล้ว ยังส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น ปฏิกิริยายูเรียไฮโดรไลซิส (Urea Hydrolysis) ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ปฏิกิริยาผลิตซัลเฟต (Sulphate Production) และปฏิกิริยารีดักชันของเหล็ก (Iron Reduction) เป็นต้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์สามารถจำแนกออกได้ 2 กลุ่ม คือ การเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอนินทรีย์ (Autotroph) และการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอินทรีย์ (Heterotroph) (Mortensen et al., 2011)

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้จุลินทรีย์ MICP สายพันธุ์บาซิลลัส สเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) ในการศึกษา ดังรูปที่ 2.1 แบคทีเรียชนิดนี้มีแหล่งอาศัยทั่วไปในดิน จัดเป็นแบคทีเรียแกรมบวก มีลักษณะเป็นรูปแท่ง เติบโตโดยใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องในช่วง 30 – 45 องศาเซลเซียส (Mesophilic Bacteria) โดยภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม แบคทีเรียชนิดนี้จะสร้างเอนโดสปอร์ (Endospores) ทำให้สามารถทนทานต่อความแห้งแล้ง ความร้อน สารเคมี และแสงยูวี (Ultraviolet Light) ได้ นอกจากนี้สปอร์ยังคงสภาพมีชีวิตอยู่ได้นานในสภาพแวดล้อม โดยปกติแล้วแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ (Facultative Bacteria) แต่สำหรับสภาวะไร้อากาศนั้นแบคทีเรียจะสามารถดำรงอยู่ได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเท่านั้น (Todar, 2008-2012)



รูปที่ 2.1 สปอร์ของแบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สฟิรีคัส (*Bacillus sphaericus*)
(Kalfon et al., 1983)

2.1.2 หลักการชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตของแบคทีเรีย

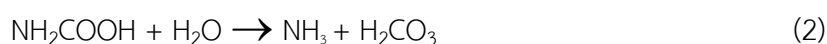
การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตของจุลินทรีย์บาซิลลัส สฟิรีคัส (*Bacillus sphaericus*) เกิดขึ้นโดยอาศัยแหล่งคาร์บอนจากสารอินทรีย์สามารถจำแนกย่อยออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ กระบวนการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตทางตรง (Active Carbonatogenesis) ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดขึ้นโดยตรงจากการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ได้แก่ ไอออนของแคลเซียมและ/หรือ ไอออนของแมกนีเซียม ซึ่งอาจเกิดไอออนของคาร์บอเนตควบคู่ไปด้วย ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตทางอ้อม (Passive Carbonatogenesis) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับวัฏจักรไนโตรเจนและวัฏจักรซัลเฟอร์ โดยแต่ละวัฏจักรประกอบด้วยกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังนี้

ตารางที่ 2.1 กระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตทางอ้อม

วัฏจักร	กระบวนการทางชีวภาพ
วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen Cycle)	(1) Ammonification of Amino Acids เป็นกระบวนการเปลี่ยนหมู่เอมีน (-NH ₂) ในกรดอะมิโนให้กลายเป็น ก๊าซแอมโมเนีย (NH ₃) ในสภาวะที่มีอากาศ (2) Dissimilatory Reduction of Nitrate เป็นกระบวนการรีดักชันไนเตรต (NO ₃) ให้เป็นไนไตรท์ (NO ₂) ในสภาวะไร้อากาศ (3) Degradation of Urea or Uric Acid เป็นกระบวนการย่อยสลายยูเรียหรือกรดยูริก โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในสภาวะที่มีอากาศ
วัฏจักรซัลเฟอร์ (Sulfur Cycle)	(1) Dissimilatory Reduction of Sulfate เป็นกระบวนการรีดักชันซัลเฟต (SO ₄ ²⁻) ให้เป็นซัลไฟด์ (S ²⁻) ในสภาวะไร้อากาศ

(Monty, 1995)

สำหรับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยคือ กระบวนการย่อยสลายยูเรียหรือกระบวนการ ยูรีโอไลซิส (Ureolysis) ซึ่งเป็นการย่อยสลายยูเรียให้กลายเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และคาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻) ซึ่ง 1 โมลของยูเรียจะทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1 โมลของแอมโมเนียและ 1 โมลของกรดคาร์บามิก (Carbamic Acid) ดังสมการที่ 1 หลังจากนั้นกรดคาร์บามิกจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียเพิ่มอีก 1 โมล และได้กรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid) ดังสมการที่ 2



แอมโมเนียและกรดคาร์บอนิกจะเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนตไอออน (Bicarbonate Ions) 2 โมลของแอมโมเนียมไอออนและ 2 โมลของไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ions) ดังสมการที่ 3 และ 4



ไฮดรอกไซด์ไอออนจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงขึ้น เนื่องจากสมดุลของไบคาร์บอเนตเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดคาร์บอเนตไอออน ดังสมการที่ 5

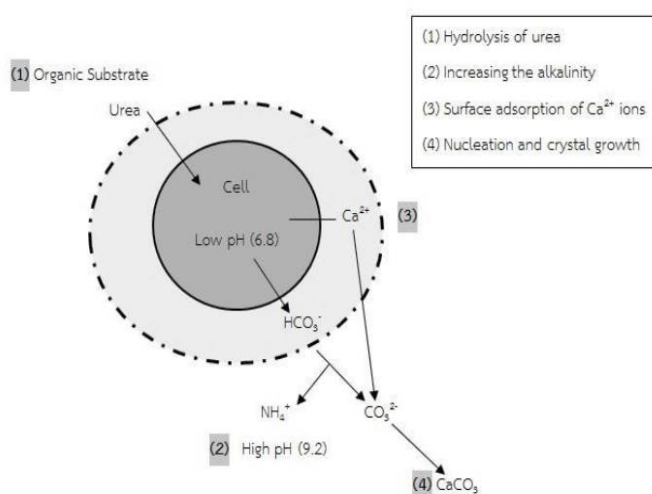


คาร์บอเนตไอออนที่เกิดขึ้นก็จะจับตัวกับแคลเซียมไอออนเกิดการจับตัวตกตะกอนเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 6



การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการนี้เองที่คาดว่าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์และประยุกตใ้กับงานคอนกรีตได้ โดยรูปที่ 2.2 เป็นแบบจำลองแสดงกระบวนการย่อยสลายยูเรียของจุลินทรีย์กลุ่ม MICP โดยประกอบด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ดังนี้

1. การย่อยสลายยูเรีย (Hydrolysis of urea) อาศัยหลักการสร้างเอนไซม์ยูรีเอสของจุลินทรีย์กลุ่มเอ็มไอซีพี เพื่อนำมาย่อยสลายยูเรีย
2. การสร้างแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายยูเรีย ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างในสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น (Increasing the alkalinity)
3. การดูดติดผิวแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่บริเวณโดยรอบเซลล์ (Surface adsorption)
4. การรวมตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) เกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (Nucleation and crystal growth)



รูปที่ 2.2 โมเดลจำลองกระบวนการย่อยสลายยูเรียของจุลินทรีย์กลุ่ม MICP (Stocks-Fischer et al., 1999)

2.1.3 กลไกการทำงานของแบคทีเรียและหลักการซ่อมแซมทางชีวภาพของคอนกรีต

การที่แบคทีเรียจะสามารถอาศัยอยู่ในเนื้อคอนกรีตได้นั้นจำเป็นที่จะต้องอยู่ในสภาวะสปอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้แบคทีเรียเกิดการเติบโตก่อนถึงเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องบรรจุแบคทีเรียให้อยู่ในวัตถุหรือสารเคมีบางอย่างที่สามารถทนต่อสภาพความกระด้างของคอนกรีตได้ ซึ่งค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 13 ซึ่ง Patil et al. (2016) ได้อธิบายว่าระบบทางชีวภาพนั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1). การเดินทางของสารละลาย (Transport Solution) ซึ่งส่วนนี้เป็นวิธีการที่ทำให้แบคทีเรียสามารถอาศัยอยู่ในสภาวะของคอนกรีตได้ ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มแบคทีเรีย ได้แก่ ซิลิกาเจล เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะต้องมีคุณสมบัติในการต้านทาน pH ของคอนกรีต และสภาวะแห้งในคอนกรีตได้

2). แบคทีเรีย โดยแบคทีเรียที่ใช้จะต้องสามารถเปลี่ยนสารอาหารที่อยู่ภายในคอนกรีตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งแบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้จะเป็นแบคทีเรียในตระกูลบาซิลลัส ซึ่งมีความสามารถในการอาศัยอยู่ในสภาวะแห้งของคอนกรีตได้ถึง 200 ปี (Wiktor and Jonkers, 2011)

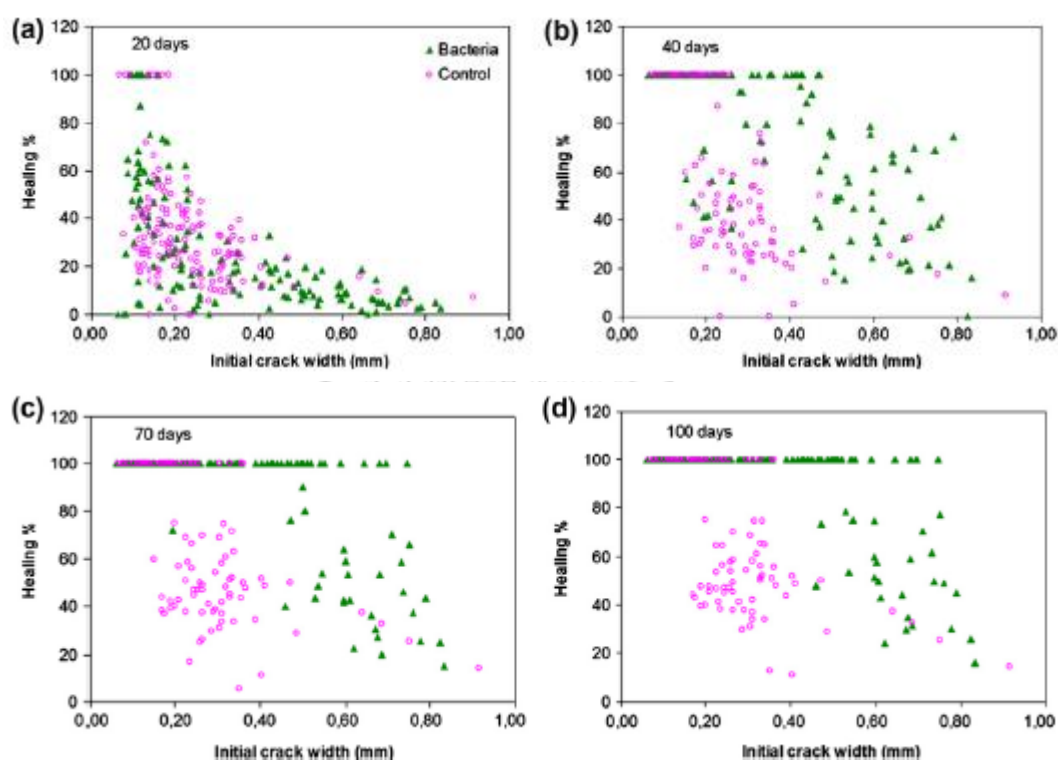
3). สารอาหาร เพื่อการสร้างผลิตภัณฑ์นั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยแร่ธาตุ เช่น คาร์บอน และแหล่งแคลเซียม โดยสารอาหารที่ใช้ควรเลือกที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียซึ่งหลักการของสารอาหารคือต้องทำให้แบคทีเรียสามารถอยู่รอดและสร้างผลิตภัณฑ์ได้

2.1.4 ความสามารถในการรักษารอยร้าวของคอนกรีตโดยการใช้แบคทีเรีย

แบคทีเรียนั้นมีหลากหลายสายพันธุ์ซึ่งแบคทีเรียที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัยนี้อยู่ในสายพันธุ์บาซิลลัส ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สามารถทนต่อสภาวะแห้งของคอนกรีตได้นาน ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการรักษารอยร้าวโดยใช้สายพันธุ์เดียวกันนี้โดยใช้ค่าความสามารถในการซึมน้ำเป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินการซ่อมแซมภายในคอนกรีต

Virginie และ Henk (2011) ศึกษาความสามารถในการรักษาตัวอย่างคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ โดยอยู่บนพื้นฐานของสารเคมีชีวภาพซึ่งถูกบรรจุอยู่ในอนุภาคของดิน ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ *Bacillus alkalinitrilicus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่อยู่ในสายพันธุ์บาซิลลัส โดยที่วัสดุที่ใช้จะเป็นตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 4x4x4 ซม. โดยติดตั้งเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ไว้บริเวณกลางตัวอย่างเพื่อสะดวกต่อการสร้างรอยร้าว โดยการนำตัวอย่างไปตั้งโดยอาศัยเหล็กเสริมตรงกลางเป็นตัวควบคุมเมื่อได้รอยร้าวประมาณ 12-14 รอยก็ทำการหยุดเครื่องตั้งทันที ซึ่งความกว้างของรอยร้าวที่ได้อยู่ที่

ช่วง 0.05 ถึง 1 มม. หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำและนำออกมาประเมินผลทุกสัปดาห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าที่เวลาผ่านไป 100 วัน ตัวอย่างที่บรรจุแบคทีเรียอยู่ในสามารถรักษารอยร้าวได้ถึง 0.46 มม. โดยสามารถรักษาได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีแบคทีเรียซึ่งรักษาได้เพียง 0.18 มม. และงานวิจัยนี้ยังพบว่าหลังจาก 40 วันขึ้นไป แบคทีเรียเริ่มทำงานเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึง 100 วัน ซึ่งทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำลดลง เนื่องจากการซ่อมแซมรูพรุนภายในที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.3

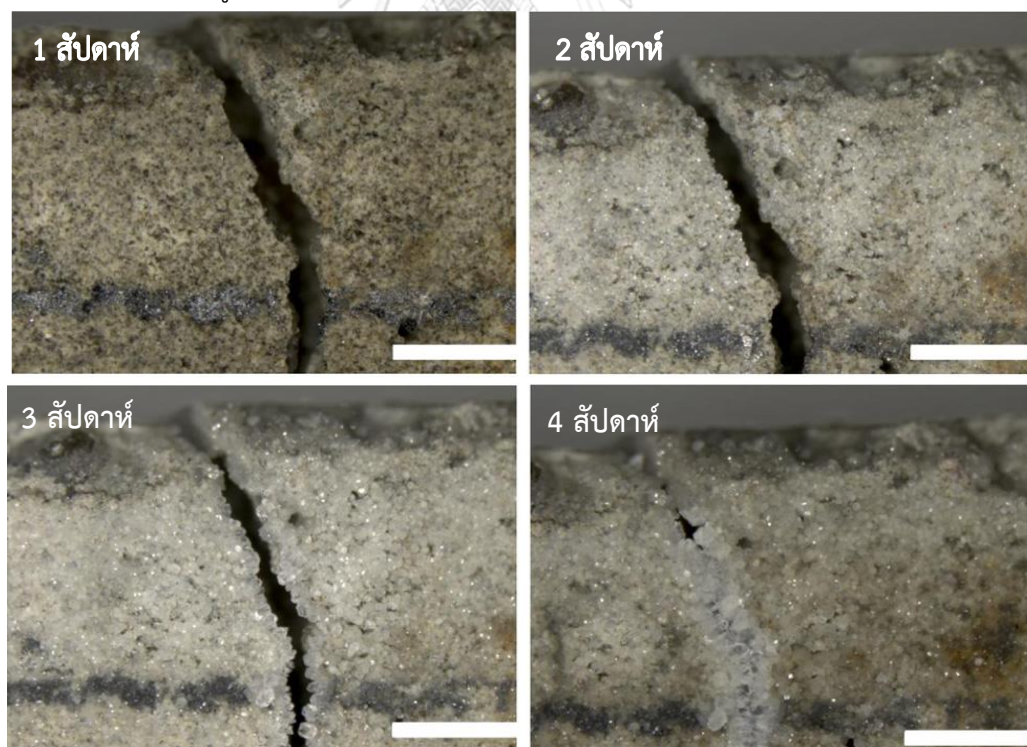


รูปที่ 2.3 ร้อยละการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ

(Wiktor and Jonkers, 2011)

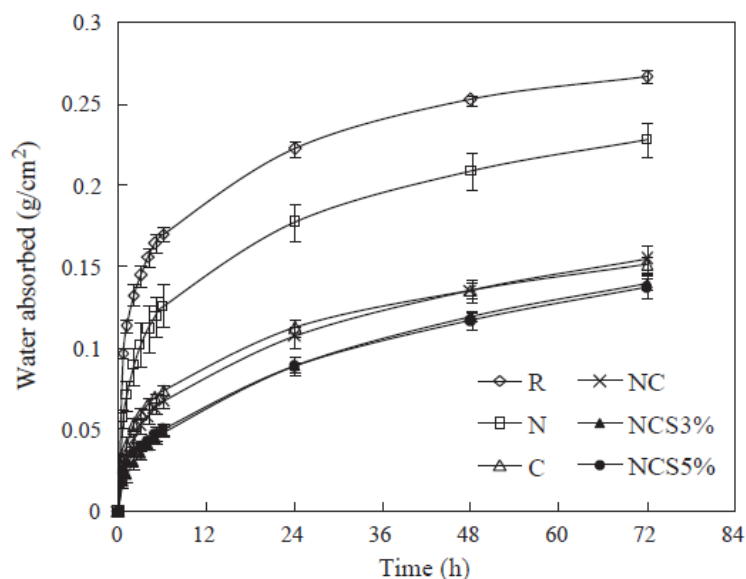
งานวิจัยต่อมามีศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลการใส่ไมโครแคปซูลที่บรรจุแบคทีเรียลงในคอนกรีต ซึ่ง Wang และ คณะ (2014) อธิบายว่าจุดประสงค์หลักของงานวิจัยคือการสาธิตความเป็นไปได้ของการใช้ไมโครแคปซูลเพื่อบรรจุสปอร์ให้สามารถอาศัยอยู่ในคอนกรีตในสภาวะกระด้างได้ และยังพิจารณาถึงสารอาหารที่ใช้เลี้ยงสปอร์ภายในคอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย สารสกัดจากยีสต์ และการสะสมตัวของยูเรียและแหล่งแคลเซียม (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในไมโครแคปซูลขณะผสมคอนกรีต โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) โดยเริ่มจากการทดสอบความสามารถในการอยู่รอดของแบคทีเรียภายในสภาวะของคอนกรีต โดยใช้

ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 4x4x16 ซม. หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ทำการสร้างรอยร้าวเสร็จแล้วไปทำการบ่มโดยประคบไปด้วย 5 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1). การบ่มแบบปกติที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 2). การบ่มโดยแช่ในน้ำ 3). การบ่มโดยการแช่ใน Deposition Medium (DM) 4). การบ่มด้วยวิธีแห้งสลับเปียกกับน้ำ และ 5). บ่มด้วยวิธีแห้งสลับเปียกกับ DM นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลเนื่องจากส่วนผสมต่างๆ อันได้แก่ 1) คอนกรีตปกติ 2) คอนกรีตผสมกับสารอาหาร 3) คอนกรีตผสมกับไมโครแคปซูล 4) คอนกรีตผสมกับสารอาหารและไมโครแคปซูล 5) คอนกรีตผสมกับสารอาหาร ไมโครแคปซูล และสปอร์ 3 เพอร์เซ็นต์ และ 6) คอนกรีตผสมกับสารอาหาร ไมโครแคปซูล และสปอร์ 5 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งผลสรุปที่ได้พบว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติแล้ว คอนกรีตอื่นจะมีค่ากำลังรับแรงดิ่งลดลงเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงอย่างมากประมาณ 15 ถึง 34 เพอร์เซ็นต์ โดยจะลดลงมากที่สุดเมื่อคอนกรีตผสมสารอาหาร ไมโครแคปซูล และสปอร์ 5 เพอร์เซ็นต์ และยังพบว่าเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการซ่อมแซมได้มากที่สุดคือการใช้คอนกรีตที่ผสมกับสารอาหาร ไมโครแคปซูล และสปอร์ 3 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งซ่อมแซมรอยร้าวได้มากถึง 80 เพอร์เซ็นต์ ภายใน 8 สัปดาห์ โดยใช้วิธีการบ่มแบบเปียกสลับแห้งในน้ำ และยังสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมน้ำได้อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้มีประโยชน์ในเรื่องของการหาส่วนผสมและวิธีการบ่มที่เหมาะสม ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการซ่อมแซมรอยร้าวภายใน 4 สัปดาห์

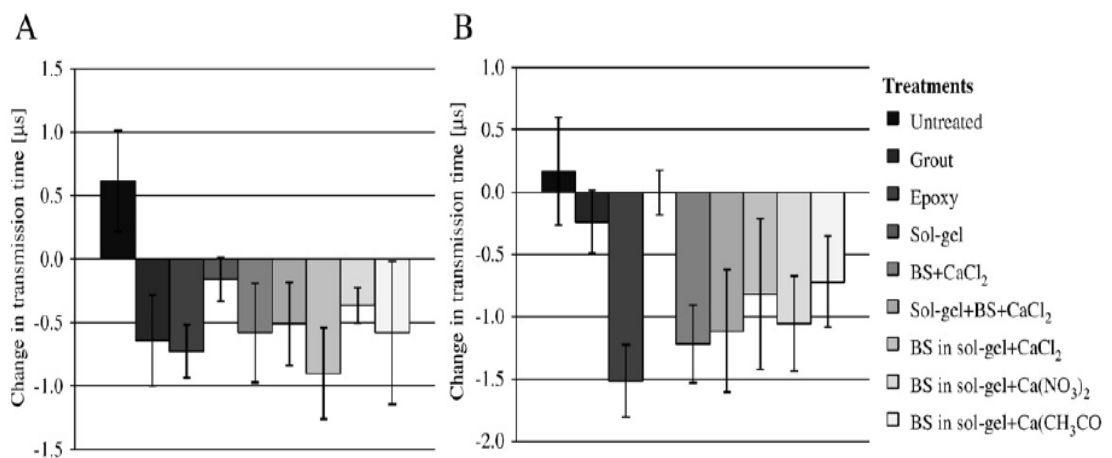
(Wang et al., 2014)



รูปที่ 2.5 การดูดซับน้ำของตัวอย่างที่เวลา และภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
(Wang et al., 2014)

Titelboom et al. (2010) ได้อธิบายถึงการใช้งานแบคทีเรียสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีต โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการซ่อมแซมคอนกรีตโดยใช้แบคทีเรียและวิธีการปกติได้แก่ การฉีดปูนเกรธาท์ และการฉีดอีพอกซี ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในที่นี้คือแบคทีเรีย *Bacillus sphaericus* ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ซิลิกาเจลในการห่อหุ้มแบคทีเรียเพื่อให้ทนต่อสภาวะในคอนกรีต และสามารถพ่นแบคทีเรียเข้าไปโดยการฉีดสเปรย์ โดยงานวิจัยนี้ทดลองใช้แคลเซียมไนเตรต แคลเซียมอะซิเตต และแคลเซียมคลอไรด์ เพื่อเป็นแหล่งแคลเซียมในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 9 ตัวอย่าง ได้แก่ 1) คอนกรีตปกติที่ไม่มีการซ่อมแซม 2) คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียและแคลเซียมคลอไรด์ 3) คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียในสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจลและแคลเซียมอะซิเตต 4) คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียในสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจลและแคลเซียมไนเตรต 5) คอนกรีตผสมกับสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจล 6) คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียในสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจลและแคลเซียมคลอไรด์ 7) คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียในสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจลและแคลเซียมอะซิเตต 8) การซ่อมแบบฉีดปูนเกรธาท์ และ 9) การซ่อมแซมแบบฉีดอีพอกซี ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณา 3 ตัวแปร ได้แก่ ความสามารถในการดูดซึมน้ำซึ่งทดสอบโดยวิธีการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ความพรุนน้ำภายในของตัวอย่างซึ่งทดสอบด้วยวิธีส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปและตรวจวัดเวลาไป - กลับของคลื่นซึ่งเมื่อคลื่นเจอความพรุนด้านในระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นก็จะเพิ่มมากขึ้น และสุดท้ายคือการสังเกตการณ์ซ่อมแซมที่บริเวณผิวของตัวอย่าง ซึ่งผลสรุปที่ได้ของงานวิจัยพบว่าหลังจากผ่านไป 2 วัน พบว่าค่า

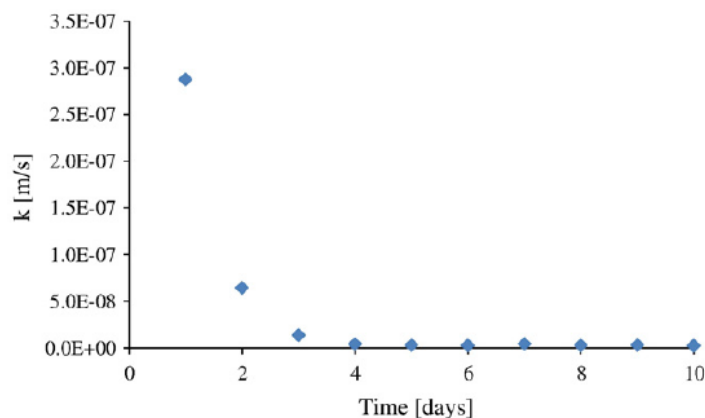
ความสามารถในการดูดซับน้ำนั้นมีค่าลดลงอย่างมาก และเริ่มเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วัน ซึ่งเงื่อนไขที่มีการซึมผ่านของน้ำน้อยที่สุดคือ คอนกรีตผสมกับแบคทีเรียในสารอาหารที่อยู่ในรูปของเจลและแคลเซียมอะซิเตต และจากการทดสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกพบว่า การซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้แบคทีเรียนั้นจะมีประสิทธิภาพเมื่อความลึกของรอยร้าวน้อยกว่า 20 มม. และเมื่อความลึกของรอยร้าวมากกว่า 20 มม. ควรใช้การซ่อมแซมโดยการฉีดอีพอกซี นอกจากนี้ยังพบว่า การซ่อมแซมแบบฉีดปูนเกรทนั้นทำได้เพียงแค่ซ่อมรอยร้าวที่ผิวเท่านั้น ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดง ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของคลื่นอัลตราโซนิกก่อนและหลังการซ่อมแซมด้วยวิธีต่าง ๆ

(A) ที่ความลึก 10 มม. และ (B) ที่ความลึก 20 มม.

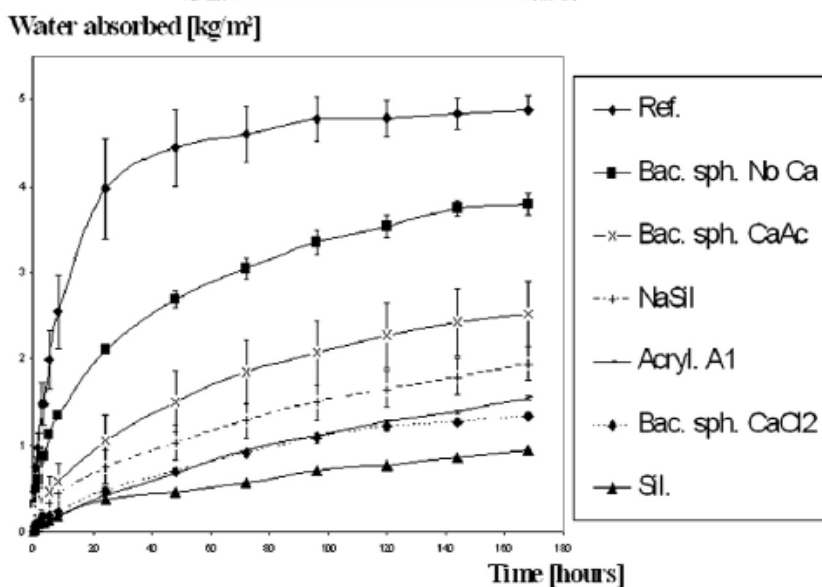
(Van Tittelboom et al., 2010)



รูปที่ 2.7 การดูดซับน้ำที่ลดลงเนื่องจากการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้แบคทีเรีย

(Van Tittelboom et al., 2010)

Muyneck et al. (2008) ได้กล่าวถึงผลกระทบของการตกผลึกแคลไซต์โดยแบคทีเรีย โดยมีผลต่อความคงทนของตัวอย่างซึ่งมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าความพรุนที่แตกต่างกัน โดยค่าความคงทนสามารถประเมินได้จากความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งมีอิทธิพลที่มีต่อค่าความพรุนนั้น ซึ่งวิธีการของงานวิจัยนี้ก็คือ หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์กรณีละ 3 ตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 หลังจากนั้นทำการบ่มตัวอย่าง 1 วันแล้วถอดแบบ จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 3 ไปแช่ในน้ำปกติเป็นเวลา 1 เดือน และนำตัวอย่างขึ้นมาเก็บที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่ออีกเป็นเวลา 1 เดือน หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบ ซึ่งการทดสอบของงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 1) การตรวจสอบรอยร้าวโดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอนจุลทรรศน์ 2) การทดสอบชิ้นส่วนชนิดบาง 3) การทดสอบน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการรักษาโดยใช้แบคทีเรีย 4) การทดสอบการดูดซึมน้ำ 5) การทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส 6) การทดสอบการหาค่าการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน 7) การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ และ 8) การทดสอบการแช่แข็งและการละลาย ซึ่งจากการทดสอบทั้งหมดพบว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลต่อการสร้างผลึกของแคลไซต์ และเมื่อระยะเวลาการรักษาผ่านไปนานขึ้นก็จะทำให้น้ำหนักของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากรูพรุนภายในตัวอย่างถูกแทนที่ด้วยผลึกแคลไซต์ ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง เช่นเดียวการซึมผ่านของแก๊ส ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของการซ่อมแซมผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ภายใต้เงื่อนไขการซ่อมแซมต่างๆ

(De Muyneck et al., 2008)

ต่อมา Sun-Gyu Choi et al. (2017) ได้ทำการทดสอบการซ่อมแซมรอยแตกกร้าวบนตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Microbial induced calcite precipitation; MICP) โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกเพื่อทำการทดสอบ ซึ่งทำการสร้างรอยร้าวลงบนตัวอย่างด้วยวิธีการผ่าซีก โดยใช้คีมหนีบจนกระทั่งเกิดรอยร้าวขนาดต่างๆ จากนั้นทำการจำแนกประเภทรอยร้าวออกเป็นขนาดเล็ก (เล็กกว่า 0.52 มิลลิเมตร) และรอยร้าวขนาดใหญ่ (มากกว่า 0.52 มิลลิเมตร ไปจนถึง 1.64 มิลลิเมตร) จากนั้นทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกทำการทดสอบการซ่อมแซมโดยวิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และอีกวิธีหนึ่งคือการแช่ตัวอย่างซึ่งเกิดรอยร้าวลงในน้ำกลั่น โดยขั้นตอนการทดสอบของตัวอย่างในกลุ่มแรกนั้นเป็นไปดังนี้

1). แช่ตัวอย่างที่เกิดรอยร้าวลงในสารละลาย 60 มิลลิลิตร ซึ่งมีส่วนผสมของเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

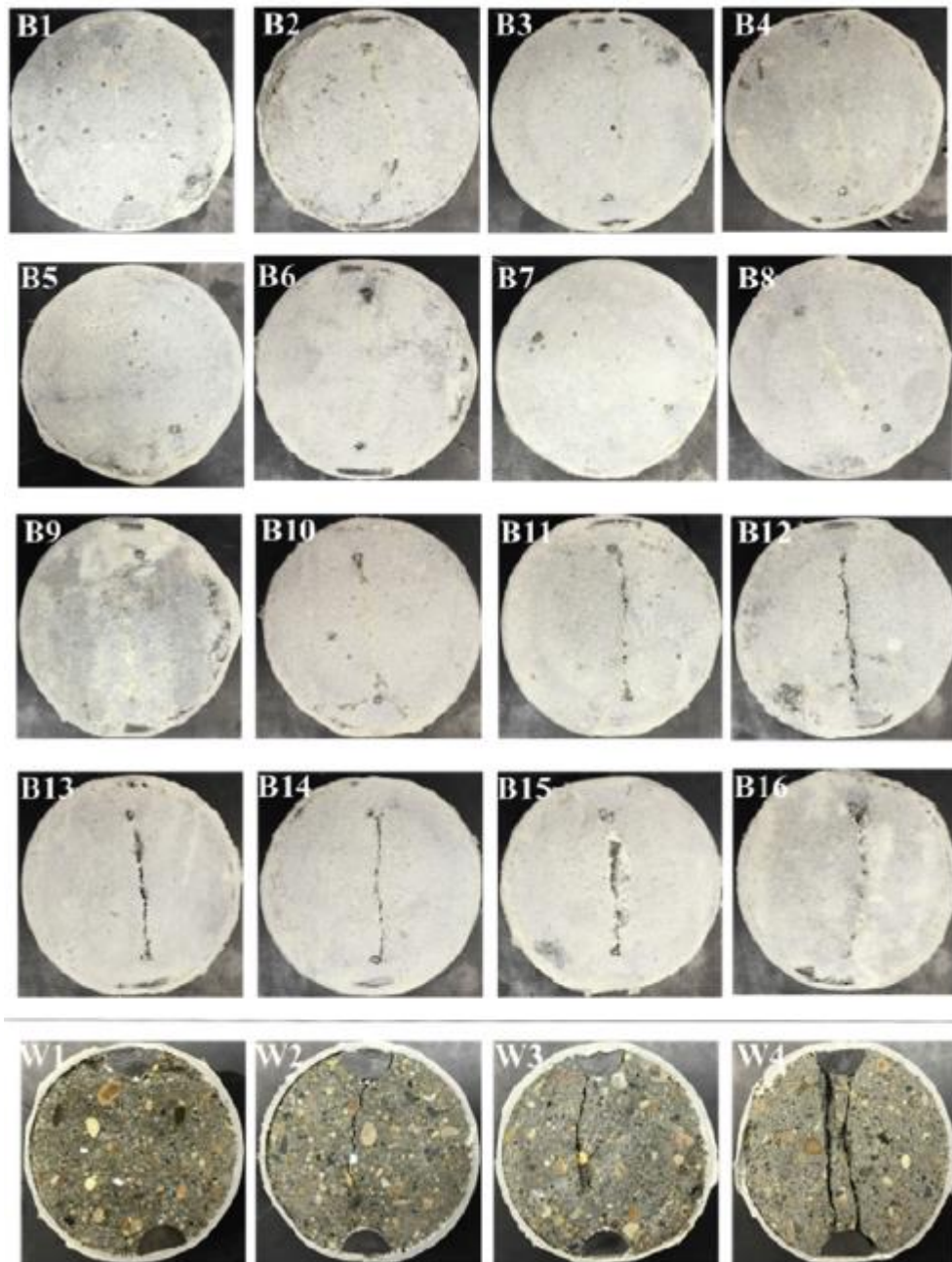
2). นำตัวอย่างขึ้นมาเพื่อให้ตัวอย่างไม่ชื้นจนเกินไปเป็นเวลา 5 นาที

3). นำตัวอย่างที่ได้ไปแช่ในสารอาหารซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ยูเรีย และแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาณ 4 ลิตร เป็นเวลา 22 ชั่วโมง โดยวางภาชนะบนเครื่องกวนตลอดเวลา เพื่อไม่ให้แคลเซียมคลอไรด์ตกตะกอนบริเวณด้านล่างภาชนะ

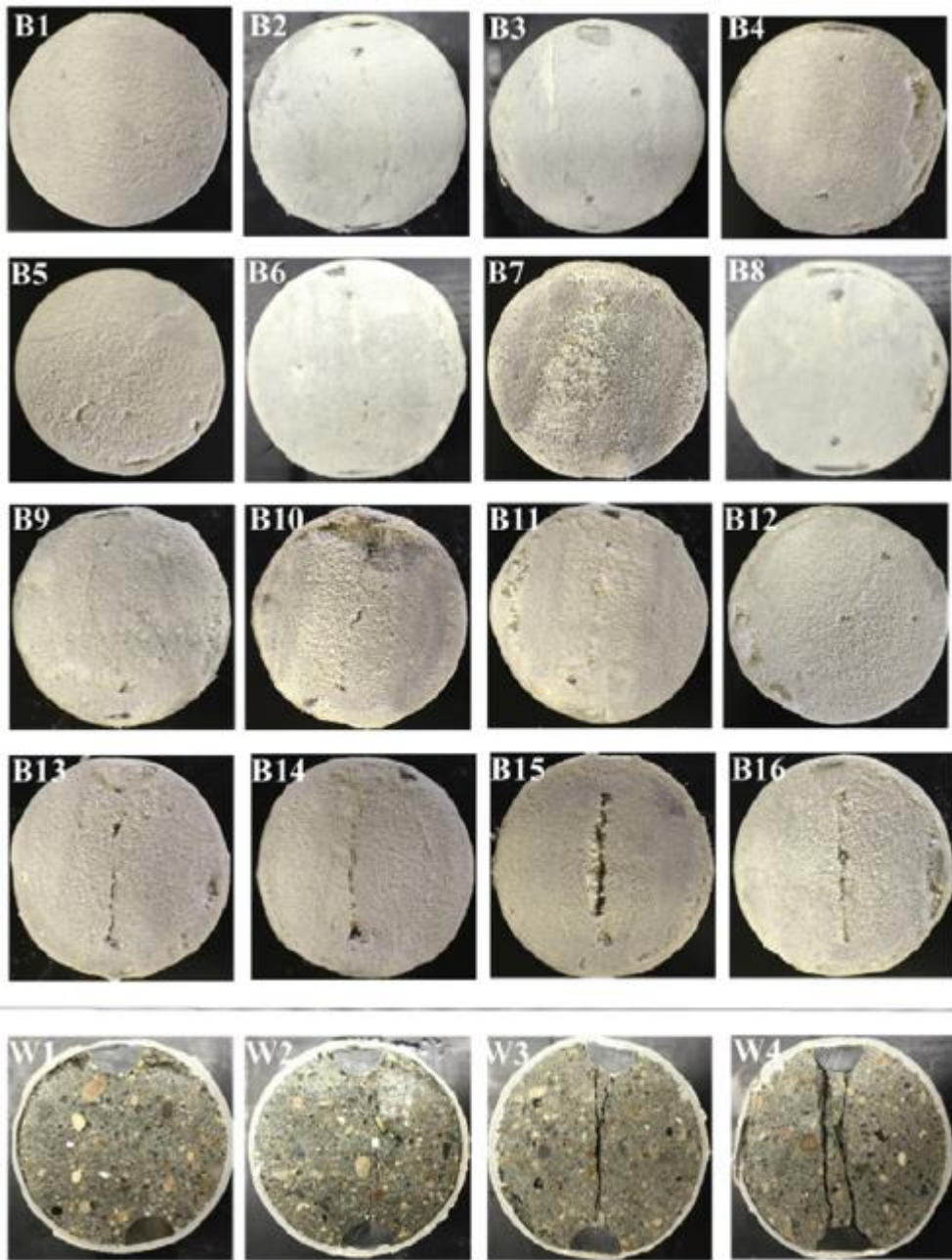
4). นำขึ้นมาจากสารอาหาร และทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นทำการเริ่มต้นใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยการทดสอบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนที่ 4 เรียกว่า 1 รอบ

โดยผลการซ่อมแซมที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 2.9 โดยสรุปได้ว่ารอยร้าวขนาดเล็กนั้น (B1 ถึง B10) สามารถซ่อมแซมเสร็จสิ้นด้วยการทดสอบประมาณ 7 รอบเท่านั้น ในขณะที่รอยร้าวขนาดใหญ่ (B11 ถึง B16) จะทำการซ่อมแซมเสร็จสิ้นเมื่อครบ 21 รอบ โดยผลสรุปการทดสอบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนตยังกล่าวเพิ่มเติมว่ารอยร้าวที่มีขนาดเล็ก (ขนาดรอยร้าวเล็กกว่า 0.52 มิลลิเมตร) นั้นจะไม่สามารถรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากของเหลวซึ่งประกอบไปด้วยเชื้อแบคทีเรีย หรือสารอาหารนั้นไม่สามารถซึมผ่านลงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่รอยร้าวซึ่งอยู่ในช่วง 0.52 ถึง 1.1 มิลลิเมตรนั้นจะเกิดการรั่วอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากขนาดรอยร้าวพอดีกับการไหลซึมผ่านของของเหลว จึงทำให้เกิดการซ่อมแซมรอยร้าวภายในด้วย แต่ในขณะที่รอยร้าวซึ่งมีขนาดกว้างมากกว่า 1.1 มิลลิเมตรนั้น จะมีการเติบโตของแคลเซียมคาร์บอเนตได้น้อยลง โดย Sun-Gyu Choi et al. (2017) ได้ให้เหตุผลว่าเนื่องจากรอยร้าวที่มีขนาดกว้างมากเกินไปนั้นอาจทำให้เกิดผลกระทบเนื่องจากสิ่งแวดล้อมหรืออากาศที่ไหลผ่านเข้าไปด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2.10 และ

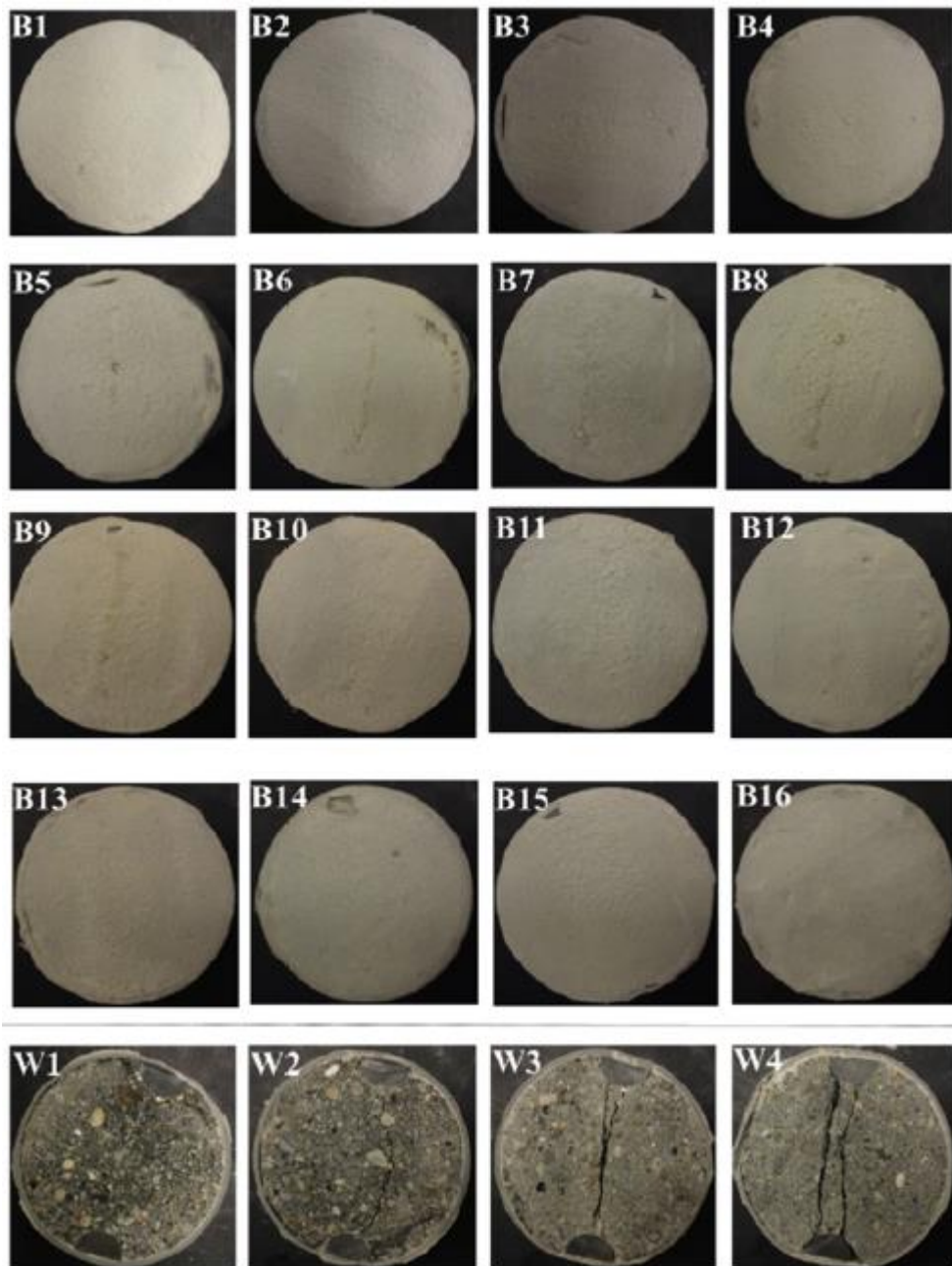
การซ่อมแซมด้วยการแช่ในน้ำกลั่นนั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (W1 ถึง W4) (Choi et al., 2017)



(ก)



(၅)



(ค)

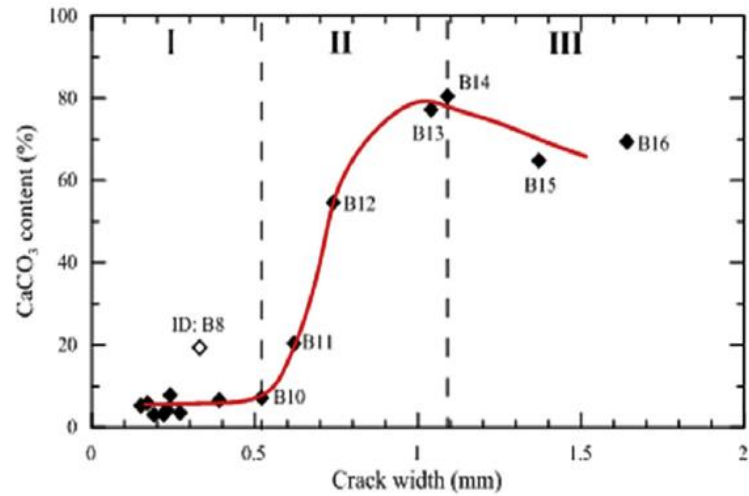
รูปที่ 2.9 ผลการซ่อมแซมโดยวิธีตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และการแช่น้ำกลั่น โดยรูป

(ก) การซ่อมแซมโดยวิธีตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 7 รอบ

(ข) การซ่อมแซมโดยวิธีตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 14 รอบ

(ค) การซ่อมแซมโดยวิธีตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 21 รอบ

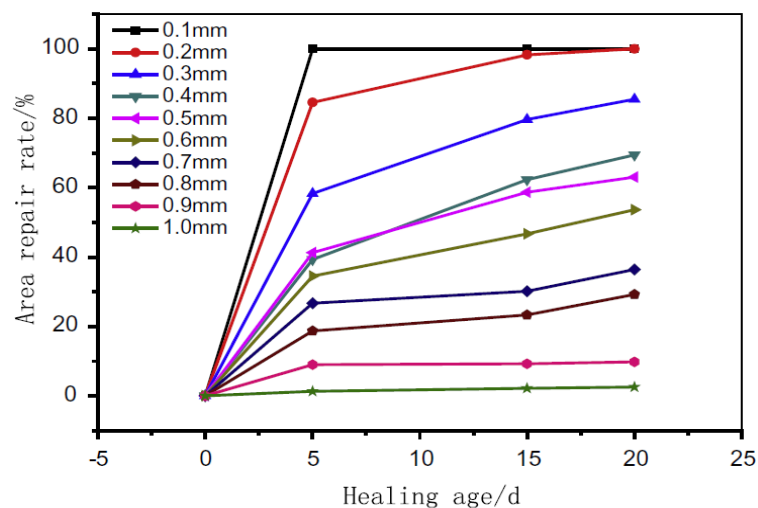
(Choi et al., 2017)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยร้าวและปริมาณการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

(Choi et al., 2017)

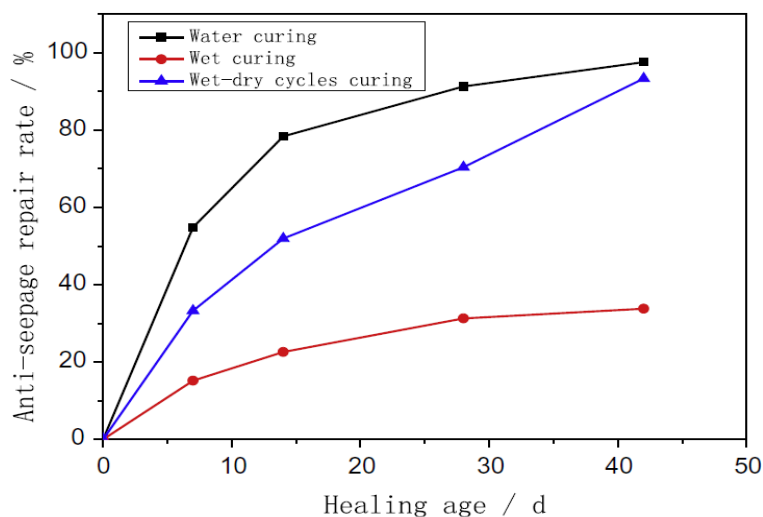
M.Luo et al. (2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยซึ่งมีผลกระทบต่อความสามารถในการซ่อมแซมรอยร้าว โดยวิธีการรักษาตัวเองโดยใช้แบคทีเรียผสมลงในคอนกรีต โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการผสมเชื้อแบคทีเรียลงในส่วนผสมของคอนกรีต โดยพิจารณา 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความกว้างรอยร้าว วิธีการบ่ม และอายุของรอยร้าว โดยผลการวิเคราะห์ขนาดรอยร้าวซึ่งมีอิทธิพลต่อการซ่อมแซมรอยร้าว นั้นเป็นไปดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่ารอยร้าวที่มีขนาดกว้างขึ้นจะส่งผลให้การซ่อมแซมรอยร้าวมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อเทียบ ณ เวลาเดียวกันกับขนาดรอยร้าวอื่นๆ



รูปที่ 2.11 อัตราการซ่อมแซมตัวอย่างที่ขนาดรอยร้าวต่างๆ

(Luo et al., 2015)

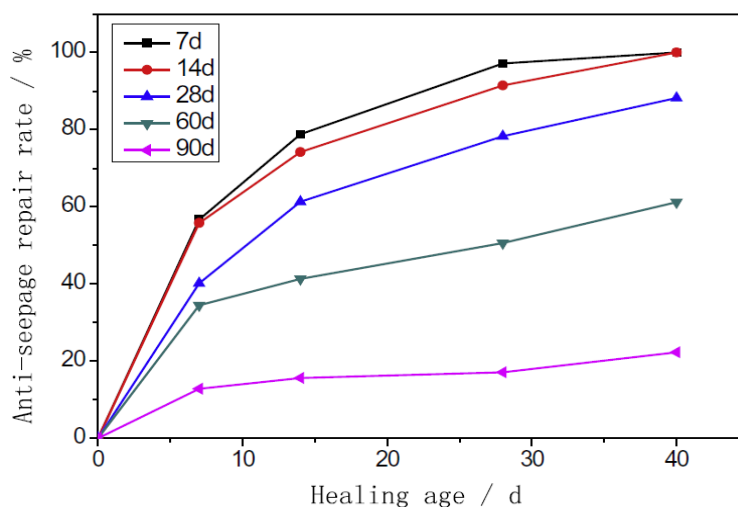
ต่อมาผลการทดสอบวิธีการบ่มต่างๆ พบว่าการบ่มที่ทำให้เกิดการซ่อมแซมอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การบ่มโดยใช้น้ำเปล่า ซึ่งอัตราการซ่อมแซมรอยร้าวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อัตราการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการบ่มด้วยวิธีต่างๆ

(Luo et al., 2015)

และผลการทดสอบสุดท้ายคือการวิเคราะห์อายุของรอยร้าวซึ่งมีผลต่ออัตราการซ่อมแซมรอยร้าว โดยผลสรุปที่ได้พบว่าอายุของรอยร้าวที่มีผลต่อการซ่อมแซมรอยร้าว ดังรูปที่ 2.13 โดยจะเห็นได้ชัดเมื่ออายุรอยร้าวมากกว่า 60 วันขึ้นไป อัตราการซ่อมแซมจะมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อเทียบกับรอยร้าวที่มีอายุน้อย ซึ่งเหตุผลหนึ่งคือแบคทีเรียที่ผสมลงไปในคอนกรีตส่วนหนึ่งเสียชีวิตไปแล้ว ดังนั้นเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นในบริเวณที่แบคทีเรียไม่สามารถทำงานได้จึงทำให้ไม่เกิดการซ่อมแซมในบริเวณนั้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือเมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ความชื้นที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อเนื่อง ทำให้รูพรุนภายในน้อยลง จึงส่งผลให้การซึมผ่านของความชื้นเมื่อเกิดรอยร้าวเพื่อไปทำปฏิกิริยากับเชื้อแบคทีเรานั้นจึงทำได้ยากขึ้น (Luo et al., 2015)



รูปที่ 2.13 อัตราการซ่อมแซมรอยร้าวที่อายุของรอยร้าวต่างๆ

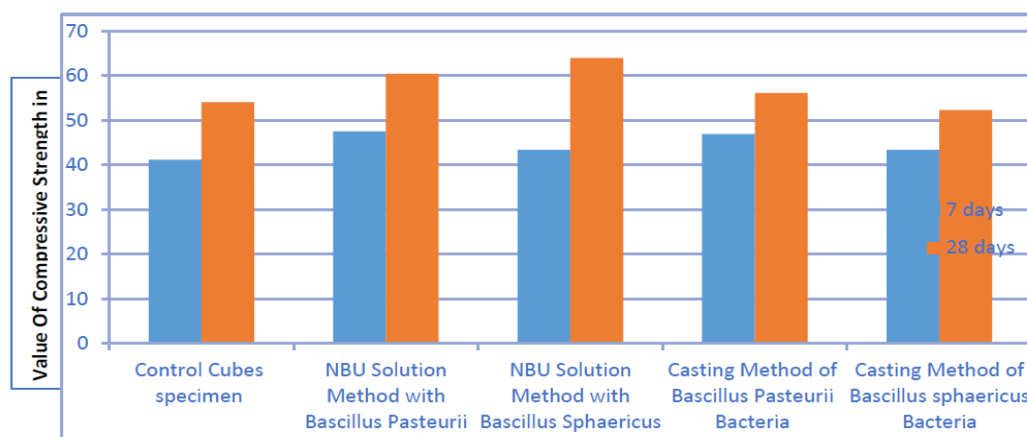
(Luo et al., 2015)

2.1.5 คุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากในโครงสร้างจริงนั้น วัตถุประสงค์ของการซ่อมแซมก็คือการฟื้นฟูความสามารถในการรับน้ำหนักได้ตามปกติ ซึ่งนักวิจัยหลายท่านได้พยายามที่จะวิเคราะห์การซ่อมแซมโดยแบคทีเรียด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

Kunal et al. (2016) ศึกษาผลของการสร้างผลึกแคลไซต์ของแบคทีเรียต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความคงทนของคอนกรีต โดยทำการใส่แบคทีเรียลงในตัวอย่างขณะผสม และงานวิจัยนี้ได้ใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ *Bacillus pasteurii* และ *Bacillus sphaericus* ซึ่งเปรียบเทียบผลของ 5 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1) การหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์และบ่มแบบปกติโดยไม่ใส่แบคทีเรีย 2) การหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์และบ่มในสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของสารอาหารแบคทีเรียอยู่ด้วยและใส่แบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* 3) การหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์บ่มปกติและใส่แบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* 4) การหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์และบ่มในสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของสารอาหารแบคทีเรียอยู่ด้วยและใส่แบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* และ 5) การหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์บ่มปกติและใส่แบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* โดยการบ่มนั้นแบ่งเป็น 2 แบบด้วยกันได้แก่ บ่ม 7 วัน และบ่ม 28 วัน โดยผลสรุปที่ได้พบว่าการผสมแบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* ลงในตัวอย่างและทำการบ่มในสารละลายซึ่งมีส่วนประกอบของสารอาหารเลี้ยงเชื้อ (Nutrient Broth Solution หรือ NBU) ซึ่งให้กำลังอัดเท่ากับ 63.99 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติพบว่าค่ากำลังรับ

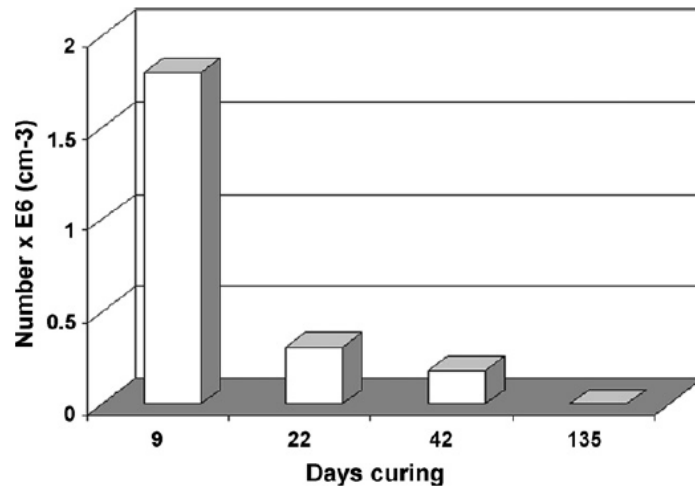
แรงอัดมากกว่าถึง 11.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้คือวิธีการบ่มซึ่งทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 2.14



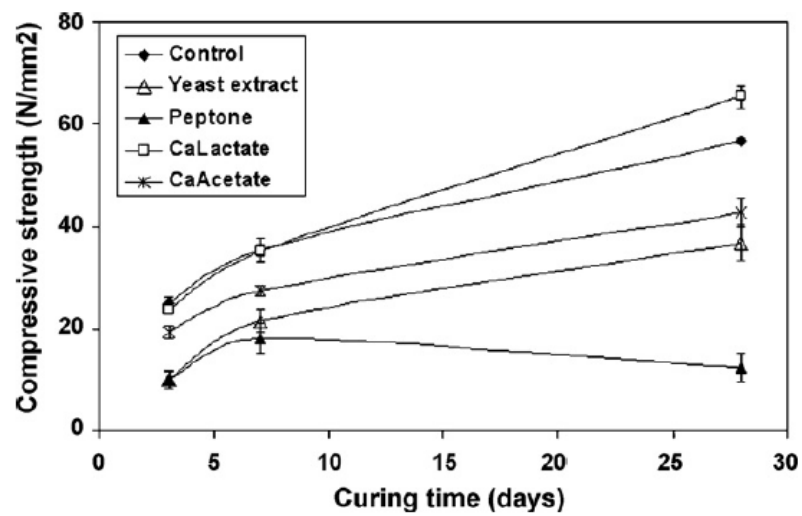
รูปที่ 2.14 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน ภายใต้เงื่อนไขการซ่อมแซมต่างๆ

(Patil et al., 2016)

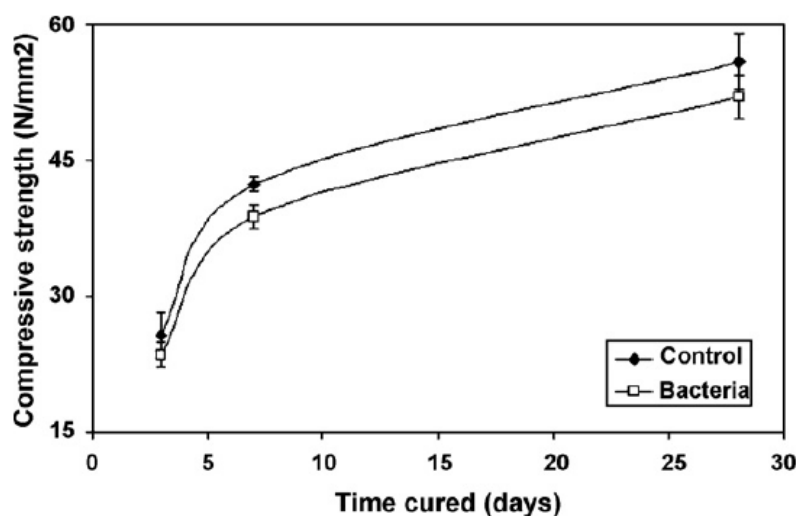
งานวิจัยต่อมาเป็นการประยุกต์ใช้แบคทีเรียในการรักษาตัวเองของคอนกรีต ซึ่ง Jonker et al. (2010) ได้อธิบายว่าในปัจจุบันมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ จึงได้มีการคิดค้นวิธีการซ่อมแซมชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเพื่อลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบคทีเรียเพื่อเพิ่มความสามารถในการรักษาตัวเองของคอนกรีต โดยใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus pseudofirmus* และ *Bacillus cohnii* ซึ่งวิธีการของงานวิจัยนี้คือการเปรียบเทียบผลของการใส่แบคทีเรียและไม่ใส่แบคทีเรีย นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงสารที่ใส่ผสมเพิ่มเข้าไปด้วย โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้คือยิ่งใช้เวลาบ่มมากจำนวนแบคทีเรียก็จะลดลงตามเวลาซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อประมาณ 135 วัน แต่ในทางกลับกันยิ่งบ่มนานขึ้นก็จะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ต่อมาในส่วนของสารอาหารที่ผสมเพิ่มลงไปนั้นพบว่า การใส่แคลเซียมแล็คเตตลงไปในตัวอย่างนั้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ และคอนกรีตที่ผสมเพียงแบคทีเรีนั้นพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะมีค่าน้อยลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งถือเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยสำหรับความรู้เรื่องการบ่มคอนกรีตที่นานเกินไปและการใส่เชื้อแบคทีเรียที่มากเกินไปก็อาจทำให้ค่ากำลังของวัสดุมีค่าลดลงได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.15, 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.15 การอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียเนื่องจากผลของระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต
(Wiktor and Jonkers, 2011)



รูปที่ 2.16 การพัฒนากำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตปกติที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์
(Wiktor and Jonkers, 2011)



รูปที่ 2.17 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากแบคทีเรีย

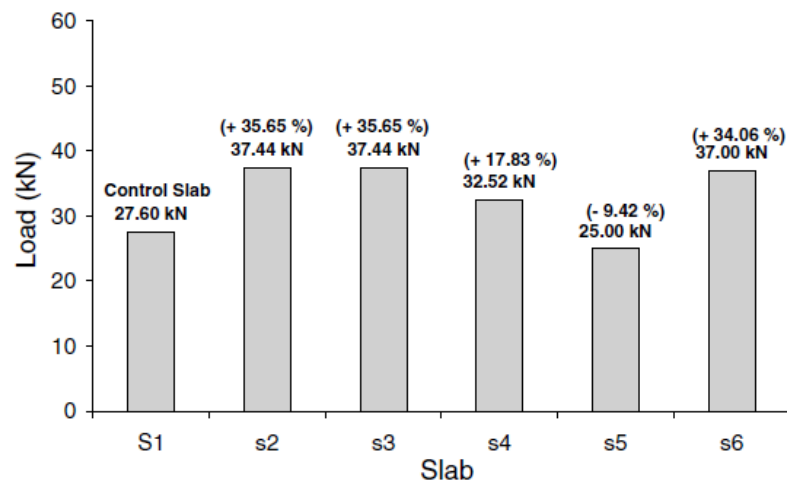
(Wiktor and Jonkers, 2011)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

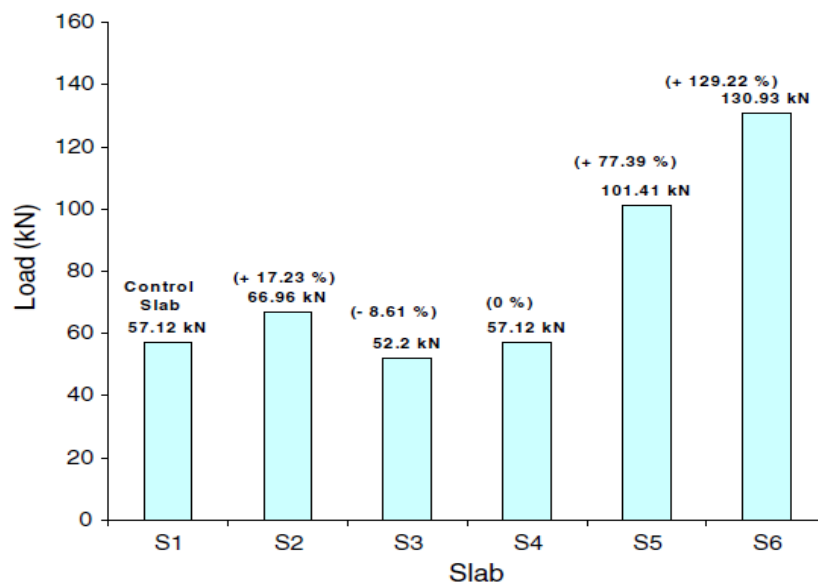
2.2.1 การซ่อมแซมและการฟื้นฟูประสิทธิภาพของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยถัดมา Thanoon et al. (2005) ได้ทำการวิจัยเพื่อเปรียบเทียบวิธีการซ่อมแซมคอนกรีตที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นไปที่ การใช้งาน กำลังของวัสดุ ความคงทนของวัสดุ และความสามารถในการยึดตัว ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 5 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การฉีดปูนซีเมนต์เกรราท์ (S2) การฉีดอิพอกซี (S3) การเสริมแรงคอนกรีตโดยใช้เส้นใย (S4) การซ่อมแซมโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลัง (S5) และการซ่อมแซมแบบขยายหน้าตัด (S6) โดยจะทำการซ่อมตัวอย่างพื้นทางเดียว แล้ววิเคราะห์การแอ่นตัว ค่าความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม แรงที่ทำให้วัสดุเกิดรอยร้าว และแรงที่ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ โดยผลสรุปที่ได้พบว่า การซ่อมแซมวัสดุเหล่านี้ทำให้พฤติกรรมของวัสดุเปลี่ยนจากพลาสติกเป็นแบบเปราะ และการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำให้สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น 60 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่ทำให้วัสดุแตกร้าวนั้นพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดปูนเกรราท์ และฉีดอิพอกซีสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวได้ถึง 35.65 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การซ่อมแซมแบบอื่นเป็นไปดังนี้ การซ่อมแซมแบบขยายหน้าตัด เพิ่ม 34.06 เปอร์เซ็นต์ การซ่อมแซมโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลัง เพิ่ม 17.83 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการซ่อมแซมแบบขยายหน้าตัดนั้นลดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าว 9.42 เปอร์เซ็นต์ ถัดมาเป็นการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกวิบัติได้ถึง 129.72 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แบบอื่น ได้แก่ การซ่อมแซมโดยการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่ม 77.39

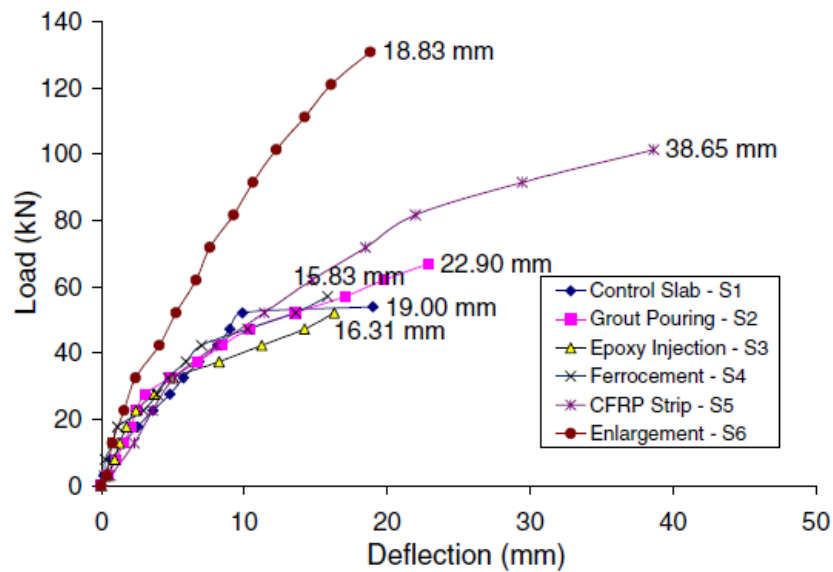
เปอร์เซ็นต์ การซ่อมแซมโดยการฉีดปูนเกรทท์เพิ่ม 17.23 เปอร์เซ็นต์ และการซ่อมแซมโดยใช้เส้นใย นั้นไม่ได้มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกวิบัติ ในขณะที่การซ่อมแซมแบบฉีดอิพอกซินั้น ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลงถึง 8.61 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาความสามารถ ในการยืดหยุ่นพบว่าการซ่อมแซมแบบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นทำให้วัสดุมีการยืดหยุ่นได้มากที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงในการเปรียบเทียบกับการรักษาโดยชีวภาพได้ ซึ่ง ผลลัพธ์ได้แสดงดังรูปที่ 2.18 ถึง รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.18 น้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวของพื้นหลังจากการซ่อมแซม
(Thanoon et al., 2005)

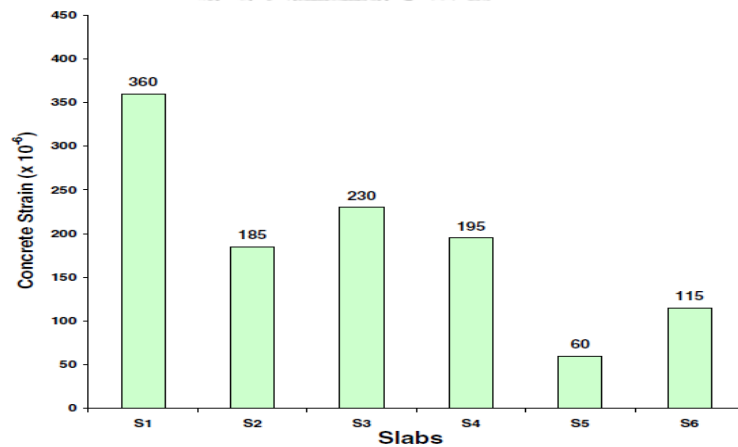


รูปที่ 2.19 น้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดของพื้นหลังจากการซ่อมแซม
(Thanoon et al., 2005)



รูปที่ 2.20 นำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการซ่อมแซม

(Thanoon et al., 2005)



รูปที่ 2.21 ความเครียดภายในคอนกรีตที่แรงอัดเท่ากับ 50 กิโลนิวตัน

(Thanoon et al., 2005)

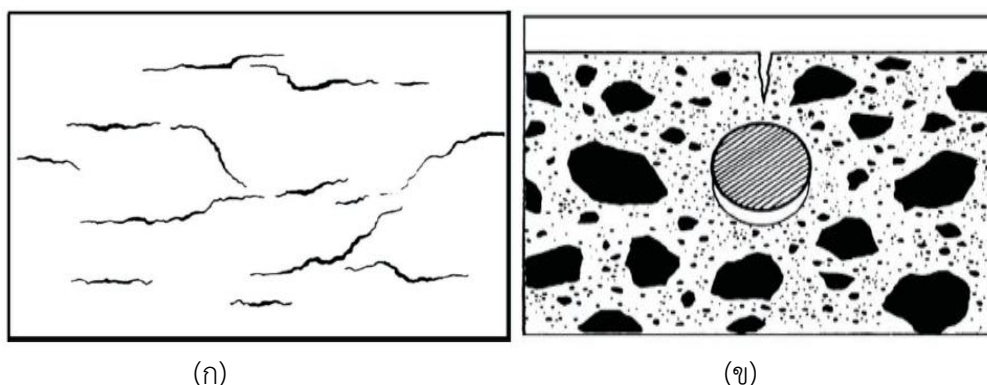
2.2.2 การฟื้นฟูคอนกรีตโดยใช้นุภาคจุลินทรีย์

Ramachandran, Ramakrishnan และ Sookie (2001) ได้ตรวจสอบผลของตัวแปรในการทดสอบของการซ่อมแซมแบบหลักการทางชีวภาพ โดยตัวแปรที่สนใจ คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์และค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ *Bacillus pasteurii* และตัวอย่างมี 2 แบบ แบบแรกคือการใส่แบคทีเรียพร้อมกับการผสมมอร์ตาร์ และแบบที่สองคือการใช้

แบบคทีเรียหลังจากการเกิดรอยร้าว ซึ่งมีการทดสอบทั้งหมด 7 การทดสอบด้วยกัน ได้แก่ 1) การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ในน้ำเกลือและฟอสเฟต 2) การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์โดยให้ปริมาณความเข้มข้นของแบบคทีเรียที่ต่างกัน 3) การทดสอบความแข็งแรงของคานมอร์ตาร์ ขนาด $2.54 \times 2.54 \times 15.2$ ซม. โดยให้ความลึกของรอยร้าวที่แตกต่างกัน 4) การทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $5.08 \times 5.08 \times 5.08$ ซม. โดยให้ความลึกของรอยร้าวที่แตกต่างกัน 5) การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และ 6) การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีดังต่อไปนี้ 1) การผสมฟอสเฟตลงในตัวอย่างความเข้มข้น 3×10^7 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้ได้ค่ากำลังอัดดีกว่าการผสมน้ำเกลือลงในตัวอย่าง 2) คลอไรด์ไอออนทำให้ค่ากำลังอัดของตัวอย่างลดลง 3) การใช้ปริมาณความเข้มข้นของแบบคทีเรียที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มกำลังอัดของตัวอย่างได้ 4) การซ่อมแซมโดยใช้แบบคทีเรานั้นจะให้ประสิทธิภาพดีที่ความลึกไม่มากเนื่องจากความลึกนั้นส่งผลต่อปริมาณออกซิเจน ซึ่งยิ่งความลึกมากปริมาณออกซิเจนก็จะมีค่าลดลงตามลำดับ 5) แคลไซต์เป็นตัวที่ช่วยประสานรอยแตกให้เข้ากันแต่ไม่ได้ช่วยในเรื่องของการพัฒนากำลังอัด

2.2.3 การประเมินสาเหตุและการซ่อมแซมรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต

Pattanaik (2011) ได้อธิบายสาเหตุของการเกิดรอยร้าวในคอนกรีตว่ามีสาเหตุดังนี้ 1). การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) ซึ่งเกิดจากการเสียน้ำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงทางอากาศและอุณหภูมิภายในคอนกรีต นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมซึ่งส่งผลปริมาณความชื้นภายในคอนกรีตระเหย 2). รอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว ซึ่งรอยร้าวจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเค้นจากการหดตัวของโครงสร้างซึ่งรอยร้าวนี้จะมีแนวลึกลงไปถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต ดังนั้นการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวจะเกิดขึ้นเร็วขึ้นเมื่อขนาดของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุการแตกร้าวอื่น ๆ เช่น การแตกร้าวเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในคอนกรีต ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงหรือการขยายตัวและการหดตัวจากอุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และสารเคมีซึ่งอาจทำให้เกิดรอยร้าว การผุกร่อนซึ่งรวมไปถึงการแข็งตัวและการละลาย การเปื่อยและการแห้ง ความร้อนและความเย็น การเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความชื้นซึ่งมีอิทธิพลต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีต รอยร้าวซึ่งเกิดจากการก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยบริเวณหน้างานก่อสร้างซึ่งกรรมกรส่วนใหญ่มักจะเติมน้ำในคอนกรีตเพื่อให้ง่ายต่อการเท แต่การใส่น้ำเข้าไปเพิ่มขึ้นนั้นทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวตามมา สุดท้ายคือรอยร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักมากเกินไปจนความสามารถซึ่งในขณะนี้ อาจหมายถึงในขณะก่อสร้างนั้น ได้ทำการถอดแบบเร็วกว่าเวลาที่เหมาะสมและทำการก่อสร้างชั้นถัดไปทันที ซึ่งในขณะนั้นโครงสร้างด้านล่างยังไม่สามารถรับน้ำหนักได้เต็มประสิทธิภาพ



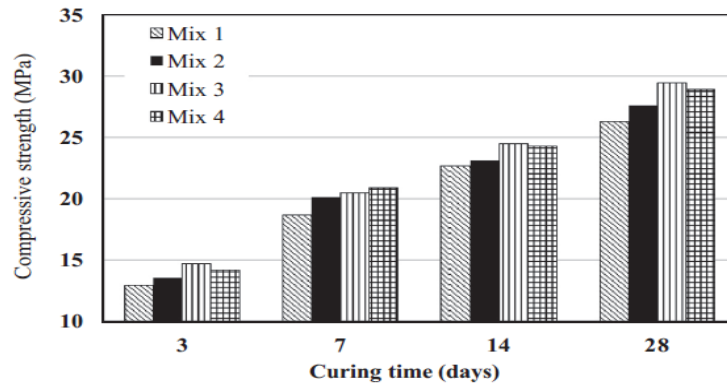
รูปที่ 2.22 (ก) การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก และ (ข) รอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว
(Pattanaik, 2011)

2.2.4 การซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีตด้วยวิธีทางชีวภาพที่แตกต่างกัน

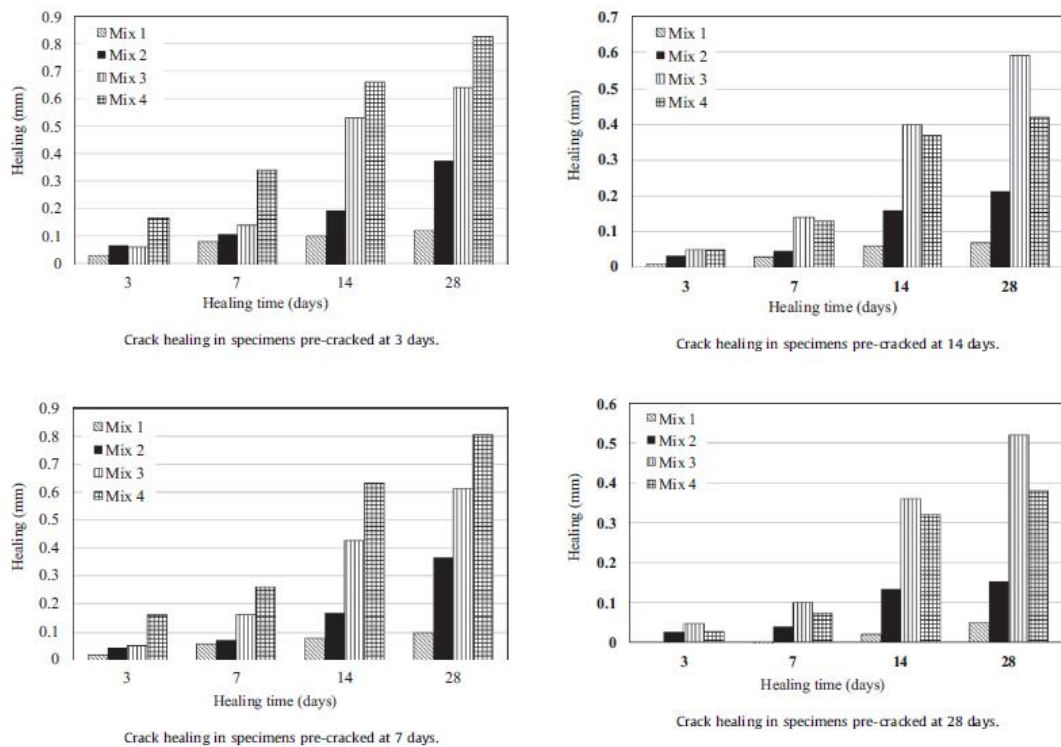
Khaliq (2015) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการผสมเชื้อแบคทีเรียลงในคอนกรีตขณะผสม เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางการซ่อมแซมด้วยตนเอง (Self-healing) โดยงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยแบคทีเรียชนิดบาซิลลัส ซับทิลลิส (*Bacillus subtilis*) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสารที่ใช้ในการการห่อหุ้มเชื้อแบคทีเรียเมื่ออยู่ในคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไขด้วยกัน ได้แก่ 1). คอนกรีตปกติ ซึ่งไม่ได้ผสมเชื้อแบคทีเรียอยู่ใน 2). คอนกรีตผสมเชื้อแบคทีเรียโดยตรงซึ่งไม่ได้ห่อหุ้มด้วยสารใดๆ 3). คอนกรีตผสมเชื้อแบคทีเรียซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยมวลรวมเบา (Lightweight aggregates) และ 4). คอนกรีตผสมเชื้อแบคทีเรียซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยแกรไฟท์ นาโน แพลทเลท (Graphite Nano Platelets) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการรักษารอยร้าวด้วยวิธีแบคทีเรีย ซึ่งประกอบไปด้วย ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรีย สารห่อหุ้ม อายุของเชื้อแบคทีเรีย สารกระตุ้น และวิธีการผสมเชื้อแบคทีเรียลงในคอนกรีต โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบคือคอนกรีตที่ให้กำลังอัดมากที่สุดคือคอนกรีตที่บ่มเป็นเวลา 28 วัน และเงื่อนไขที่ให้กำลังรับแรงอัดมากที่สุด และน้อยที่สุดคือ คอนกรีตผสมเชื้อแบคทีเรียซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยมวลรวมเบา (Lightweight aggregates) และ คอนกรีตปกติ ซึ่งไม่ได้ผสมเชื้อแบคทีเรียอยู่ใน ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.23

ต่อมาคือการศึกษาประเมินผลประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยแบคทีเรียที่เงื่อนไขการบ่มที่เวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 3, 7, 14 และ 28 วัน และเงื่อนไขการสร้างรอยร้าวที่เวลาต่างกัน ได้แก่ 3, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งผลสรุปที่ได้คือ การซ่อมแซมที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.83 มิลลิเมตร คือ

เงื่อนไขการสร้างรอยร้าวที่คอนกรีตอายุ 3 วัน และบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน โดยคอนกรีตที่ใช้ใช้นั้นคือ คอนกรีตผสมเชื้อแบคทีเรียซึ่งถูกทอหุ้มด้วยแกรไฟท์ นาโน แพลทเลต (Graphite Nano Platelets) ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด
(Khaliq and Ehsan, 2016)



รูปที่ 2.24 ผลการประเมินผลประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยแบคทีเรีย
(Khaliq and Ehsan, 2016)

2.2.5 การจำแนกขนาดรอยร้าว

ชนิดของรอยร้าวนั้นเป็นการบ่งบอกถึงระดับความอันตรายของโครงสร้าง ซึ่งลักษณะของรอยร้าวจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการวิบัติของโครงสร้าง จึงได้มีการจำแนกขนาดของรอยร้าวเพื่อทำการพิจารณาหาวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวที่เหมาะสมต่อขนาดรอยร้าวต่างๆได้อย่างถูกต้อง โดยวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมนั้นก็คือการจำแนกรอยร้าวด้วยความกว้างของขนาดรอยร้าว ซึ่งง่ายต่อการทำงานและการใช้เครื่องมือที่สะดวก โดยการจำแนกขนาดรอยร้าวเป็นไปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกขนาดรอยร้าวโดยใช้เกณฑ์ความกว้าง

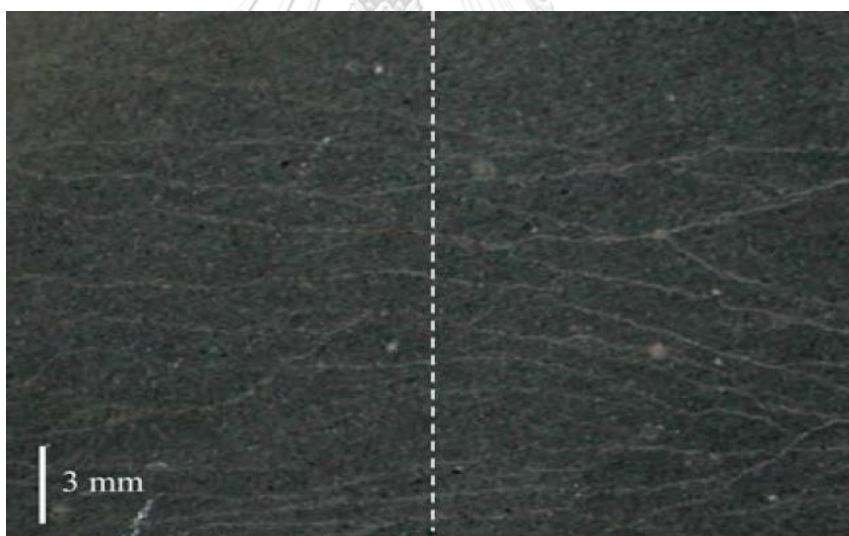
ลักษณะ	ความกว้าง (มม.)	ความชัดเจน	ผลกระทบของรอยแตก ตามขวาง
Hair cracks or very fine cracks	0.05 – 0.1	สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อคอนกรีตมีลักษณะแห้ง และสามารถเห็นได้โดยมีแสงตกกระทบ	ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน
Fine cracks	0.1 – 0.3	สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า	ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ยกเว้นในกรณีที่ได้รับสารอย่างรุนแรง
Medium to wide cracks	0.3 – 1.0	เห็นได้ชัด สามารถเห็นรอยร้าวได้ทั้งสองมุม	ส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีต เนื่องจากการกัดกร่อน
Wide to very wide cracks	> 1.0	สามารถมองเห็นรอยแตกได้อย่างชัดเจนทั้งสองด้าน และควรประมาณค่าความกว้างของรอยแตก	เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง เนื่องจากความชื้นที่เข้าไปทำการกัดกร่อนต่อเหล็กเสริมภายในโครงสร้างเป็นอย่างมาก

(Pullar-Strecker, 2002)

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยในอดีตส่วนหนึ่งพบว่ารอยร้าวขนาด 0.1 – 0.3 มม. สามารถก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้เช่นกัน โดยในมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน ได้ทำการแบ่งประเภทความอันตรายโดยพิจารณาถึงผลของระยะหุ้มคอนกรีต ดังนั้นรอยร้าวขนาดเล็กอาจส่งผลต่อการเกิดสนิมหากระยะหุ้มคอนกรีตนั้นต่ำ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2555)

2.2.6 การประเมินผลการซ่อมแซมโดยใช้การทดสอบการซึมน้ำ

Mustafa (2009) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อ อิทธิพลของรอยร้าวขนาดเล็กต่อการซึมน้ำโดยใช้คอนกรีตประเภท Engineered Cementitious Composite (ECC) ซึ่งมีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 60% ใยลวดใยแก้ว 10.44% และทรายซิลิกาซึ่งมีขนาดเฉลี่ยและขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 110 และ 200 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคอนกรีต 2 ชนิด ได้แก่ คอนกรีต ECC ซึ่งผสมสารป้องกันการซึมน้ำ และคอนกรีต ECC ซึ่งไม่มีสารป้องกันการซึมน้ำ โดยอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีที่ว่าความคงทนของคอนกรีตนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมน้ำของคอนกรีต เนื่องจากความชื้นสามารถซึมผ่านเข้าไปถึงชั้นของเหล็กเสริมภายในโครงสร้าง และทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นกลายเป็นสนิม ทำให้ความคงทนของโครงสร้างลดลง ดังนั้นการทดสอบจึงเริ่มจากการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcrack) เพื่อจำลองรอยร้าวบนโครงสร้างจริงโดยรอยร้าวที่ทำการสร้างขึ้นนั้นมีขนาดน้อยกว่า 80 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.25 โดยวิธีการสร้างรอยร้าวนั้นทำได้โดยหล่อตัวอย่างคานขนาด 75 x 75 x 50 มม. หลังจากนั้นทำการสร้างรอยร้าวโดยวิธีกัด 4 จุดเพื่อสร้างแรงดัดบริเวณกลางคาน จากนั้นรอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณผิวด้านที่รับแรงดัด

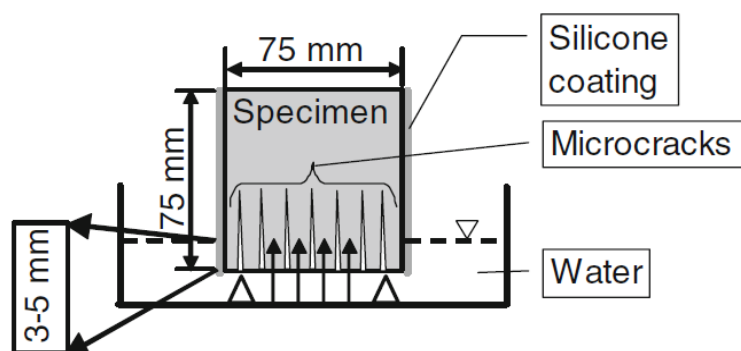


รูปที่ 2.25 รูปแบบรอยร้าวทั่วไปบนผิวด้านรับแรงดึงของคาน ECC

(Şahmaran and Li, 2009)

หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ECC ที่ใส่สารป้องกันการซึมน้ำนั้นมีค่ามากกว่าคอนกรีต ECC ที่ไม่ได้ใส่สารป้องกันการซึมน้ำ โดยงานวิจัยนี้ได้ให้เหตุผลว่าเนื่องจากการใส่สารผสมเพิ่มนั้นทำให้คอนกรีตมีสภาพหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ค่ากำลังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ต่อมาเป็นการทดสอบการซึมน้ำ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test)

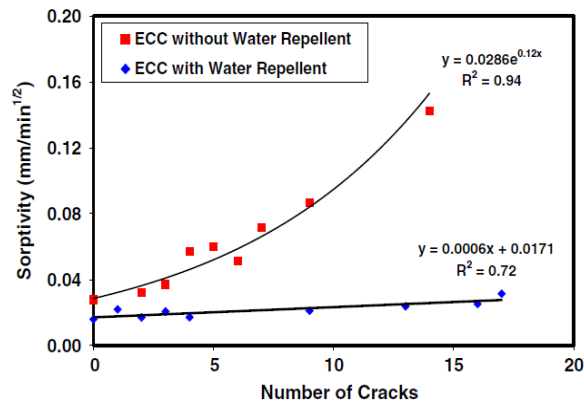
ตามมาตรฐาน ASTM C1585 และการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption) ตามมาตรฐาน ASTM C642 ซึ่งทั้งสองวิธีนั้นเป็นการวัดความสามารถในการซึมผ่านน้ำทั้งสิ้น โดยวิธีแรกใช้สำหรับการหาอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตโดยวัดจากการเพิ่มขึ้นของมวลแห้ง โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาเมื่อผิวด้านใดด้านหนึ่งของตัวอย่างสัมผัสกับน้ำ ซึ่งลักษณะการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 2.26



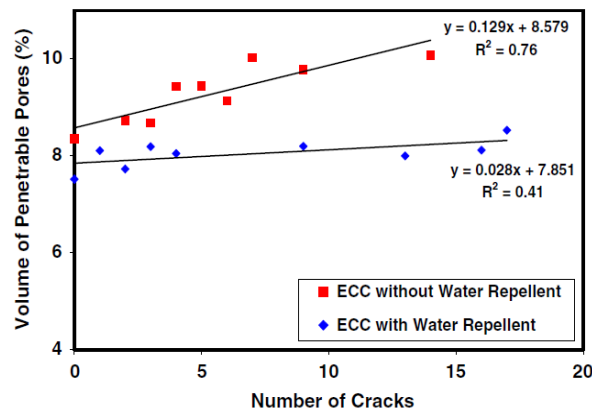
รูปที่ 2.26 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Sorptivity Test)

ต่อมาวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water absorption test) เป็นการหาค่าความพรุนภายในคอนกรีต ซึ่งวิเคราะห์โดยการนำเอาร้อยละของน้ำที่ถูกดูดซึมส่วนด้วยมวลแห้งของคอนกรีต ซึ่งวิธีการทดสอบนั้นเริ่มจากการนำเอาตัวอย่างไปอบ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำไปแช่น้ำและนำขึ้นมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.5% ของน้ำหนักที่มากที่สุด

โดยผลสรุปของงานวิจัยนี้คือการดูดซึมน้ำของจะมีค่าสูงมากเมื่อจำนวนรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้นบนผิวของตัวอย่างคอนกรีต ECC ซึ่งผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ และการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต เป็นไปดังรูปที่ 2.27(ก) และ 2.28(ข)



(ก)

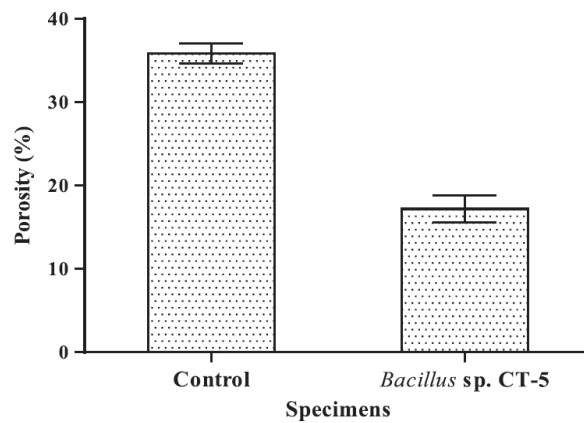


(ข)

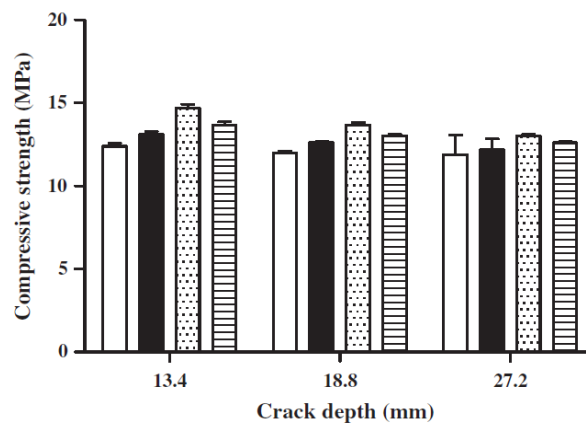
รูปที่ 2.27 (ก) ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำและ (ข) ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
(Şahmaran and Li, 2009)

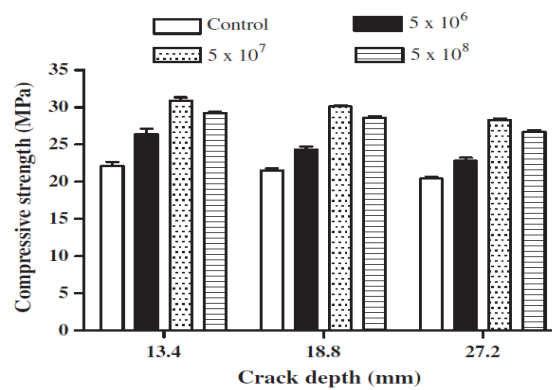
นอกจากนั้นแล้วยังมีงานวิจัยของ Achal et al. (2013) ซึ่งได้ศึกษาการรักษารอยร้าวโดยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* โดยสามารถรักษารอยร้าวโดยการผสมเชื้อแบคทีเรียลงในส่วนผสมมอร์ตาร์ ซึ่งความลึกที่สามารถซ่อมแซมได้อยู่ที่ 27.2 มิลลิเมตร และนอกจากนั้นยังพบว่าสามารถเพิ่มกำลังอัดให้กับตัวอย่างได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งนี้เหตุผลที่กำลังรับแรงอัดมากขึ้นนั้นมาจากรูพรุนภายในที่น้อยลงเนื่องจากการเติมเต็มรูพรุนโดยเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29 (Achal et al., 2013)



รูปที่ 2.28 ปริมาณความพรุนของตัวอย่างที่ผสมเชื้อแบคทีเรียเทียบกับตัวอย่างปกติ (Achal et al., 2013)



(ก) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข)

รูปที่ 2.29 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ (ก) บ่ม 7 วัน และ (ข) บ่ม 28 วัน ที่ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียต่างๆ

(Achal et al., 2013)

2.2.6 การซ่อมแซมโดยการรักษาจากภายนอก

Alan et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้วิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากภายนอก โดยใช้เทคนิคการฉีดซิลิโคนเป็นแนวรอบบริเวณรอยร้าว เพื่อทำการป้องกันเชื้อและสารอาหารให้ท่วมบริเวณรอยร้าวไม่ให้ไหลออกด้านข้าง โดยทำการเตรียมสารละลายซึ่งประกอบไปด้วยอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร แคลเซียมคลอไรด์ 50 มิลลิลิตร และเชื้อแบคทีเรีย 100 มิลลิลิตร โดยทำการเตรียมสารละลายยูเรียแยกไว้อีกหนึ่งภาชนะ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพขึ้น โดยวิธีการหยอดนั้นเริ่มจากการหยอดสารละลาย 15 มิลลิลิตร จากนั้นตามด้วยยูเรีย 1.5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำซ้ำแบบเดิมทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การซ่อมแซมรอยร้าวบริเวณคานโดยใช้วิธีการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

(Alan Richardson et al., 2016)

เช่นเดียวกับ Kumar et al. (2013) ซึ่งได้ทำการสร้างรอยร้าวกว้าง 3 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เสียบไปขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัว จากนั้นดึงออกเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง โดยลักษณะการซ่อมแซมจะทำการล้อมรอบบริเวณรอยร้าวโดยใช้ยาง ซึ่งผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะเริ่มเห็นชัดเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน สำหรับแบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* และ 8 วันสำหรับแบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* ซึ่งผลสรุปที่ได้พบว่าการใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* นั้นสามารถทำการรักษาได้เร็วกว่า ดังภาพที่ 2.31 และ 2.32



รูปที่ 2.31 การติดตั้งยางเพื่อกักเก็บเชื้อและสารอาหารสำหรับการหมัก
(Jagadeesha Kumar et al., 2013)



รูปที่ 2.32 การหมักนมรยร้าวโดยใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus pasteurii* และ *Bacillus sphaericus*

(Jagadeesha Kumar et al., 2013)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนของงานวิจัย เพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่อธิบายไว้ในบทที่ 1 โดยลำดับการทำงานจะเริ่มตั้งแต่การวางแผนการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ การสร้างรอยร้าวเพื่อใช้ในการรักษาโดยแบคทีเรีย การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และการสรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 กรณีด้วยกัน ได้แก่ 1) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีรอยร้าว (Control specimens) 2) ตัวอย่างมอร์ตาร์ในขณะเกิดรอยร้าว (Cracked specimens) เพื่อการจำลองตัวอย่างพฤติกรรมในกรณีที่โครงสร้างเกิดรอยร้าว และ 3) ตัวอย่างมอร์ตาร์ซึ่งใช้แบคทีเรียชนิดบาซิลลัส สเฟอริกัส (*Bacillus sphaericus*) เป็นตัวซ่อมแซมรอยร้าว (Treated Specimens) จากนั้นทำการประเมินผลการทดสอบและสรุปผล ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนได้ทำการอธิบายไว้ในขั้นตอนถัดไป

3.2 การทดสอบ

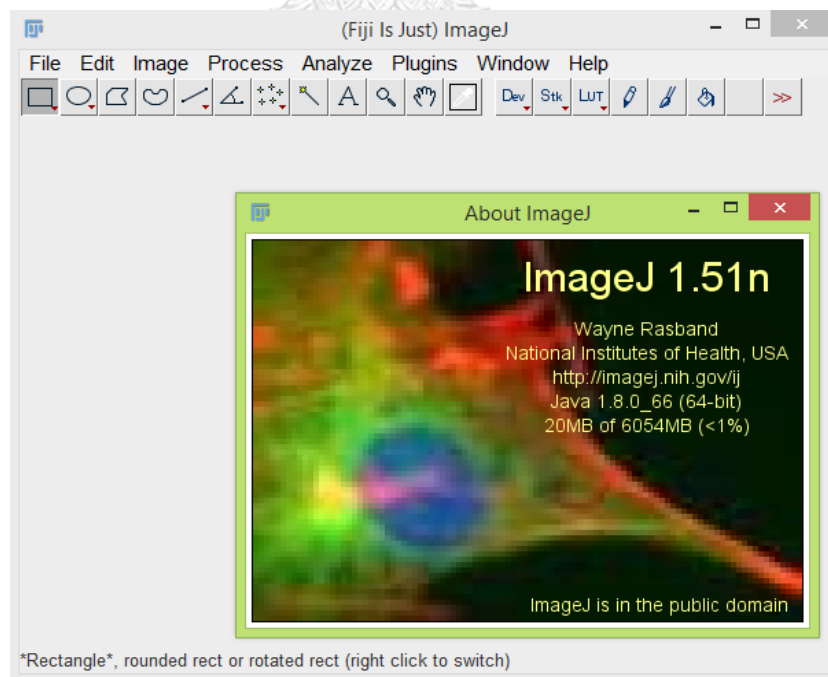
3.2.1 การประเมินผลด้วยสายตา

การประเมินผลด้วยสายตานั้นเป็นการประเมินผลที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือการใช้เครื่องมือช่วย เช่น แว่นขยายที่มีกำลังขยาย 40 หรือ 80 เท่าเป็นต้น ซึ่งลักษณะของการทดสอบนี้จะเป็นการสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของรอยแตกร้าวที่บริเวณผิว ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปการรักษารอยร้าวก็จะเริ่มสมบูรณ์ขึ้นจนเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลง ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงก็คือจะเริ่มเห็นผลึกแคลไซต์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ลักษณะเป็นแถบสีขาวคล้ายผลึกเกลือ โดยทำการเก็บบันทึกผลโดยการถ่ายภาพกำลังขยาย 40 เท่า ด้วยอุปกรณ์เสริมซึ่งใช้งานกับโทรศัพท์ทั่วไป ซึ่งเรียกว่า CU Smart lens โดยเป็นผลงานนวัตกรรมจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศาสตราจารย์ ดร. สนอง เอกสิทธิ์ (เอกสิทธิ์, 2017) ดังรูปที่ 3.1 โดยหลังจากทำการถ่ายรูปด้วย ซิยูสมาร์ทเลนส์ เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำมาเข้าโปรแกรมที่ชื่อว่า ImageJ ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ของ เวย์น ราสแบนด์ จากสถาบันสุขภาพแห่งชาติของประเทศสหรัฐอเมริกา (Rasband et al., 1997) ซึ่งลักษณะของโปรแกรมนี้เป็นไปดังรูปที่ 3.2 และตัวอย่างการวัดขนาดพื้นที่รอยร้าวเป็นไปดังรูปที่ 3.3 ซึ่งวิธีการของการทดสอบโดยสรุปเป็นไปดังนี้

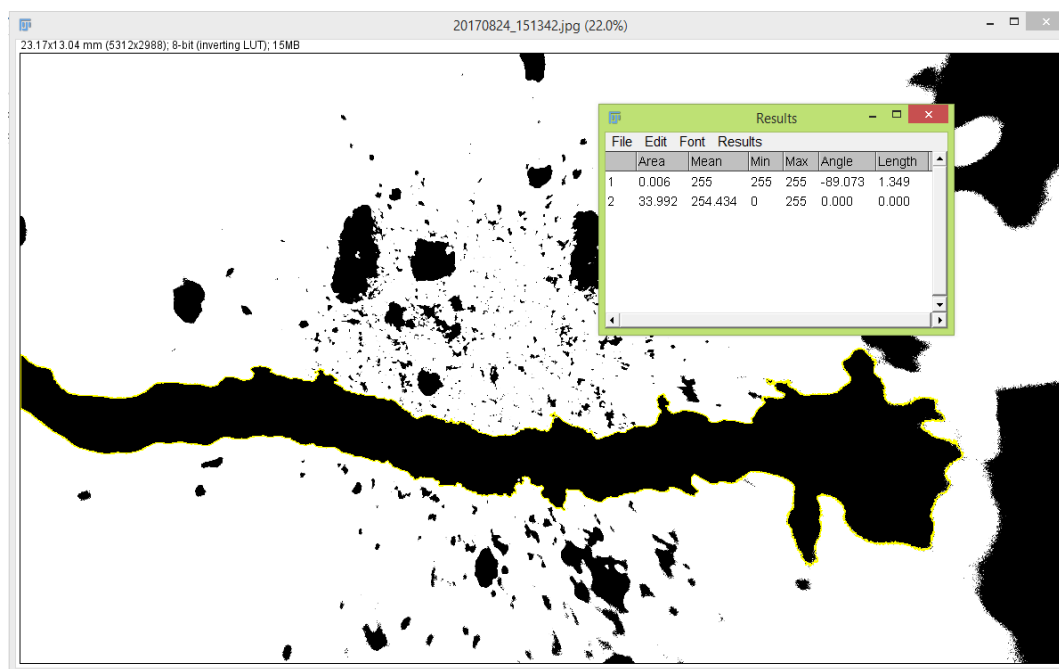
- 1). เตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้จะเป็นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน
- 2). สร้างรอยแตกกร้าวแต่ละตัวอย่าง
- 3). ทำการซ่อมแซมโดยใช้แบคทีเรีย และสารอาหาร
- 4). ประเมินผลที่เกิดขึ้นทุก 1 วัน จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการซ่อมแซมอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำมาสรุปผลการซ่อมแซม



รูปที่ 3.1 ซียูสมาร์ทเลนส์ (CU Smart Lens)
(เอกสิทธิ์, 2017)



รูปที่ 3.2 ซอฟต์แวร์อิมเมจ เจ (ImageJ)
(Rasband et al., 1997)



รูปที่ 3.3 การวัดพื้นที่รอยร้าวด้วยซอฟต์แวร์ Image J

3.2.2 การทดสอบคลื่นอัลตราโซนิค

การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิค หรือ Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) ซึ่งเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal wave) มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบหารูพรุนภายในตัวอย่าง และติดตามผลการซ่อมแซมรูพรุนภายในตัวอย่างโดยไม่ทำลาย ซึ่งนิยมใช้ความถี่ประมาณ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้คลื่นอัลตราโซนิคสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในของเหลวและวัสดุแข็งทางวิศวกรรมทั่วไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (v) ความถี่ (f) และความยาวคลื่น (λ) จะเป็นไปตามสมการ $v = f\lambda$ ตามมาตรฐาน ASTM C597-09 (ASTM, 2009)

โดยอุปกรณ์สำหรับการทดสอบนั้นประกอบไปด้วย

- 1) ชุดอุปกรณ์ทดสอบ พันดิท (Pundit) ซึ่งประกอบไปด้วย
 - 1.1) เครื่องวัดและแปลงสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิค
 - 1.2) หัวรับส่งคลื่นตามยาวอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ 1 คู่
 - 1.3) แท่งโลหะมาตรฐานใช้สำหรับการปรับแก้ (Calibrate) เครื่องวัดก่อนการทดสอบ
- 2) เจลหรือจารบี
- 3) เทปหรือสายวัด

โดยวิธีการทดสอบนี้จะอาศัยหลักการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกผ่านเข้าไปในตัวกลางตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจากนั้นทำการวัดเวลาที่คลื่นส่งจากหัวส่งไปยังหัวรับ ซึ่งหากคลื่นเคลื่อนที่ไปพบรอยแตกหรือช่องว่างภายในตัวอย่างคลื่นนั้นจะหาทางที่ใกล้เคียงเพื่อไปให้ถึงเป้าหมายทำให้ระยะเวลาช้าลงกว่าปกติ โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งไม่มีรอยแตกร้าว โดยขั้นตอนการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก เป็นไปดังนี้

1) ทำการประกอบชุดอุปกรณ์ทดสอบ Pundit และหาจากรบิที่หัวรับส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ทั้งคู่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างหน้าผิวสัมผัส

2) ทำการปรับแก้ (Calibrate) เครื่องก่อนเริ่มทำการทดสอบ โดยนำเอาทรานสดิวเซอร์ทั้ง 2 มาประกบกันเพื่อตั้งค่าให้เท่ากับก่อน แล้วจึงนำมาประกบกับแท่งปรับแก้ (Calibrate) จากนั้นอ่านค่าและบันทึกเวลาที่ได้จริง ซึ่งเวลาที่ประกบกับแท่งปรับแก้ นั้นจะต้องเท่ากับ 0.26 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ผู้ผลิตได้ทำการคำนวณมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานกับก้อนตัวอย่าง

3) นำเอาหัวรับส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ทั้ง 2 ตัว วางแนบกับผิวหน้าตัวอย่างที่ต้องการจะทดสอบโดยให้อยู่ภายในระยะความลึกของรอยร้าว 2 เซนติเมตร เพื่อที่จะหาค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างที่ทดสอบจากสมการด้านล่าง โดยในระหว่างการทดสอบนั้นให้ทำการหาจากรบิหรือเจลเพื่อให้ผิวสัมผัสเรียบเนียนทำให้คลื่นอัลตราโซนิกนั้นสามารถส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$v = L/t \quad (3-2)$$

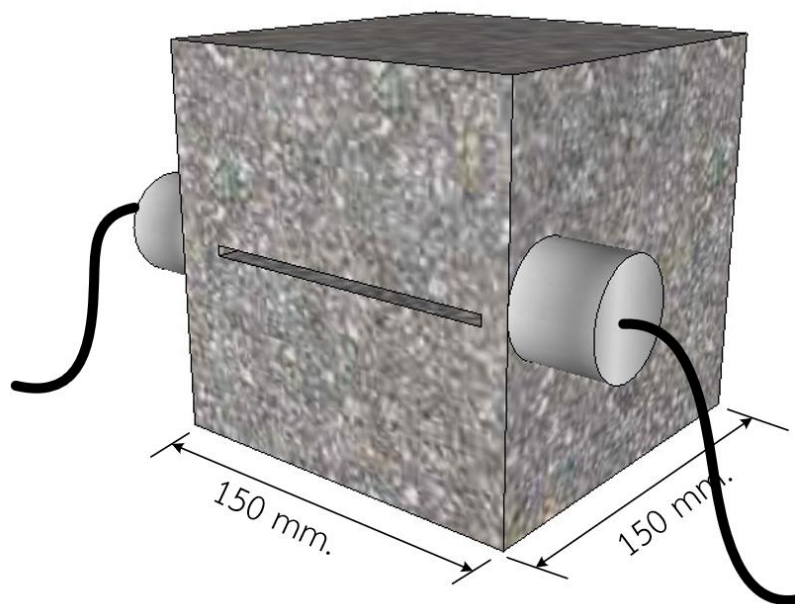
เมื่อ v = ความเร็วคลื่น (กิโลเมตรต่อวินาที)

L = ระยะห่างของหัวรับส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (มิลลิเมตร)

T = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (มิลลิวินาที)

4) ทำการอ่านและบันทึกค่าความเร็วที่วัดได้

ซึ่งลักษณะของเครื่องทดสอบคลื่นอัลตราโซนิก แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

3.2.3 การประเมินผลโดยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

การประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักนั้น เกิดขึ้นจากสมมติฐานที่ว่าตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะมีน้ำหนักของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งทำให้น้ำหนักของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างที่เกิดรอยร้าว โดยขั้นตอนการทดสอบนั้นเริ่มจากการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นภายในตัวอย่างลดลง หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งเป็นน้ำหนักแห้งก่อนซ่อมแซม (W_p) ต่อมาทำการซ่อมแซมตัวอย่างโดยใช้เชื้อแบคทีเรียที่เตรียมไว้ จนกระทั่งกระบวนการซ่อมแซมเสร็จสิ้นหลังจากนั้นทำการอบตัวอย่างหลังการซ่อมแซมอีก 24 ชั่วโมง เพื่อชั่งน้ำหนักแห้งหลังการซ่อมแซม (W_f) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดถือเป็นตัวแปรสำคัญที่จะสามารถใช้ทำการชี้วัดว่า การรักษาโดยใช้แบคทีเรียนั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด โดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 ซึ่งแบ่งตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

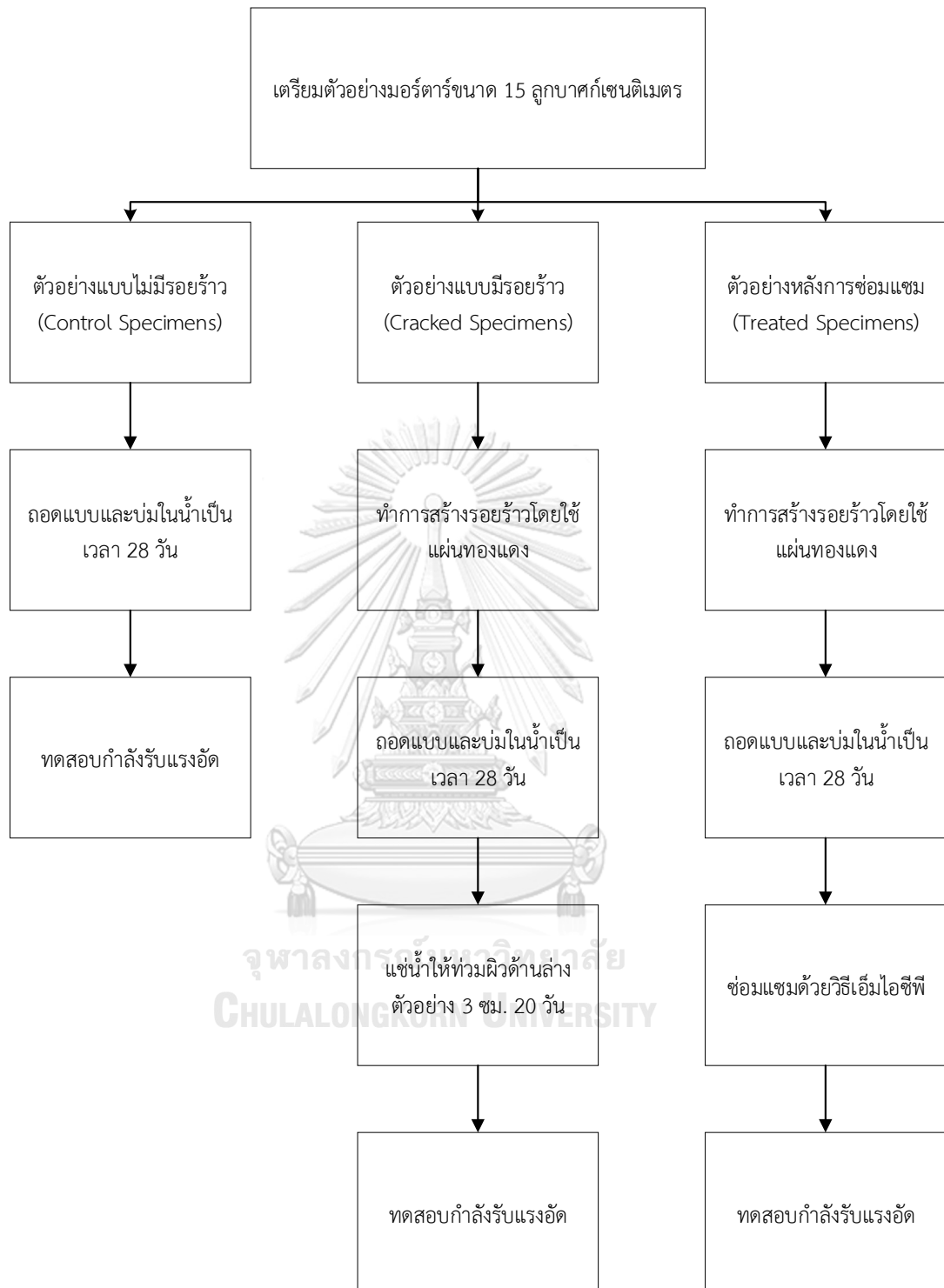
ตัวอย่างชุดแรก เรียกว่า กำลังอัดในขณะที่ตัวอย่างไม่มีรอยร้าว (Control Compressive Strength; f'_c) ตัวอย่างในชุดนี้จะทำการทดสอบทันทีหลังจากการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างมอร์ตาร์เกิดการวิบัติ โดยใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ย และสรุปกำลังอัดที่ได้

ตัวอย่างชุดที่สองคือ กำลังอัดในขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยร้าว (Cracked Compressive Strength; f'_{cr}) ผู้วิจัยได้ทำการสร้างรอยร้าวขณะหล่อตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยการสร้างรอยร้าวนั้นสามารถสร้างได้โดยนำแผ่นทองแดงหนา 0.4 มิลลิเมตร เสียบลงไปขณะหล่อตัวอย่างด้วยความลึก 20 มิลลิเมตร และความยาว 120 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและนำแผ่นทองแดงออก จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน

ตัวอย่างชุดที่สาม คือ กำลังอัดของตัวอย่างหลังทำการซ่อมแซมโดยใช้แบคทีเรีย (Treated Compressive Strength; f'_{ct}) ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในชุดนี้จะคล้ายกับการเตรียมตัวอย่างในชุดที่สอง เพียงแต่ตัวอย่างในชุดนี้นั้นหลังจากทำการสร้างรอยร้าวเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำตัวอย่างที่ได้ไปซ่อมแซมโดยการหยอดเชื้อแบคทีเรีย (ซึ่งจะกล้วในหัวข้อถัดไป) หลังจากทำการซ่อมแซมเสร็จสิ้นแล้วก็จะนำตัวอย่างมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดอีกครั้ง ซึ่งค่ากำลังอัดที่ได้นั้นจะเป็นกำลังอัดที่ได้หลังจากการซ่อมแซม ซึ่งใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง

การบ่มตัวอย่างทำได้โดยแช่ตัวอย่างลงในน้ำสะอาด โดยให้น้ำท่วมตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นมาจากภาชนะและเช็ดผิวให้แห้งจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อมูลกำลังรับแรงอัดของทั้ง 3 ชุด โดยผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากตัวอย่างชุดที่ 3 (f'_{ct}) จะมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในชุดที่ 2 (f'_{cr}) และมีโอกาสที่กำลังอัดในชุดที่ 3 จะเทียบเท่ากับกำลังอัดที่ได้จากตัวอย่างในชุดที่ 1 (f'_c) ซึ่งหมายความว่า การซ่อมแซมด้วยแบคทีเรียนั้นสามารถฟื้นฟูกำลังอัดได้ ซึ่งแผนผังการทดสอบกำลังรับแรงอัดอย่างง่าย ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 และเครื่องมือทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดสอบกำลังรับแรงอัด



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.6 รูป (ก) เครื่องผสมมอร์ตาร์ และรูป (ข) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

3.2.5 การทดสอบความสามารถในการซึมน้ำ

การทดสอบการซึมผ่านน้ำจะทำการทดสอบ 2 แบบด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบหาระยะการซึมน้ำ (Water Permeability Test) โดยวิธีการทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน DIN 1048 part 5 (1991) และการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test) ซึ่งวิธีการทดสอบได้ดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1585 (2004) รายละเอียดของการทดสอบทั้งสองวิธีมีดังต่อไปนี้

3.2.5.1 การทดสอบหาระยะการซึมน้ำ (Water Permeability Test)

การทดสอบหาระยะการซึมน้ำทำได้โดยใช้ชุดทดสอบการซึมน้ำ ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งทำการทดสอบโดย นำตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตรมาติดตั้งในแต่ละช่อง จากนั้นปล่อยน้ำผ่านสายยางลงด้านบนของตัวอย่างโดยปรับแรงดันน้ำเท่ากับ 0.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 5 บาร์ โดยทำการอัดน้ำลงบนตัวอย่างเป็นเวลา 1 วันด้วยกัน หลังจากทำการอัดน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการผ่าซีกเพื่อการวัดระยะความลึกของน้ำที่ซึม โดยในการทดสอบนี้จะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ตัวอย่างชุดที่ 1 คือตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 คือตัวอย่างที่มีรอยร้าว และกลุ่มตัวอย่างที่ 3 คือกลุ่มตัวอย่างหลังการซ่อมแซม



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 (ก) ชุดเครื่องมือทดสอบหาระยะการซึมน้ำ และ (ข) ขณะทำการทดสอบ

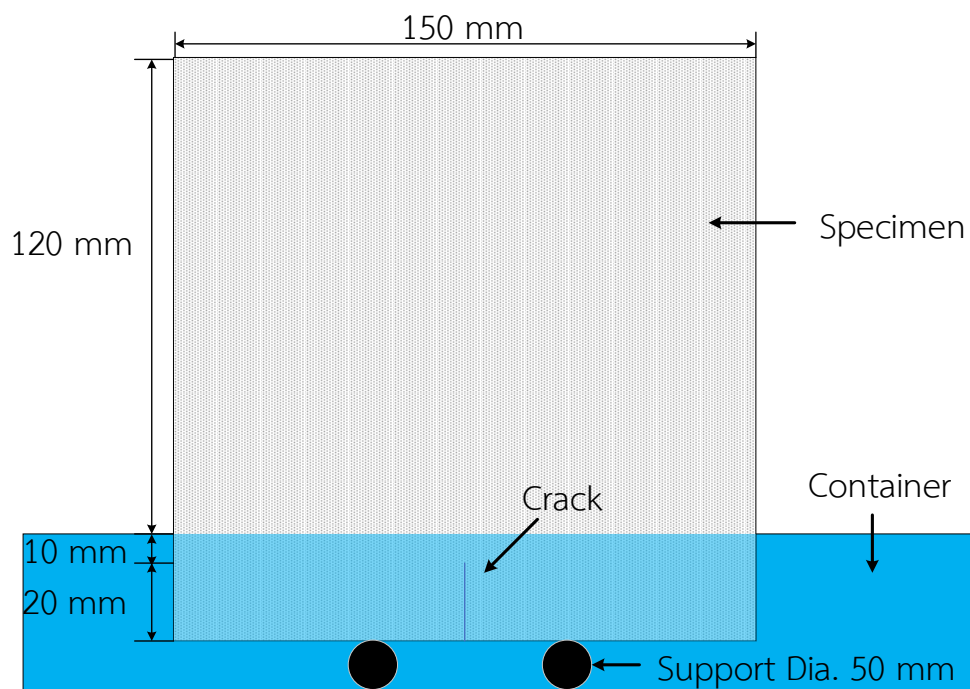
3.2.5.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Sorptivity Test)

การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำทำได้โดยการเตรียมลาดหรือภาชนะ โดยให้ระดับน้ำสูงกว่าผิววัดตูด้านล่าง 3 เซนติเมตร ขั้นตอนแรกทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างหมดไป หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักครั้งแรก ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักแห้ง (W_1) ต่อมานำเอาตัวอย่างไปทำการแช่น้ำดังรูปที่ 3.9 และนำขึ้นมาชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที จนกระทั่งน้ำหนักเริ่มคงที่ ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักเปียก (W_2) หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ (Sorptivity; S) ซึ่งค่านี้บ่งบอกถึงรูพรุนของตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาดังนี้

$$S = \frac{W_2 - W_1}{Ad\sqrt{t}} \quad (3-1)$$

เมื่อ S คือ ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Sorptivity; มิลลิเมตร)

- W_1 คือ น้ำหนักแห้ง (Dry Weight; กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักเปียก (Wet Weight; กรัม)
 t คือ เวลาที่ตัวอย่างแช่อยู่ในน้ำ (นาที)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดด้านล่างที่สัมผัสกับน้ำ (ตารางมิลลิเมตร)
 d คือ ความหนาแน่นของน้ำ



รูปที่ 3.9 รายละเอียดการทดสอบการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยข้อดีของวิธีการทดสอบการดูดซับน้ำ (Sorptivity Test) คือเป็นการจำลองการซึมผ่านของน้ำแบบธรรมชาติ และสามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่ถูกเจาะออกมาจากโครงสร้างจริง (Pitroda et al., 2013)

3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการทดสอบ

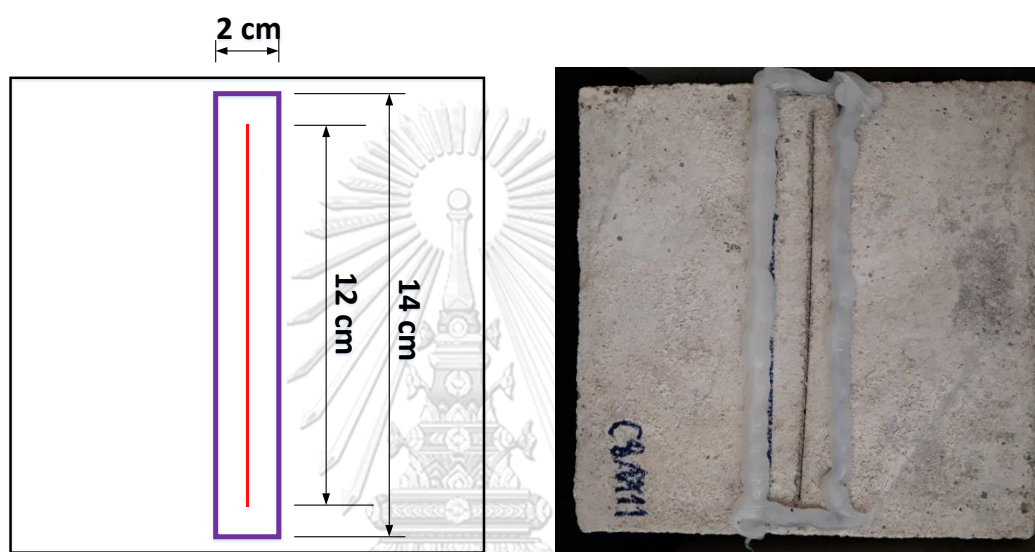
งานวิจัยนี้จะทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มหลักด้วยกัน ได้แก่

กลุ่มที่ 1 คือ ตัวอย่างมอร์ตาร์แบบไม่มีรอยร้าว

กลุ่มที่ 2 คือ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เกิดรอยร้าว

กลุ่มที่ 3 คือ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพี

โดยในกลุ่มที่ 2 และ 3 นั้นจะทำการสร้างรอยร้าวเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซม ในขณะที่ตัวอย่างนั้นจะทำการติดตั้งแผ่นทองแดงเพื่อทำการจำลองรอยร้าว ซึ่งแผ่นทองแดงที่ใช้มีขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความหนา 0.4 มิลลิเมตร และความลึก 20 มิลลิเมตร ทำการถอดแผ่นทองแดงออกเมื่อครบ 3 ชั่วโมง โดยทำการถอดออกในแนวตั้ง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการบ่มในน้ำสะอาดเป็นเวลา 28 วัน ลักษณะการติดตั้งแผ่นทองแดงนั้นจะเป็นไปดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งแผ่นทองแดง และแนวซิลิโคน



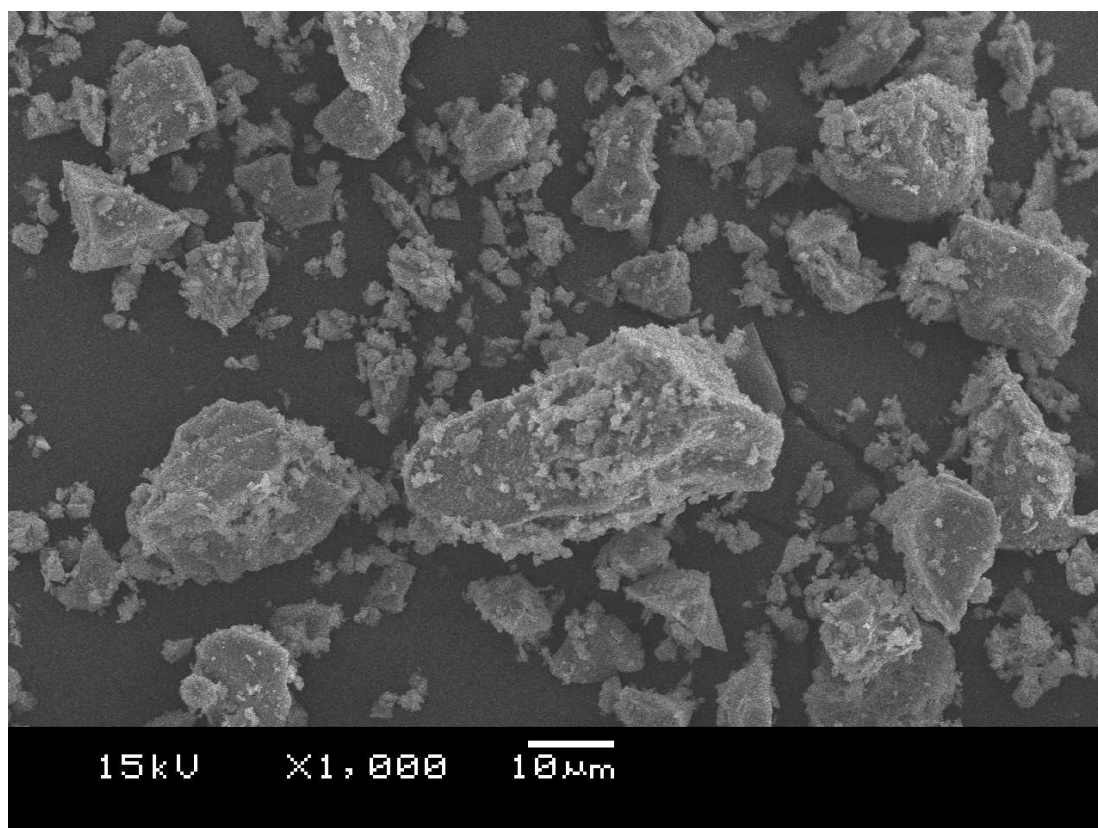
รูปที่ 3.11 การติดตั้งแผ่นทองแดงเพื่อทำการสร้างรอยร้าว

สำหรับส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำคือ 1:3:0.5 ซึ่งกำลังที่ได้ตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 จะอยู่ที่ประมาณ 30 เมกะปาสคาล ซึ่งส่วนผสมต่อ 1 ลบ.ม. เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ซึ่งหลังจากทำการผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบ่มต่อในน้ำสะอาดอีก 28 วัน ซึ่งจะทำให้ได้กำลังอัดประมาณ 90% หรือประมาณ 27 เมกะปาสคาล โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้นั้นเป็นปูนซีเมนต์ประเภทไฮบริด โดยมีลักษณะผลึกดังรูปที่ 3.12

โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮบริดนั้น ได้จากการทดสอบโดยการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี (X-Ray Fluorescence Spectrometry) โดยการวัดอัตราการเรืองรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุ ซึ่งปล่อยออกมาจากอะตอมที่สภาวะถูกกระตุ้น และมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3.2 โดยจากนั้นจึงนำไปทำการทดสอบต่าง ๆ ซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
ปูนซีเมนต์ไฮบริด	512.94
น้ำ	256.47
ทราย (ขนาด 0.125 ถึง 1 มม.)	1,538.83



รูปที่ 3.12 ผลิตปูนซีเมนต์ไฮบริด

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮบริดจากการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
CaO	57.7
SiO ₂	23.6
Al ₂ O ₃	5.31
Fe ₂ O ₃	3.54
SO ₃	2.76
MgO	1.32
K ₂ O	0.599
Na ₂ O	0.336
TiO ₂	0.28
Loss of Ignition (LOI)	4.557

3.3.1 การเตรียมเชื้อแบคทีเรียที่ใช้สำหรับการทดสอบประสานรอยแตกร้าว

สำหรับการเตรียมเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารเหลวสำหรับการใช้ซ่อมแซมรอยร้าว นั้น มีอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยสารเคมีที่ใช้จะเป็นสารเคมีในประเภทเกรดวิเคราะห์ (Analytical Reagent Grade; AR Grade) ซึ่งเป็นสารเคมีประเภทที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารทำปฏิกิริยาและสารมาตรฐานปฐมภูมิ โดยสารเคมีที่ใช้ดังรูปที่ 3.13 ประกอบไปด้วย

- 1) ยูเรีย (Urea; ยี่ห้อ Vetec)
- 2) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3 ; ยี่ห้อ Carlo Erba)
- 3) สารอาหารเลี้ยงเชื้อ (Nutrient Broth; ยี่ห้อ Difco)
- 4) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 ; ยี่ห้อ Carlo Erba)

และเครื่องมือสำหรับการเตรียมเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารเหลว ดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.18



รูปที่ 3.13 สารเคมีที่ใช้สำหรับการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย



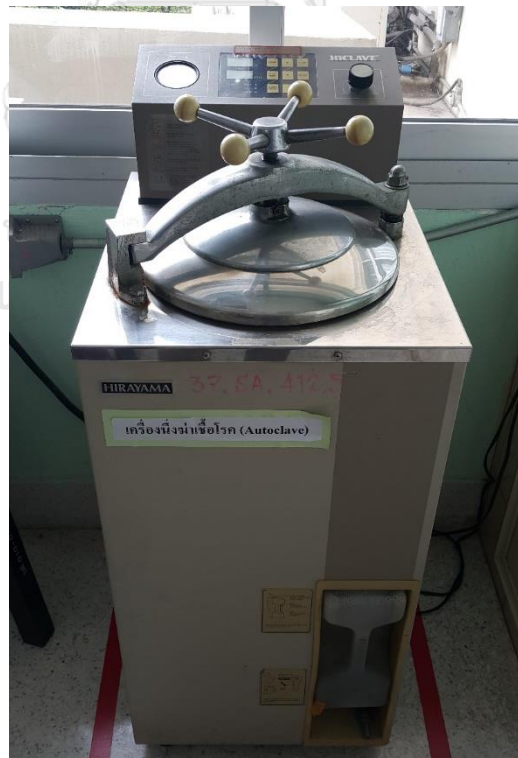
รูปที่ 3.14 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนความเร็วสูง (Microcentrifuge)



รูปที่ 3.15 ภายในเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนความเร็วสูง (Microcentrifuge)



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter)



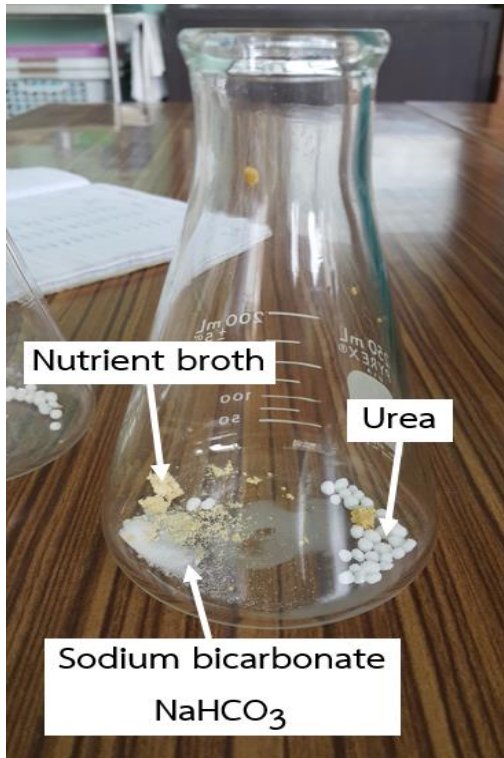
รูปที่ 3.17 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อโรค (Autoclaved)



รูปที่ 3.18 ตู้ปลอดเชื้อ

ซึ่งขั้นตอนการเตรียมเชื้อและสารอาหารนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การเพาะเชื้อ และการเตรียมสารอาหารเหลวสำหรับการหยอดเพื่อซ่อมแซมตัวอย่าง โดยขั้นตอนการเพาะเชื้อ และการเตรียมสารอาหารเหลว เป็นไปดังนี้

1) ทำการเพาะเลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์ *Bacillus sphaericus* เริ่มจากการถ่ายเชื้อโดยใช้เข็มเขี่ยเชื้อ ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใน 100 มิลลิลิตร นั้นประกอบไปด้วย ยูเรีย ปริมาณ 1 กรัม หรือ 0.25 โมลาร์ โซเดียมไฮโดรเจนไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ปริมาณ 0.212 กรัม และ Nutrient broth ปริมาณ 0.3 กรัม จากนั้นทำการเติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ อาหารเหลวปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อมาทำการอุดปากขวดด้วยสำลีและหุ้มด้วยฟอยล์ จากนั้นนำ สารอาหารเหลวที่ได้ไปทำการฆ่าเชื้อภายในเครื่องอบฆ่าเชื้อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 จากนั้นนำขึ้นมาจากเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ และทำการลดอุณหภูมิจนกระทั่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถเติบโตได้ โดยนำสารอาหารเหลวไปทำการแช่ในน้ำเย็นดังรูปที่ 3.21



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.19 รูป (ก) ส่วนประกอบของสารอาหารเหลวสำหรับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ และรูป (ข) หลังจากเติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร และคนให้เข้ากัน

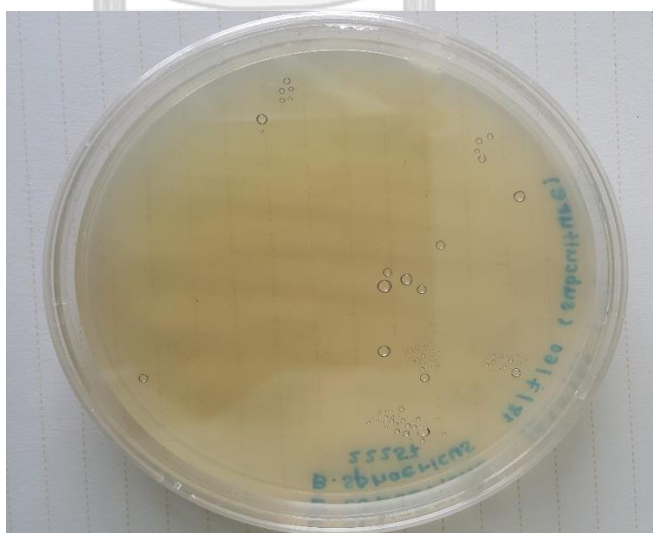


รูปที่ 3.20 การนำอาหารเหลวไปทำการฆ่าเชื้อภายในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการลดอุณหภูมิสารอาหารเหลวสำหรับการเพาะเชื้อ

2) ทำการชูดเอาเชื้อที่แช่แข็งไว้ในสารอาหารแข็งดังรูปที่ 3.22 จากนั้นเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมเชื้อ ได้แก่ เข็มเขี่ยเชื้อ แอลกอฮอล์ และตะเกียงน้ำมัน ดังรูปที่ 3.23 โดยขั้นแรกทำการฆ่าเชื้ออุปกรณ์โดยฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี ภายในตู้ปลอดเชื้อเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำการชูดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเข็มเขี่ยเชื้อที่เตรียมไว้ จากนั้นนำลงไปแกว่งในอาหารเหลวที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยก่อนนำเข็มเขี่ยเชื้อไปชูดเชื้อแบคทีเรียนั้นให้ทำการแช่แอลกอฮอล์และนำไปลงไฟจนกระทั่งเข็มเขี่ยเชื้อร้อนจนมีสีแดง และรอให้เย็นตัวจึงสามารถใช้ได้



รูปที่ 3.22 เชื้อแบคทีเรียภายในอาหารแข็ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.23 (ก) เข็มเขี่ยเชื้อ และ (ข) ตะเกียงแอลกอฮอล์

3) จากนั้นนำภาชนะบรรจุอาหารเหลวไปต้มในอ่างน้ำเขย่าซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 – 20 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อแบคทีเรียเพิ่มจำนวนขึ้นภายในอาหารเหลวนั้น หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 30 นาที เพื่อแยกเชื้อแบคทีเรียออกจากสารอาหารโดยแบคทีเรียจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นหลอดและนำเอาเชื้อแบคทีเรียนั้นไปใช้งานจริง ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แบคทีเรียในสภาพพร้อมใช้งาน

4) ทำการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Urea – CaCl₂ broth โดยแยกออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนที่เป็นยูเรีย และส่วนที่เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ ทั้งนี้เพื่อเป็นกันป้องกัน การเกิดปฏิกิริยาของเชื้อก่อนถึงเวลาใช้งานจริง

4.1) สำหรับการเตรียมยูเรียนั้น เริ่มจากการตวงน้ำกลั่นปริมาณ 375 มิลลิลิตร และชั่ง น้ำหนักยูเรีย 5.625 กรัม หรือ 0.25 โมลาร์ จากนั้นทำการผสมเข้าด้วยกัน แล้วนำไปเข้าตู้บ่มเชื้อ

4.2) ทำการเตรียมสารอาหารอีกส่วน ซึ่งเริ่มจากการตวงน้ำ 375 มิลลิลิตร และทำการชั่ง น้ำหนักแคลเซียมคลอไรด์ 41.625 กรัม หรือ 0.375 โมลาร์ จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต โดย ขั้นแรกทำการเตรียมน้ำกลั่นปริมาณ 150 มิลลิลิตร จากนั้นทำการหยดสารละลายบัฟเฟอร์ลงไป จนกระทั่ง pH มีค่าเท่ากับ 8 โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH meter) จากนั้นนำไปผสม รวมกับแคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้

4.3) ชั่งน้ำหนัก Nutrient broth ปริมาณ 2.7 กรัม จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายที่ได้จาก ข้อ 4.2 ต่อมานำเชื้อจุลินทรีย์ปริมาณ 78 มิลลิลิตร ผสมลงในสารละลายข้างต้น

โดยเครื่องมือสำหรับการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นไปดังรูปที่ 3.25 และ 3.26 และสารละลายที่ได้ จากส่วนผสมต่างๆ เป็นไปดังรูปที่ 3.27 ซึ่งมีลักษณะใสคล้ายน้ำทั่วไป



รูปที่ 3.25 การเตรียมสารอาหารเหลว



รูปที่ 3.26 เครื่องกวนสารละลายพร้อมแผ่นให้ความร้อน



รูปที่ 3.27 สารละลายของส่วนผสมสำหรับเตรียมสารอาหารเหลว

หลังจากทำการเตรียมเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารเหลวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นซึ่งเชื้อแบคทีเรียนั้นควรอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 4 – 10 องศาเซลเซียส โดยต้องระวังไม่ให้ปนเปื้อนกับอากาศซึ่งอาจส่งผลให้เชื้อแบคทีเรียไม่เจริญเติบโตหรือกลายพันธุ์ได้ และสารอาหารเหลวนั้นสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิห้อง

โดยในการหยอดสารละลายลงบนตัวอย่างนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้ สารละลายยูเรีย 6.25 มิลลิลิตร และสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเชื้อแบคทีเรีย 10 มิลลิลิตรทุก 24 ชั่วโมง

จำนวนตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดได้สรุปไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ

การทดสอบ	ประเภทตัวอย่าง		
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3
การทดสอบกำลังรับแรงอัด	10	3	6
การทดสอบหาระยะการซึมน้ำ	2	2	3
การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	3*	3*	3*
การวิเคราะห์ขนาดรอยร้าวภายนอก	-	-	9*
การวิเคราะห์โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก	3*	3*	9*
การทดสอบหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป	-	-	9*

* กาทดสอบแบบไม่ทำลาย

3.4 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการนำตัวอย่างขนาดเล็กไปทำการเคลือบอนุภาคทองคำ เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การเคลือบอนุภาคทองคำก่อนทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้หลังจากการเคลือบอนุภาคทองคำไปทำการเข้ากล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.29 โดยถึงทรงกระบอกด้านบนนั้นเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) ในขณะที่ตู้รูปทรงสี่เหลี่ยมด้านล่างจะเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยขั้นตอนการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้นจะเริ่มจากการปรับระยะที่เหมาะสม เนื่องจากระยะที่เหมาะสมจะทำให้ได้ภาพที่คมชัดและสามารถวิเคราะห์ธาตุได้ ซึ่งทำการพิจารณาธาตุที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ซึ่งทำให้เห็นลักษณะของธาตุได้อย่างชัดเจน โดยตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ได้แก่ ตัวอย่าง C1 C2 และ C4



รูปที่ 3.29 เครื่องมือสำหรับการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และการวิเคราะห์ธาตุ

3.5 การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันนี้ อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะทำให้เกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ.1912 ได้มีการศึกษารูปแบบของโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นในปี ค.ศ.1948 และพัฒนามาจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา และโลหวิทยา เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สารประกอบและแร่ต่างๆ หรือสามารถจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิด (สุรินทร์ ลิ่มปนาท, 2543) โดยตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ คือ ตัวอย่าง C2

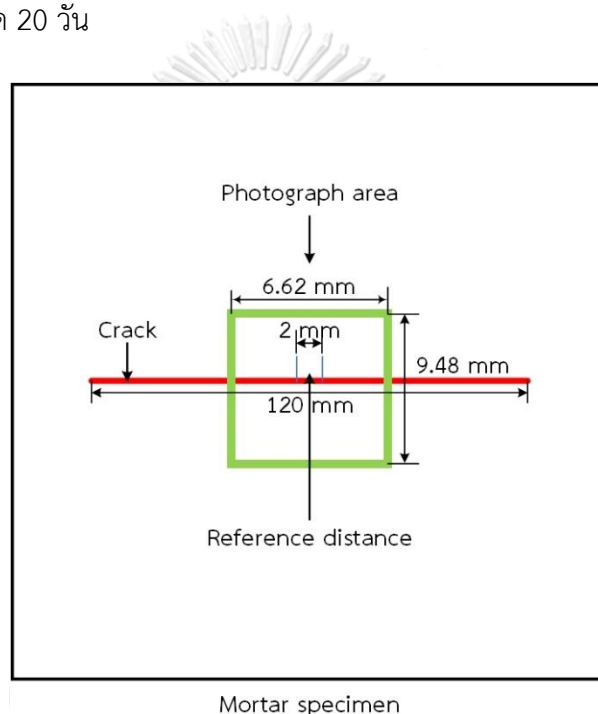
บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปราย

4.1 ผลการวิเคราะห์การซ่อมแซมรอยร้าว

4.1.1 การประเมินผลการซ่อมแซมภายนอก

การวิเคราะห์การซ่อมแซมรอยร้าวจากภายนอกทำโดยการเปรียบเทียบความกว้างรอยร้าวในแต่ละวัน ซึ่งถ่ายภาพรอยร้าวโดยใช้กล้องขยาย 40 เท่า รูปที่ 4.1 แสดงบริเวณที่ทำการถ่ายภาพ โดยถ่ายที่บริเวณเดิมตลอด 20 วัน



รูปที่ 4.1 บริเวณที่ทำการถ่ายภาพด้วยเลนส์ขยาย 40 เท่า

ผู้วิจัยได้วัดพื้นที่รอยร้าวทุก 24 ชั่วโมง โดยใช้ซอฟต์แวร์อิมเมจ เจ จากนั้นคำนวณหาความกว้างเฉลี่ยจากบริเวณที่ทำการถ่ายภาพโดยคำนวณจาก

$$\text{ความกว้างรอยร้าวเฉลี่ย} = \text{พื้นที่รอยร้าว} / \text{ความยาวรอยร้าว} \quad (4-1)$$

จากผลการซ่อมแซมภายนอกพบว่า ในการหยอด 5 ครั้งแรก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างยังไม่เด่นชัดนัก จนกระทั่งเมื่อทำการหยอดครบ 6 ครั้ง จึงเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรก สารละลายที่หยอดลงไปบางส่วนได้มีการซึมเข้าบริเวณพื้นผิวด้านข้างรอยร้าว

ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นเนื่องจากเชื้อแบคทีเรียหรืออาหารบางส่วนซึมเข้าไปในเนื้อผิวของตัวอย่าง แต่เมื่อทำการหยอดไปประมาณ 6 ครั้ง รูพรุนเหล่านั้นเริ่มถูกแทนที่ด้วยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เห็นผลึกแคลไซต์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยร้าวชัดเจนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการซึมของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ในช่วง 5 วันแรก สารละลายที่หยอดลงไปจะใช้เวลาการซึมเพียงแค่ 24 ชั่วโมง แต่เมื่อหยอดสารละลายไปเรื่อยๆ พบว่าหลังจากผ่านไปประมาณ 10 วัน สารละลายใช้เวลาในการซึมนานขึ้น โดยพบว่าใช้เวลาในการซึมประมาณ 48 ชั่วโมง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ารอยร้าวมีขนาดเล็กลง

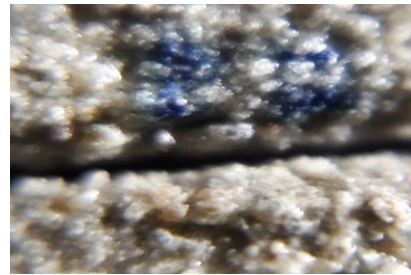
จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 ซึ่งทำการวัดขนาดโดยใช้ซอฟต์แวร์ อิมเมจ เจ พบว่าในช่วง 6 วันแรกนั้น ตัวอย่างมีการซ่อมแซมตัวเองอย่างช้าๆ โดยรอยร้าวมีขนาดลดลงเฉลี่ยร้อยละ 34.25 ในขณะที่ช่วงวันที่ 6-12 นั้นตัวอย่างมีการซ่อมแซมอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากผิวตัวอย่างมีความอิมมัตวของน้ำมากขึ้นทำให้สารละลายที่หยอดลงไปท่วมบริเวณผิวมากขึ้น โดยการซ่อมแซมในช่วงนี้คิดเป็นร้อยละ 45.81 ซึ่งมากกว่าช่วงแรกประมาณ 1.3 เท่า และช่วงหลังจากวันที่ 12 เป็นต้นไป การซ่อมแซมเริ่มคงที่จนกระทั่งวันที่ 20 โดยเพิ่มขึ้นจากวันที่ 12 คิดเป็นร้อยละ 4.81 โดยผลสรุปคือเมื่อทำการหยอดครบ 20 วัน พบว่ามีการซ่อมแซมรอยร้าวเฉลี่ยถึง 84.87 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยร้าวที่บริเวณผิวตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

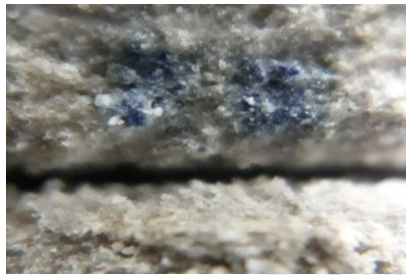
	วันที่																			
	0	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
C1	0.456	0.313	0.313	0.258	0.258	0.193	0.172	0.103	0.069	0.060	0.060	0.058	0.058	0.057	0.056	0.056				
C2	0.456	0.185	0.181	0.177	0.151	0.151	0.157	0.097	0.097	0.083	0.083	0.082	0.081	0.081	0.081	0.079				
C3	0.605	0.417	0.343	0.162	0.162	0.149	0.166	0.125	0.111	0.097	0.096	0.096	0.093	0.093	0.091	0.090				
C4	0.795	0.765	0.394	0.281	0.257	0.257	0.331	0.237	0.221	0.205	0.189	0.186	0.183	0.183	0.180	0.180				
C5	0.543	0.318	0.293	0.293	0.286	0.278	0.257	0.163	0.152	0.140	0.140	0.140	0.138	0.137	0.137	0.135				
C6	0.675	0.237	0.237	0.202	0.185	0.167	0.087	0.074	0.062	0.062	0.061	0.061	0.058	0.058	0.058	0.058				
C7	0.576	0.471	0.415	0.387	0.277	0.252	0.105	0.076	0.076	0.067	0.067	0.065	0.065	0.065	0.065	0.063				
C8	0.256	0.232	0.182	0.170	0.168	0.153	0.053	0.042	0.037	0.037	0.035	0.035	0.034	0.033	0.033	0.033				
C9	0.406	0.197	0.154	0.154	0.131	0.131	0.033	0.033	0.030	0.030	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028				
ค่าเฉลี่ย	0.530	0.348	0.279	0.232	0.208	0.192	0.151	0.106	0.095	0.087	0.084	0.083	0.082	0.082	0.081	0.080				
เปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลง	-	34.25	47.33	56.28	60.66	63.70	71.47	80.06	82.09	83.62	84.08	84.25	84.52	84.61	84.74	84.87				



(ก) วันเริ่มต้น



(ข) วันที่ 6



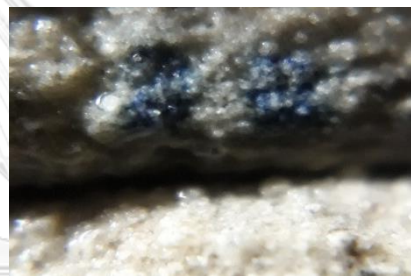
(ค) วันที่ 7



(ง) วันที่ 8



(จ) วันที่ 9



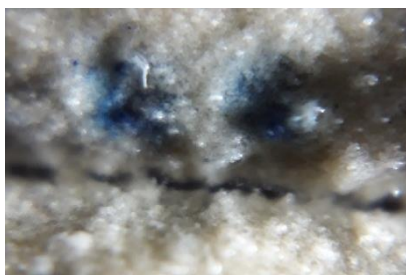
(ฉ) วันที่ 10



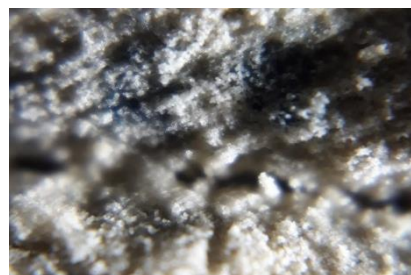
(ช) วันที่ 11



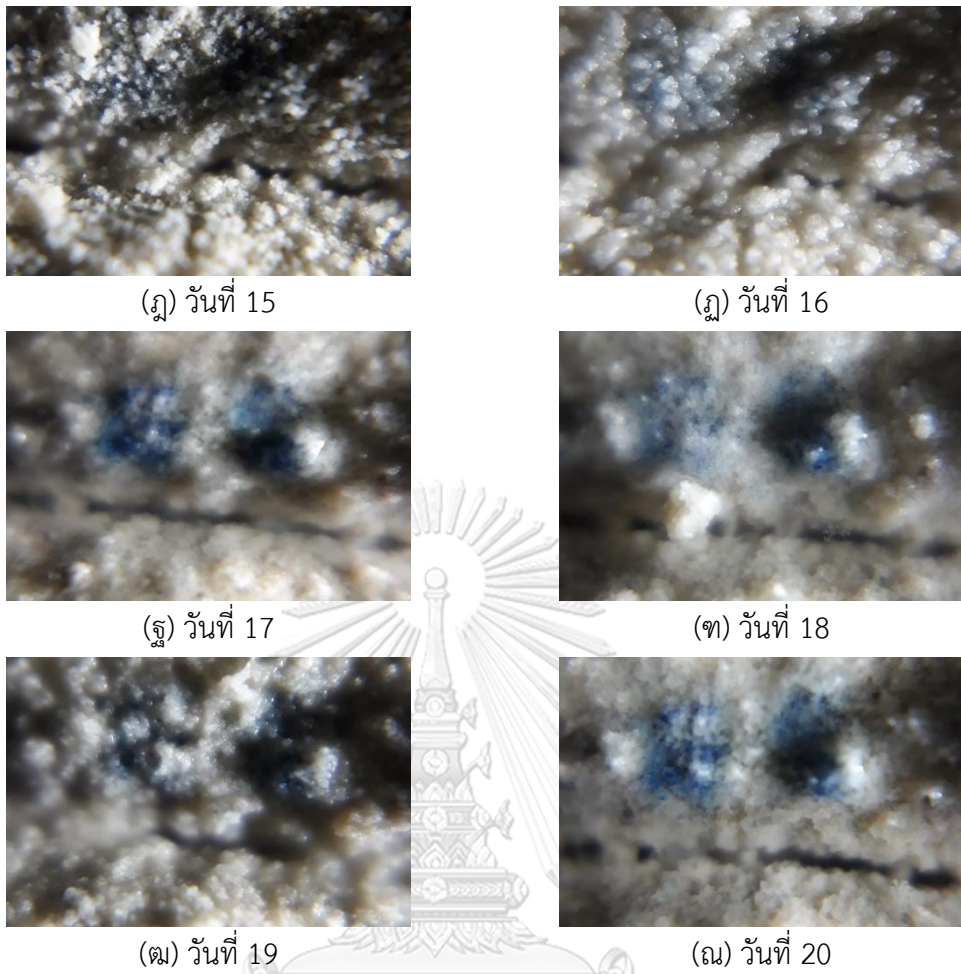
(ซ) วันที่ 12



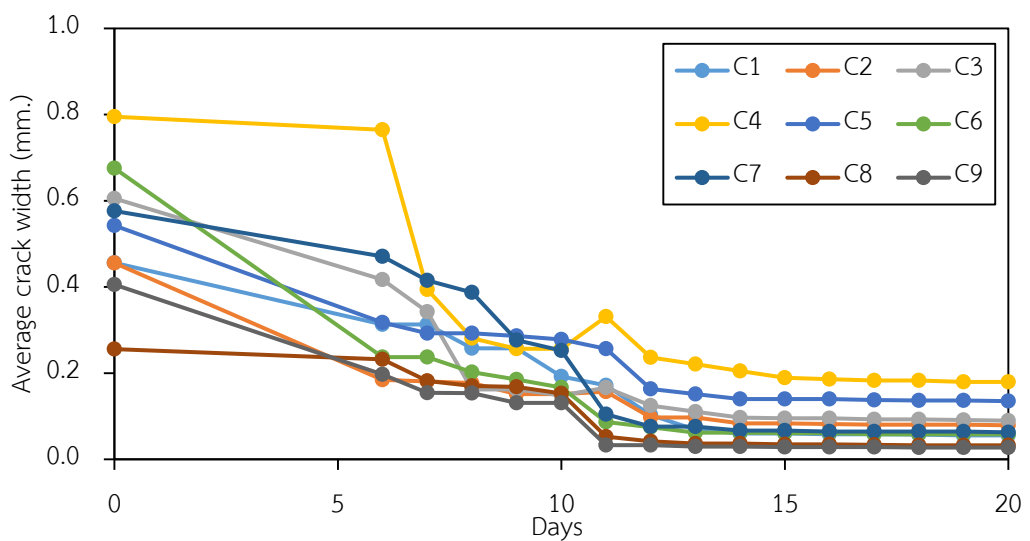
(ฌ) วันที่ 13



(ญ) วันที่ 14



รูปที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวจากเลนส์ขยายอัจฉริยะ 40 เท่า ของตัวอย่าง C9 ในกลุ่มที่ 3



รูปที่ 4.3 ผลการประเมินผลการซ่อมแซมความกว้างรอยร้าวเฉลี่ยที่บริเวณผิวของตัวอย่าง

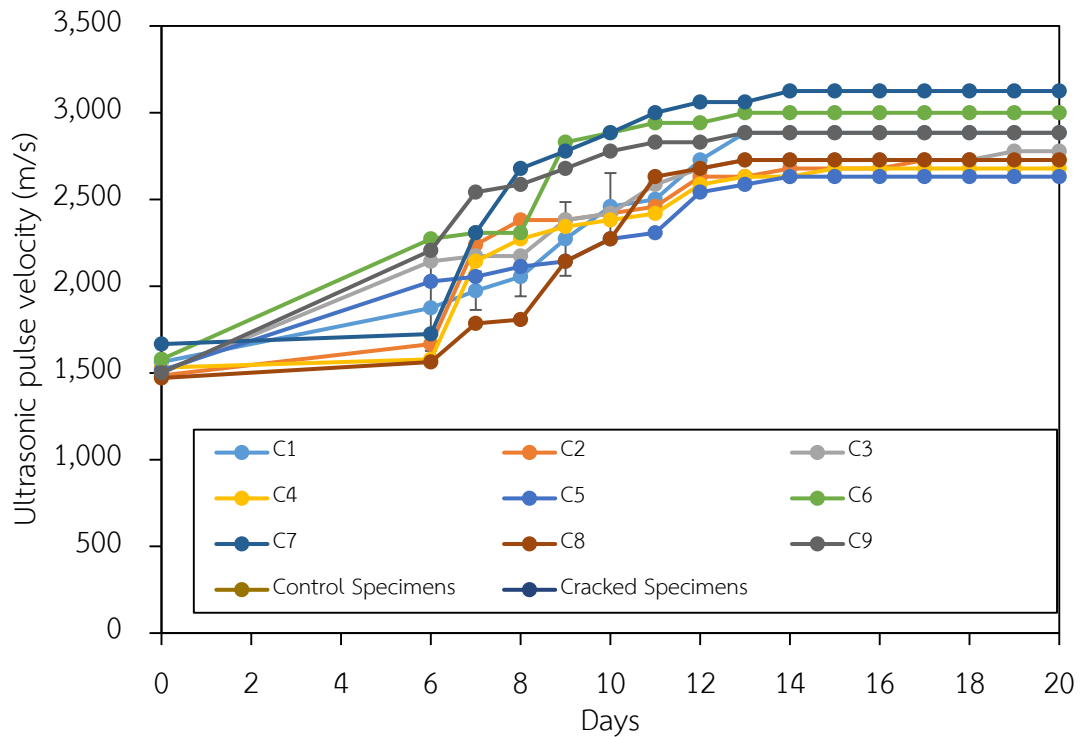
เมื่อเทียบกับงานวิจัยเดิมของ Wang et al. (2014) พบว่าความสามารถในการรักษารอยร้าวแบบสปอร์แบคทีเรียสามารถซ่อมแซมได้ร้อยละ 80 ใน 4 สัปดาห์ ซึ่งใช้เวลานานกว่าการรักษาจากภายนอกซึ่งรักษาได้ร้อยละ 84.87 ใน 3 สัปดาห์ ทั้งนี้อาจเกิดจากปัจจัยเรื่องชนิดของเชื้อแบคทีเรียและขนาดรอยร้าวที่แตกต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Luo et al. (2015) พบว่าขนาดรอยร้าวประมาณ 0.53 มม. นั้นจะสามารถซ่อมแซมได้ประมาณร้อยละ 55 ซึ่งเป็นการซ่อมแซมจากภายในเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการรักษารอยร้าวจากภายนอกมีประสิทธิภาพมากกว่าการรักษารอยร้าวจากภายใน

4.1.2 ผลการประเมินการซ่อมแซมรอยร้าวภายในด้วยการใช้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค

ผลการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิค แสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 จากรูปพบว่า ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการซ่อมแซม ทั้งนี้มาจากผลการซ่อมแซมรูพรุนภายใน จึงทำให้ระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นลดลงเนื่องจากปริมาณช่องว่างภายในที่ลดลง โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วง 6 วันแรกนั้นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยคิดเป็นร้อยละ 26.07 ต่อมาในช่วงวันที่ 6 ถึง 12 นั้นเกิดการซ่อมแซมอย่างรวดเร็วทำให้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคในวันที่ 12 เพิ่มขึ้นจากวันที่ 6 ถึงร้อยละ 49.00 และหลังจากวันที่ 12 พบว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากการซ่อมแซมภายในเริ่มสมบูรณ์จึงทำให้ความเร็วคงที่ โดยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของชิ้นตัวอย่างวันที่ 20 มีค่าเพิ่มขึ้นจากวันที่ 12 คิดเป็นร้อยละ 6.46 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มีรอยร้าวประมาณร้อยละ 167.3 และความเร็วคลื่นของตัวอย่างหลังผ่านการซ่อมแซมแตกต่างกับความเร็วคลื่นของตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวเพียงร้อยละ 31.38 โดยทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับผลการทดสอบการซ่อมแซมจากภายนอก

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการซ่อมแซมรูปพรรณโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (เมตรต่อวินาที)

	ขนาดรอย ร้าวเริ่มต้น (มิลลิเมตร)	ครั้งที่หยอด																		
		0	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
C1	0.532	1,562.5	1,875.0	1,973.7	2,054.8	2,272.7	2,459.0	2,500.0	2,727.3	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	
C2	0.328	1,485.1	1,666.7	2,238.8	2,381.0	2,381.0	2,419.4	2,459.0	2,631.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	2,678.6	
C3	0.437	1,500.0	2,142.9	2,173.9	2,173.9	2,381.0	2,419.4	2,586.2	2,678.6	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	
C4	0.504	1,530.6	1,578.9	2,142.9	2,272.7	2,343.8	2,381.0	2,419.4	2,586.2	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	2,631.6	
C5	0.465	1,515.2	2,027.0	2,054.8	2,112.7	2,142.9	2,272.7	2,307.7	2,542.4	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	2,586.2	
C6	0.544	1,578.9	2,272.7	2,307.7	2,307.7	2,830.2	2,884.6	2,941.2	2,941.2	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	3,000.0	
C7	0.605	1,666.7	1,724.1	2,307.7	2,678.6	2,777.8	2,884.6	3,000.0	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	3,061.2	
C8	0.243	1,470.6	1,562.5	1,785.7	1,807.2	2,142.9	2,272.7	2,631.6	2,678.6	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	2,727.3	
C9	0.368	1,500.0	2,205.9	2,542.4	2,586.2	2,678.6	2,777.8	2,830.2	2,830.2	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	2,884.6	
ค่าเฉลี่ย	-	1,528.7	1,927.2	2,148.6	2,217.1	2,391.9	2,472.7	2,535.6	2,684.5	2,743.5	2,758.9	2,766.8	2,766.8	2,766.8	2,766.8	2,766.8	2,766.8	2,766.8	2,766.8	



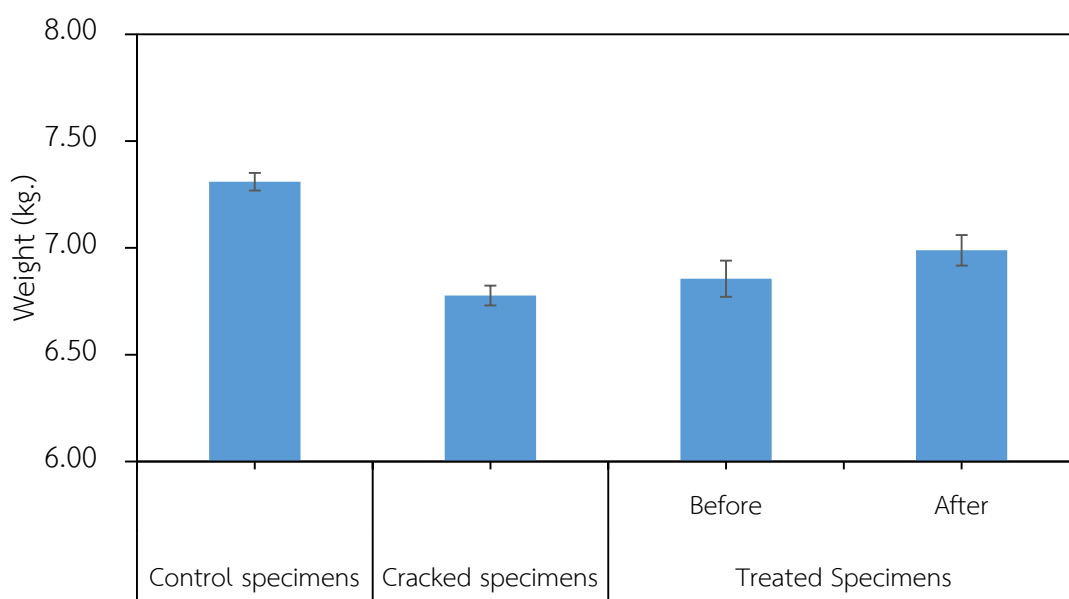
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบคลื่นอัลตราโซนิค

4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

การพิจารณาผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเป็นการพิจารณาน้ำหนักแห้งก่อนทำการซ่อมแซม และน้ำหนักแห้งหลังทำการซ่อมแซม ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 โดยผลการทดสอบนั้นได้แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักหลังการซ่อมแซมมีการเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.82 ของน้ำหนักตัวอย่างก่อนการซ่อมแซม และน้ำหนักต่ำกว่าตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวร้อยละ 4.39 โดยทั้งนี้สันนิษฐานว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะมาจากการเกิดขึ้นของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตและผลึกแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งมาจากการหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยจะมีลักษณะเป็นสีเหลือง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

	กลุ่มที่	พื้นที่หน้าตัด (มม ²)	น้ำหนักแห้งก่อน ซ่อมแซม (กิโลกรัม)	น้ำหนักแห้งหลัง ซ่อมแซม (กิโลกรัม)	การเปลี่ยนแปลง ของน้ำหนัก (กิโลกรัม)
C1	3	22,500	6.60	6.77	0.17
C2	3	22,500	6.60	6.74	0.14
C3	3	22,500	6.70	6.95	0.25
C4	3	22,500	7.10	7.17	0.07
C5	3	22,500	7.40	7.45	0.05
C6	3	22,500	6.90	6.96	0.06
C7	3	22,500	7.00	7.14	0.14
C8	3	22,500	6.70	6.82	0.12
C9	3	22,500	6.70	6.90	0.20
ค่าเฉลี่ย	-	-	6.86	6.99	0.13
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	-	-	0.291	0.243	0.072



รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก

4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้น แบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในสภาพต่างๆ ได้แก่

- 1). กำลังรับแรงอัดในขณะที่ตัวอย่างไม่มีรอยร้าว (f'_c)
- 2). กำลังรับแรงอัดในขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าว (f'_{cr})
- 3). กำลังรับแรงอัดหลังจากที่ตัวอย่างผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพี (f'_{ct})

4.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวนั้นได้ทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 ตัวอย่าง รายละเอียดเป็นไปดังตารางที่ 4.4 และการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 4.6 โดยจากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดที่ได้เฉลี่ยมีค่าประมาณ 27.64 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	กำลังอัดในตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว (f'_c ; เมกะปาสคาล)
C1	7.3	24.00
C2	7.4	29.85
C3	7.1	26.90
C4	7.2	29.83
C5	7.4	25.05
C6	7.3	27.54
C7	7.3	29.43
C8	7.2	24.43
C9	7.3	24.14
C10	7.6	28.78
ค่าเฉลี่ย	7.31	27.64
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	1.70



รูปที่ 4.6 สภาพตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวหลังผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของตัวอย่าง C2 ใน
กลุ่มที่ 1

4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแบบมีรอยร้าว

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดในขณะที่ตัวอย่างอยู่ในสภาพเกิดรอยร้าวบริเวณผิวนั้น ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.5 โดยหลังจากทำการสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างไปทำการแช่น้ำโดยให้น้ำอยู่ที่บริเวณผิวด้านล่างของตัวอย่าง เป็นเวลาทั้งสิ้น 20 วัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 (การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพี) โดยผลสรุปของกำลังอัดในขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยร้าวที่ได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 17.25 เมกะปาสคาล โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.93 เมกะปาสคาล ซึ่งกำลังอัดในขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยร้าวที่คิดเป็นร้อยละ 62.40 ของค่ากำลังอัดในตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว (หัวข้อที่ 4.5.1) ซึ่งเป็นไปตามจริงเนื่องจากรอยร้าวบนโครงสร้างนั้นจะส่งผลให้โครงสร้างสูญเสียประสิทธิภาพในการรับแรงอัด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดในขณะเกิดรอยร้าว

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	กำลังอัดขณะเกิดรอยร้าว (f'_{cr} ; เมกะปาสคาล)	ขนาดรอยร้าว (มิลลิเมตร)
C1	6.73	14.53	0.39
C2	6.71	18.82	0.28
C3	6.89	18.40	0.23
ค่าเฉลี่ย	6.78	17.25	0.30
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.08	1.93	0.07



รูปที่ 4.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างแบบมีรอยร้าว ของตัวอย่าง C1 ในกลุ่มที่ 2

4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากผ่านการซ่อมแซมโดยวิธีเอ็มไอซีพี

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากทำการซ่อมแซมโดยแบคทีเรียเป็นเวลา 20 วัน ผลการทดสอบที่ได้เป็นไปดังตารางที่ 4.3 และตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 4.8 โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากผ่านการซ่อมแซมนั้น มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยประมาณ 24.72 เมกะปาสคาล ซึ่งกำลังอัดหลังจากการซ่อมแซมรอยร้าวนั้นคิดเป็นร้อยละ 89.41 ของค่ากำลังอัดในตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังผ่านการซ่อมแซม

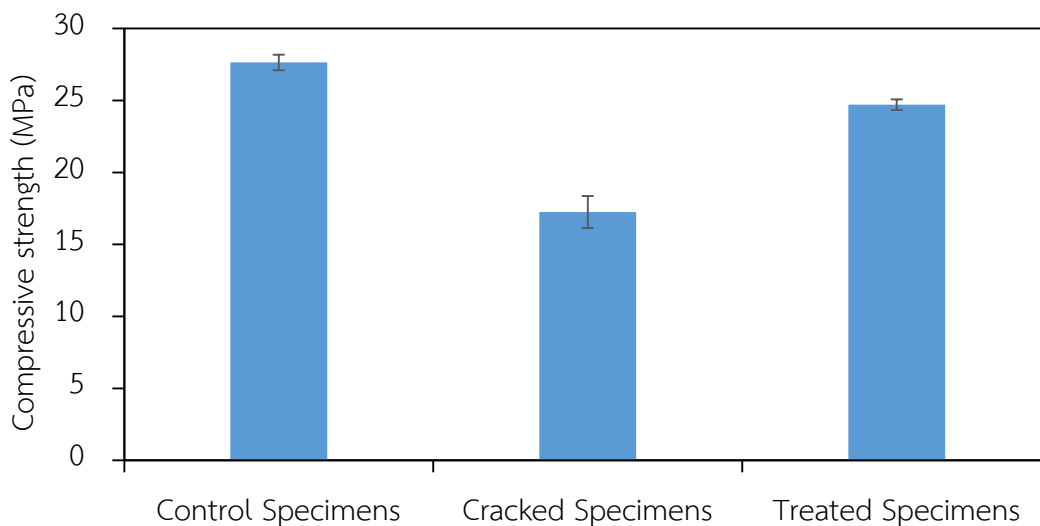
ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	กำลังอัดหลังผ่านการซ่อมแซม (f'_{ci} ; เมกะปาสคาล)
C1	6.77	24.62
C2	6.74	24.55
C3	6.95	26.54
C4	7.17	24.68
C5	7.45	24.36
C6	6.96	23.54
ค่าเฉลี่ย	7.01	24.72
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.243	0.901



รูปที่ 4.8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการซ่อมแซม ของตัวอย่าง C2 ในกลุ่มที่ 3

โดยจากผลสรุปที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถสรุปได้เป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจากกราฟสรุปได้ว่ากำลังอัดขณะที่ตัวอย่างเกิดรอยร้าวนั้นมีค่าต่างจากกำลังอัดขณะตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวถึงร้อยละ 37.60 ในขณะที่กำลังอัดของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพีนั้นแตกต่างจากกำลังอัดในตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวเพียงร้อยละ 10.60 เท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียม

คลอไรด์และซีเมนต์ส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งข้อสันนิษฐานนี้อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทั้ง 3 เงื่อนไข

4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมน้ำนั้น แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบด้วยกัน ได้แก่ ผลการทดสอบหาความลึกในการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability Test) และผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Sorptivity Test) โดยผลการทดสอบเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.6.1 และ 4.6.2

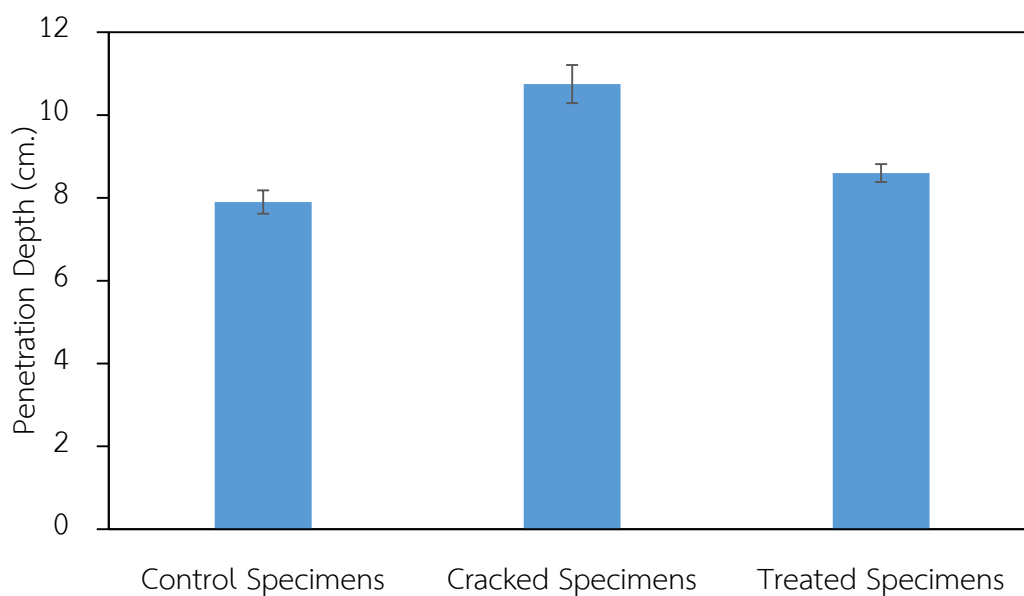
4.4.1 ผลการทดสอบการหาความลึกในการซึมผ่านของน้ำ

ผลการทดสอบระยะการซึมน้ำภายในตัวอย่าง เป็นไปดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 โดยจากการทดสอบพบว่าระดับน้ำที่ซึมลงไปในตัวอย่างไม่มียรอยร้าวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.9 ซม. ในขณะที่ตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.75 ซม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 136.08 ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว และตัวอย่างหลังการซ่อมแซมนั้นมีระดับการซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 8.6 ซม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 108.86 ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมนั้นสามารถฟื้นฟูประสิทธิภาพได้ถึงร้อยละ 27.22 ของตัวอย่าง โดยมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

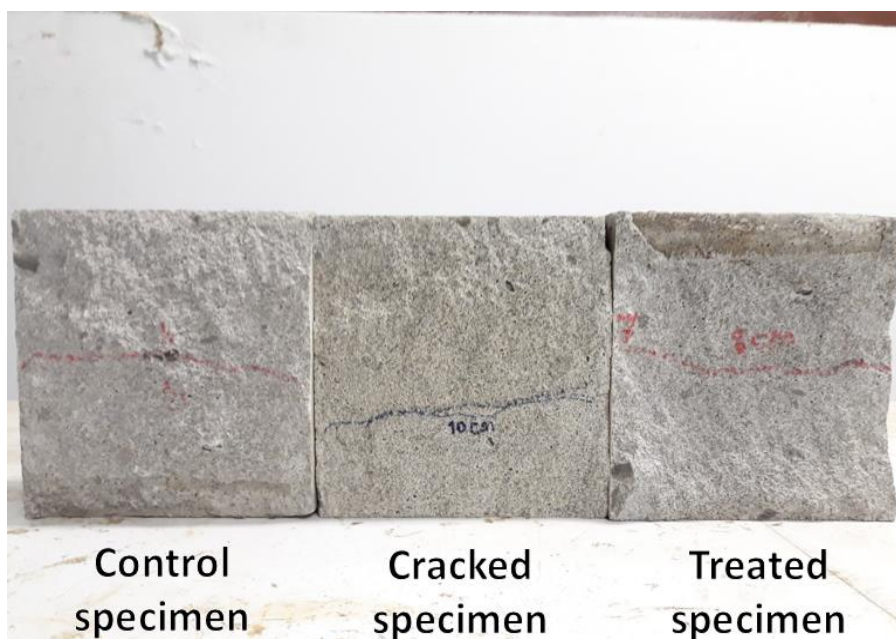
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาความลึกในการซึมผ่านของน้ำ

ตัวอย่างที่	ชนิดตัวอย่าง	ระยะการซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตร)
1	ตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว	7.5
2	ตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว	8.3
3	ตัวอย่างแบบมีรอยร้าว	10.1
4	ตัวอย่างแบบมีรอยร้าว	11.4
5	ตัวอย่างหลังการซ่อมแซม	8.2
6	ตัวอย่างหลังการซ่อมแซม	9.1
7	ตัวอย่างหลังการซ่อมแซม	8.5

	ตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว	ตัวอย่างแบบมีรอยร้าว	ตัวอย่างหลังการซ่อมแซม
ค่าเฉลี่ย	7.90	10.75	8.60
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.40	0.65	0.37



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาระยะความลึกในการซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างผลการทดสอบระยะการซึมน้ำ

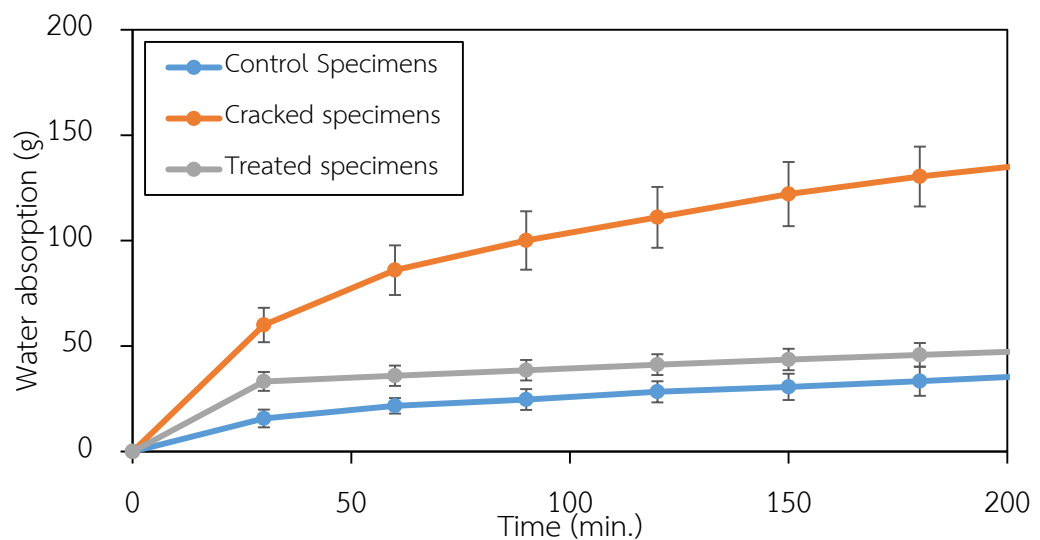
4.4.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Sorptivity Test) นั้นเป็นไปตามตารางที่ 4.7 โดยผลการทดสอบการดูดซึมน้ำนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.12 พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซึมน้ำของตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว ซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำต่างจากตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวประมาณ 37.41 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย ในขณะที่ตัวอย่างที่เกิดรอยร้าวความสามารถในการดูดซึมน้ำค่อนข้างแตกต่างเนื่องจากขนาดรอยร้าวที่กว้างทำให้น้ำซึมผ่านได้อย่างรวดเร็วประมาณ 291.20 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย ทั้งนี้เป็นผลมาจากช่องว่างบริเวณรอยร้าวที่น้อยลงทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำอาจเกิดจากรูพรุนบริเวณโดยรอบของรอยร้าวด้วยเช่นกัน เนื่องจากตัวอย่างแต่ละก้อนนั้นความพรุนที่แตกต่างกัน จึงอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าการซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการซึมน้ำ

ตัวอย่างที่	กลุ่มที่	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมตามช่วงเวลา (กรัม)								
		เริ่มต้น	10 นาที	25 นาที	40 นาที	55 นาที	70 นาที	85 นาที	100 นาที	115 นาที
C1	1	0.0	17.0	22.0	24.0	27.0	29.0	30.0	33.0	36.0
C2		0.0	10.0	17.0	19.0	23.0	24.0	27.0	29.0	29.0
C3		0.0	20.0	26.0	31.0	35.0	39.0	43.0	47.0	50.0

ตัวอย่างที่	กลุ่มที่	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมตามช่วงเวลา (กรัม)								
		เริ่มต้น	10 นาที	25 นาที	40 นาที	55 นาที	70 นาที	85 นาที	100 นาที	115 นาที
ค่าเฉลี่ย		0.00	15.67	21.67	24.67	28.33	30.67	33.33	36.33	38.33
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.00	4.19	3.68	4.92	4.99	6.24	6.94	7.72	8.73
C4	2	0.0	60.0	90.0	105.0	117.0	128.0	135.0	143.0	148.0
C5		0.0	70.0	98.0	114.0	125.0	137.0	145.0	149.0	159.0
C6		0.0	50.0	70.0	81.2	91.2	101.2	111.2	119.2	125.2
ค่าเฉลี่ย		0.00	60.00	86.00	100	111	122	130.4	137	144.07
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.00	8.16	11.78	13.84	14.42	15.21	14.18	12.87	14.08
C7	3	0.0	37.0	40.0	42.7	45.2	47.6	48.6	53.6	60.3
C8		0.0	31.0	33.7	36.5	39.1	44.2	47.6	50.2	54.4
C9		0.0	35.0	38.5	42.2	45.7	48.9	52.4	54.5	57.7
C10		0.0	39.0	42.2	44.0	46.5	48.0	52.3	55.3	58.3
C11		0.0	37.0	40.2	43.1	45.6	47.4	48.5	50.2	52.0
C12		0.0	33.0	35.2	37.6	40.1	42.1	43.2	43.6	44.2
C13		0.0	35.0	37.1	39.5	42.1	44.5	46.8	48.2	50.1
C14		0.0	27.0	29.3	32.1	34.3	36.4	37.4	38.9	42.5
C15		0.0	25.0	27.3	29.3	32.1	33.7	35.4	37.5	38.7
ค่าเฉลี่ย		0.00	33.22	35.94	38.56	41.19	43.64	45.80	48.00	52.44
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.00	4.47	4.78	4.88	4.95	5.07	5.68	6.23	6.12

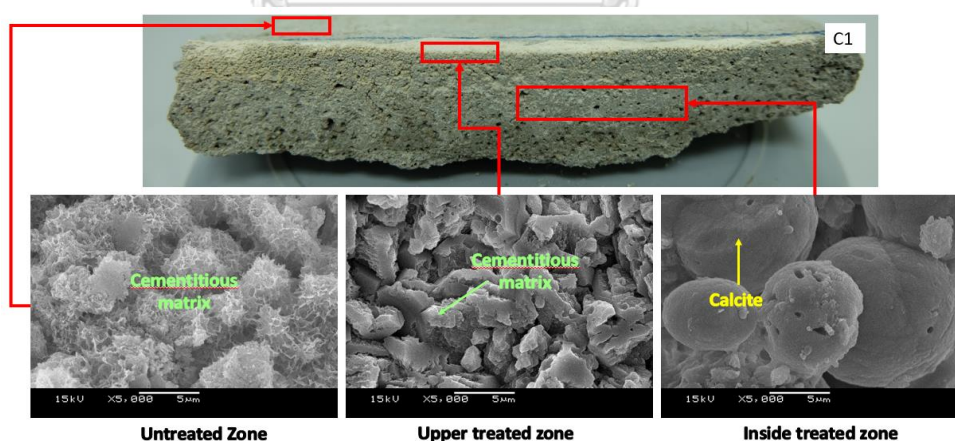


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Sorptivity Test)

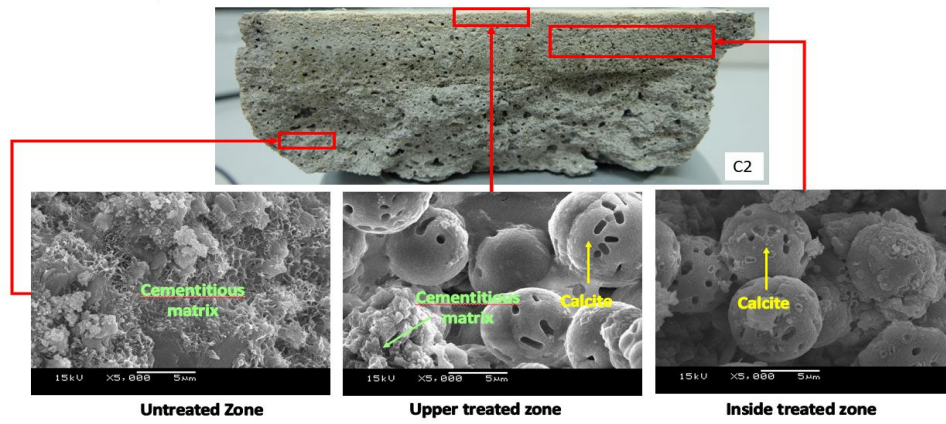
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

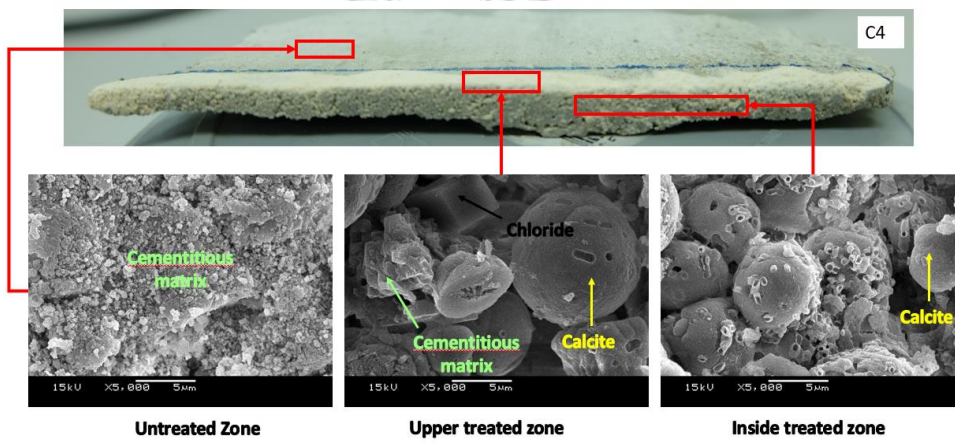
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope หรือ SEM) โดยการเตรียมตัวอย่าง 3 บริเวณด้วยกัน ได้แก่ บริเวณที่ไม่มีการซ่อมแซม บริเวณผิวด้านบนของส่วนที่มีการซ่อมแซม และบริเวณผิวด้านในของส่วนที่มีการซ่อมแซม ดังรูปที่ 4.13 ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะผลึกที่เกิดขึ้น เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณเพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะผลึกและร่องรอยการเกิดขึ้นของธาตุต่างๆ ซึ่งผลสรุปพบว่า ผลึกของเกลือซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากแคลเซียมคลอไรด์นั้นจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ในขณะที่ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์นั้นจะมีลักษณะกลม และจะมีปริมาณแคลเซียมค่อนข้างสูง ซึ่งธาตุที่พบเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุแล้วนั้น พบว่าส่วนที่เกิดผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นจะมีธาตุหลัก ได้แก่ แคลเซียม คาร์บอน ออกซิเจน และคลอไรด์ ในขณะที่ส่วนที่คาดว่าเป็นเกลือนั้น ผลการวิเคราะห์สรุปว่ามีคลอไรด์อยู่ประมาณ 0.4% ต่อน้ำหนัก ซึ่งถือว่าการตกผลึกของเกลือน้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่น (แคลเซียม คาร์บอน ออกซิเจน และคลอไรด์) โดยจะมีปริมาณออกซิเจนมากที่สุด ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้ทำการหยอดเข็มนั้นจะเห็นได้ว่าจะเกิดธาตุซิลิกาขึ้นมา ดังรูปที่ 4.14 โดยตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ ได้แก่ ตัวอย่าง C1 ตัวอย่าง C2 และตัวอย่าง C4 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีลักษณะการเกิดขึ้นชัดเจน



(ก) ตัวอย่าง C1



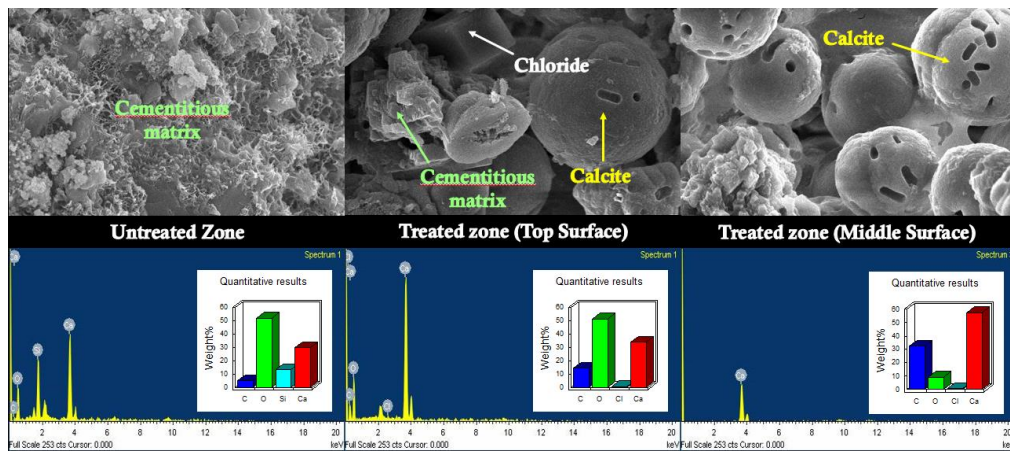
(ข) ตัวอย่าง C2



(ค) ตัวอย่าง C4

รูปที่ 4.13 ผลึกของตัวอย่างในบริเวณที่แตกต่างกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY



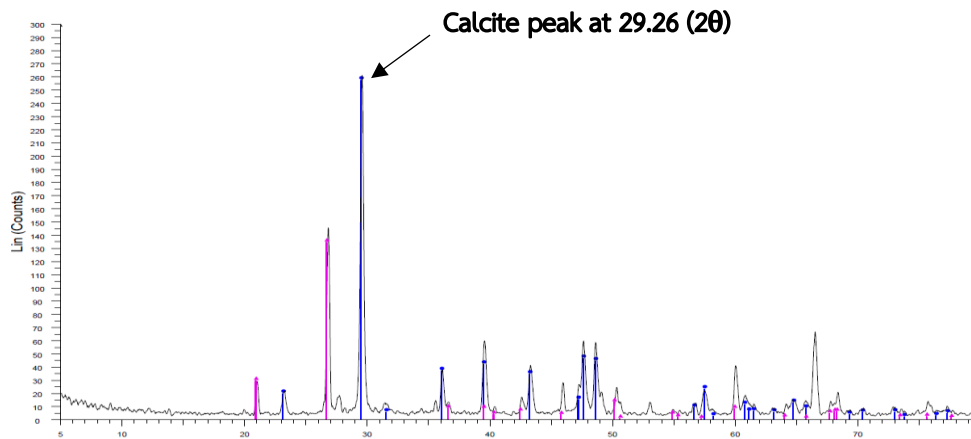
รูปที่ 4.14 ผลการส่องกล้องจุลทรรศน์และการวิเคราะห์ธาตุ

4.5.2 การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

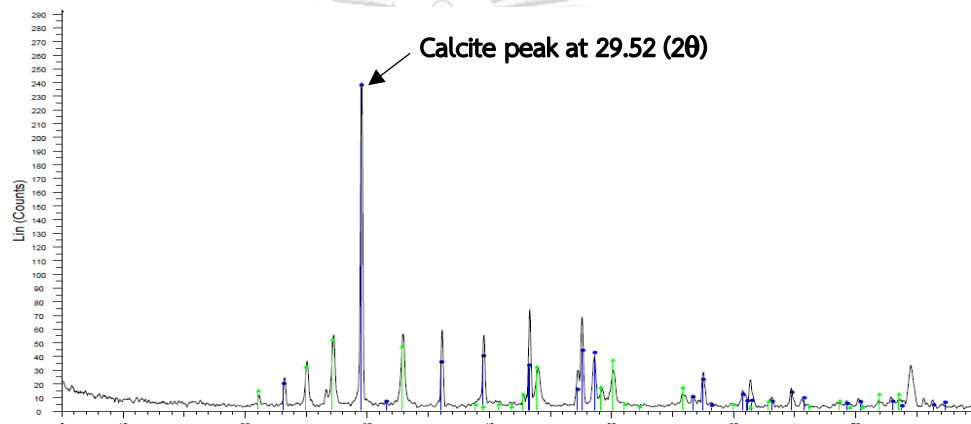
งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะการสะท้อนของอนุภาค โดยทำการวิเคราะห์ 3 บริเวณ โดยใช้ตัวอย่าง C2 ในการวิเคราะห์ โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย

- (1) บริเวณที่ไม่มีการซ่อมแซม
- (2) บริเวณผิวด้านบนของส่วนที่มีการซ่อมแซม
- (3) บริเวณผิวด้านในของส่วนที่มีการซ่อมแซม

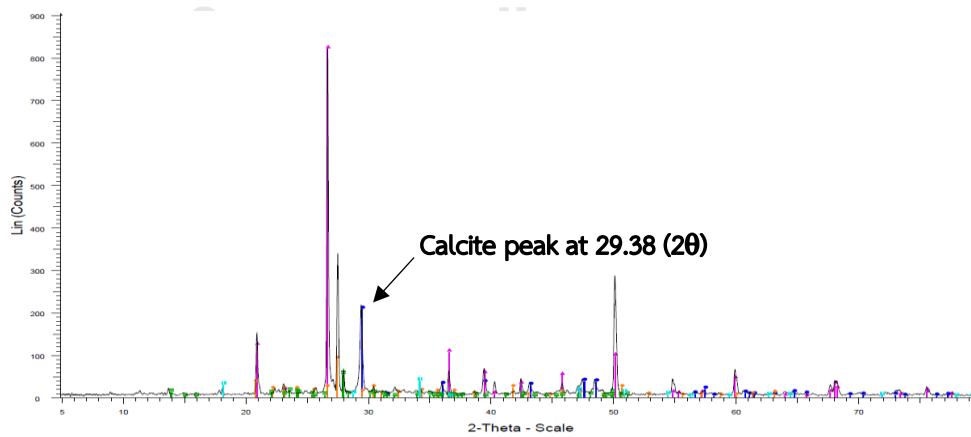
ผลการวิเคราะห์เป็นไปดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 โดยในแต่ละจุดที่มีการเด่นขึ้นมาของกราฟนั้นสามารถแปลงออกมาเป็นธาตุต่างๆ โดยเส้นสีน้ำเงินแทนด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และเส้นสีเขียวแสดงด้วยซิลิกา จะเห็นได้ว่าธาตุที่พบมีความเข้มแตกต่างกัน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของตัวอย่างที่มีความละเอียดไม่เท่ากัน และรูปทรงของตัวอย่างที่ไม่เหมือนกัน จึงทำให้ค่าความเข้ม (แกน Y) ที่ได้จึงแตกต่างกัน



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันบริเวณที่ไม่มีการซ่อมแซม



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันบริเวณผิวด้านบนของส่วนที่มีการซ่อมแซม



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันบริเวณผิวด้านในของส่วนที่มีการซ่อมแซม

จากผลการทดสอบโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่าผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นจริง โดยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภทได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 4.15 โดยจุดที่เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นจะเกิดขึ้นที่มุมประมาณ 29.26 ในขณะที่รูปที่ 4.16 และ 4.17 นั้นเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอ็มไอซีพี โดยเกิดขึ้นที่มุมประมาณ 29.52 และ 26.38 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตแบบไฮเดรชันปกติ ซึ่งเหตุผลที่ทำให้มุมที่เกิดขึ้นแตกต่างกันเล็กน้อยนั้น อาจเกิดจากปัจจัยด้านขนาดตัวอย่างและรูปทรงของตัวอย่างที่ต่างกัน

โดยผลสรุปของทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันชี้ให้เห็นว่าการเกิดขึ้นของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจริง

4.6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

จากการทดลองซ่อมแซมรอยร้าวตลอดระยะเวลา 20 วัน พบว่ามีค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซมตัวอย่างต่อตารางเซนติเมตร ดังตารางที่ 4.9 โดยทำการเปรียบเทียบกับการซ่อมแซมแบบทั่วไป

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวต่อ 1 ตร.ซม. ด้วยวิธีต่างๆ

ประเภทการซ่อมแซม	ราคา	หมายเหตุ
วิธีเอ็มไอซีพี	57.35 บาท	คิดเฉพาะสารเคมีที่ใช้ ไม่รวมซื้อแบคทีเรียและอุปกรณ์
การฉีดยาฟ็อกซี	0.03 บาท	1.5 กก./ตร.ม.
การฉีดยานูเกราท์	2.85 บาท	1 ถัง 313 บาท ใช้ได้ 0.011 ลบ.ม.
ปูนฉาบ	0.15 บาท	150 บาท/ตร.ม.

โดยจากตารางพบว่าราคาของการซ่อมแซมแบบเอ็มไอซีพีนั้นยังค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ทั้งนี้เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนั้นเป็นสารเคมีเกรดที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงทำให้ราคาสูงตามไปด้วย

บทที่ 5

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้วิธีเอ็มไอซีพี โดยใช้เชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus sphaericus* สายพันธุ์ ATCC 22257 ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมแบบกระด้างสูง ซึ่งสามารถเจริญเติบโตภายในคอนกรีตเนื่องจากคอนกรีตมีค่าความเป็นกรดต่ำสูง และแบคทีเรียชนิดนี้ยังอาศัยแหล่งอาหารในการเจริญเติบโตนั่นคือแคลเซียมซึ่งส่วนหนึ่งสามารถพบได้ในคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้ทำการหยุดเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารลงบริเวณรอยร้าวจากภายนอก ซึ่งถือเป็นวิธีที่ยังมีงานวิจัยไม่มาก เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การผสมเชื้อแบคทีเรียและสารอาหารลงไปเนื้อคอนกรีตในรูปของสปอร์จนกระทั่งคอนกรีตเกิดรอยร้าวแคบซูลนั้นจะแตกออกและแบคทีเรียที่ถูกบรรจุอยู่ด้านในจะทำงานซึ่งในขณะที่โครงสร้างยังไม่เกิดรอยร้าวนั้นแบคทีเรียบางส่วนอาจไม่มีชีวิตเนื่องจากปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม และทางด้านอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งไม่เพียงพอ ดังนั้นการซ่อมแซมรอยร้าวจากภายนอกจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมกว่าเนื่องจากสามารถรักษาได้ตรงจุด โดยงานวิจัยนี้จะทำการสร้างตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการร้าวรอยร้าวโดยใช้แผ่นทองแดงขนาดความกว้างเฉลี่ย 0.4 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และความลึกรอยร้าว 20 มิลลิเมตร จากนั้นทำการซ่อมแซมโดยการหยุดสารละลายยูเรีย 6.25 มิลลิตร และหยุดสารละลายแบคทีเรีย 10 มิลลิตร ทุก 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสามารถในการซ่อมแซม และยืนยันผลการซ่อมแซมโดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

ผลการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการใช้เลนส์อัจฉริยะพบว่าการซ่อมแซมรอยร้าวสามารถรักษาได้ถึงประมาณ 84.87 เปอร์เซ็นต์ โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงด้วยกัน ได้แก่ ช่วง 0 – 6 วันแรก ตัวอย่างจะมีลักษณะแห้ง ทำให้สารละลายต่างๆเมื่อทำการหยุดลงไปแล้วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ผิวตัวอย่างทันที ดังนั้นเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะน้อยกว่า 24 ชั่วโมง โดยในช่วงนี้การซ่อมแซมรอยร้าวคิดเป็นร้อยละ 34.25 ต่อมาช่วงวันที่ 7 – 12 เป็นช่วงที่ตัวอย่างมีการซ่อมแซมอย่างรวดเร็วเนื่องจากผิวตัวอย่างเริ่มอิมตัวทำให้เห็นชัดเจนว่าสารละลายที่ทำการหยุดลงบนผิวนั้นใช้เวลาเกิน 24 ชั่วโมงในการซึม การซ่อมแซมในช่วงนี้คิดเป็นร้อยละ 45.81 และช่วงสุดท้ายตั้งแต่วันที่ 12 เป็นต้นไป การซ่อมแซมจะค่อนข้างคงที่ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4.81 เช่นเดียวกับการซ่อมแซมภายในซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบคลื่นอัลตราโซนิคผ่านตัวอย่างโดยพบว่าในช่วง 6 วันแรกนั้นความเร็วคลื่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยคิดเป็นร้อยละ 26.07 ถัดมาในช่วงวันที่ 7 ถึง 12 นั้นตัวอย่างเริ่มมีการซ่อมแซมเกิดขึ้น

โดยการซ่อมแซมในช่วงนี้คิดเป็นร้อยละ 49.00 และหลังจากวันที่ 12 พบว่าความเร็วของคลื่นนั้นเริ่มคงที่ทั้งนี้เนื่องจากการซ่อมแซมภายในเริ่มสมบูรณ์จึงส่งผลให้คลื่นเดินทางด้วยความเร็วคงที่ โดยคิดเป็นร้อยละ 6.46 นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วคลื่นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่มีรอยร้าวประมาณร้อยละ 167.3 และน้อยกว่าความเร็วคลื่นของตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวเพียงร้อยละ 31.38 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับการซ่อมแซมรอยร้าวบริเวณภายนอก โดยผลสรุปที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการซ่อมแซมทางด้านคุณสมบัติของวัสดุพบว่า การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพีนั้น พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างหลังการซ่อมแซมมีค่าเท่ากับ 24.72 เมกะปาสคาล ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 89.4 ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าว และเพิ่มขึ้นร้อยละ 27.00 จากตัวอย่างที่มีรอยร้าว เนื่องจากผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์ได้มาเติมเต็มบริเวณรอยร้าวทำให้หน้าตัดมีพื้นที่ในการรับแรงอัดมากขึ้นกว่าตัวอย่างที่เกิดรอยร้าว และการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพีนั้นยังทำให้ความสามารถในการซึมน้ำลดลงร้อยละ 27.22 จากตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว โดยจากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพีมีความสามารถในการซึมน้ำใกล้เคียงกับตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าว โดยระยะเวลาการซึมน้ำของตัวอย่างหลังผ่านการซ่อมแซมมากกว่าระยะเวลาการซึมน้ำของตัวอย่างแบบไม่มีรอยร้าวเพียงร้อยละ 8.87 โดยผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวิธีเอ็มไอซีพีจากภายนอก และยังได้พิสูจน์โดยวิธีทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งพบว่าผลึกแคลเซียมเกิดขึ้นบริเวณที่มีการซ่อมแซม โดยได้ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่งโดยใช้การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน

จากผลการศึกษาพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพีเหมาะสำหรับรอยร้าวที่มีความกว้างประมาณ 0.1 – 0.6 มม. ทั้งนี้เนื่องจากจะต้องใช้ระยะเวลาในการซ่อมแซมค่อนข้างมากหากใช้ซ่อมแซมรอยร้าวขนาดใหญ่ และการซ่อมแซมด้วยวิธีเอ็มไอซีพีจำเป็นที่จะต้องทำให้สารละลายท่วมอยู่บนบริเวณรอยร้าว ดังนั้นพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมคือ พื้นผิวแนวระนาบเนื่องจากไม่มีการไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการพิจารณาในด้านระยะเวลาในการซ่อมแซม เนื่องจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเน้นใช้ระยะเวลาในการซ่อมแซมมากกว่า 20 วัน ซึ่งสำหรับการใช้งานจริง การซ่อมแซมที่ใช้ระยะเวลานานส่งผลกระทบต่อปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น งบประมาณในการซ่อมแซม ความไม่สะดวกจากการซ่อมแซม เป็นต้น เพราะฉะนั้นอาจมีการศึกษาทางด้านเชื้อแบคทีเรียหรือสารเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น โดยใช้ข้อมูลความรู้ทางด้านสิ่งแวดล้อมและวิศวกรรมโยธามาประยุกต์ใช้เพื่อให้วิธีเอ็มไอซีพีนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

รายการอ้างอิง

- DIN 1048 Part 5 (1991). Testing Methods for Concrete; Hardened Concrete, Specially Prepared Specimens.
- ACHAL, V., MUKERJEE, A. & REDDY, M. S. 2013. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 48, 1-5.
- ALAN RICHARDSON, KATHRYN COVENTRY & PASLEY, J. 2016. Bacterial Crack Sealing and Surface Finish Application to Concrete. *Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*.
- ASTM, A. 2009. C597-09 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 2009. *ASTM International: West Conshohocken, PA*.
- ASTM, C. 2004. 1585-04 *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*.
- CHOI, S.-G., WANG, K., WEN, Z. & CHU, J. 2017. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method. *Cement and Concrete Composites*, 83, 209-221.
- DE MUYNCK, W., DEBROUWER, D., DE BELIE, N. & VERSTRAETE, W. 2008. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and concrete Research*, 38, 1005-1014.
- JAGADEESHA KUMAR, B., PRABHAKARA, R. & PUSHPA, H. 2013. Bio Mineralisation Of Calcium Carbonate By Different Bacterial Strains And Their Application In Concrete Crack Remediation. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 6, 202-213.
- KALFON, A., LARGET-THIERY, I., CHARLES, J.-F. & BARJAC, H. D. 1983. Growth, sporulation and larvicidal activity of *Bacillus sphaericus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 18, 168-173.
- KHALIQ, W. & EHSAN, M. B. 2016. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349-357.

- LUO, M., QIAN, C.-X. & LI, R.-Y. 2015. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and building materials*, 87, 1-7.
- MONTY, C. L. 1995. The Rise and Nature of Carbonate Mud-Mounds: An Introductory Actualistic Approach. *Carbonate mud-mounds: Their origin and evolution*, 11-48.
- MORTENSEN, B. M., HABER, M. J., DEJONG, J. T., CASLAKE, L. F. & NELSON, D. C. 2011. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Applied Microbiology*, 111, 338-349.
- PATIL, K. R., WAGHERE, B., SALVE, R., AHIRE, B., PATEL, K., BHOIR, P. & THAKARE, A. 2016. Effect of bacteria calcite precipitation on compressive strength of general concrete cubes. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* 3, 423 - 429.
- PATTANAIK, S. 2011. Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures. *ACI Mater. J*, 81, 211-230.
- PITRODA, J., UMRIGAR, D. F., PRINCIPAL, B. & ANAND, G.-I. 2013. Evaluation of sorptivity and water absorption of concrete with partial replacement of cement by thermal industry waste (Fly Ash). *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume*, 2.
- PULLAR-STRECKER, P. 2002. *Concrete reinforcement corrosion: From assessment to repair decisions*, Thomas Telford.
- RASBAND, W., IMAGE, J. & HEALTH, U. N. I. O. 1997. 2011, “. ImageJ64,” *US National Institutes of Health, Bethesda, MD*.
- ŞAHMARAN, M. & LI, V. C. 2009. Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC. *Materials and structures*, 42, 593-603.
- STOCKS-FISCHER, S., GALINAT, J. K. & BANG, S. S. 1999. Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 1563-1571.
- THANOON, W. A., JAAFAR, M. S., KADIR, M. R. A. & NOORZAEI, J. 2005. Repair and structural performance of initially cracked reinforced concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 19, 595-603.

- TODAR. 2008-2012. *K. Todar's Online Textbook of Bacteriology* [Online]. Available: <http://textbookofbacteriology.net/> [Accessed 31 October 2016].
- VAN TITTELBOOM, K., DE BELIE, N., DE MUYNCK, W. & VERSTRAETE, W. 2010. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40, 157-166.
- WANG, J. Y., SOENS, H., VERSTRAETE, W. & DE BELIE, N. 2014. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139-152.
- WIKTOR, V. & JONKERS, H. M. 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement & Concrete Composites*, 33, 763-770.
- WORRELL, E., PRICE, L., MARTIN, N., HENDRIKS, C. & MEIDA, L. O. 2001. Carbon dioxide emissions from the global cement industry 1. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 303-329.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง, ส. 2555. มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน. ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล.
- สุรินทร์ ลิ้มปนาท, ว. อ. แ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 309 - 322.
- เอกสิทธิ์, ศ. ด. ส. 2017. “Chula Smart Lens” เปลี่ยนมือถือเป็นกล้องจุลทรรศน์ขนาดย่อมพร้อมพกพา หนึ่งในนวัตกรรมในงาน จุฬาฯ Expo 2017 [Online]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Available: <http://www.chula.ac.th/th/archive/57768> [Accessed].



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกานต์ จันทร์ประสิทธิ์ เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ.2537 จบการศึกษาชั้นปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา พ.ศ.2558 ปัจจุบันกำลังศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

