

ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเองโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียประเภท  
ชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Crack Closing Performance of Self-healing Mortar using Microbially induced Calcium  
Carbonate Precipitation Bacterial Spores



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซม ตัวเองโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียประเภทชักนำให้เกิดการ ตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต
โดย	น.ส.วนาลี ภาณุพรประพงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ)

วนาลี ภาณุพรประพงค์ : ประสิทธิภาพในการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ซ่อมแซม  
 ตัวเองโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรียประเภทชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียม  
 คาร์บอเนต. ( Crack Closing Performance of Self-healing Mortar using  
 Microbially induced Calcium Carbonate Precipitation Bacterial Spores) อ.ที่  
 ปริญญาหลัก : ผศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอ  
 สรรวง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสม  
 ไมโครแคปซูลของสปอร์แบคทีเรียชนิดชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดย  
 ห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรียด้วยไซโตเดียมอัลจินเตเพื่อให้สปอร์สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายใต้  
 สภาพแวดล้อมของการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ ปริมาณไมโครแคปซูลที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ ร้อยละ  
 0, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ชนิดตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ มอร์ตาร์รูปทรง  
 ลูกบาศก์ ขนาด 50 มม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วัน และมอร์ตาร์รูปทรง  
 สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีรอยบากบริเวณฐาน ขนาด 280 x 177.5 x 50 มม. สำหรับทดสอบประสิทธิภาพ  
 ในการซ่อมแซมรอยแตก ซึ่งวัดผลจากความกว้างและพื้นที่รอยแตกด้วยกระบวนการประมวลผล  
 ภาพจากภาพถ่ายดิจิทัล จากการศึกษาพบว่าไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพใน  
 การซ่อมแซมรอยแตกเพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณไมโครแคปซูลร้อยละ 1.0 สามารถซ่อมแซม  
 รอยแตกได้สมบูรณ์ที่รอยแตกกว้างที่สุดขนาด 0.8 มม. ภายใน 3 วันหลังจากพ่นน้ำ นอกจากนี้ยัง  
 ศึกษาผลของปริมาณไมโครแคปซูลต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วัน ความพรุน และการดูดซึมน้ำ  
 ของมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณไมโครแคปซูลไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่  
 28 วัน ความพรุน และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามเมื่อเติมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย  
 ลงในมอร์ตาร์จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของมอร์ตาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6070472721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

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

Vanalee Phanupornprapong : Crack Closing Performance of Self-healing Mortar using Microbially induced Calcium Carbonate Precipitation Bacterial Spores. Advisor: Asst. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D. Co-advisor: Prof. SUCHED LIKITLERSUANG, D.Phil

The aim of this study is to investigate the crack closing performance of self-healing mortar containing microcapsule of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) bacterial spores. The bacterial spores are encapsulated by sodium alginate to protect the bacterial spores under the severe conditions of mortar mixing. The amounts of microcapsule were varied at 0%, 0.5%, and 1.0% by cement weight. The specimen types used in the study were a 50 mm cubic-shaped mortar for the 28-day compressive strength test, and the 280 x 177.5 x 50 mm notched rectangular-shaped mortar for healing efficiency testing. This is measured by the width and area of the cracks with the image processing of digital photographs. The results showed that the use of microcapsules increased the healing ratio of mortar. Cracks of specimen containing 1.0% of microcapsules were completely healed for 0.8 mm maximum crack width within 3 days after water spraying. The effect of microcapsule dosages on the compressive strength, porosity and absorption of mortar was also investigated. It was found that the microcapsule content did not affect the compressive strength, porosity and absorption of mortar. On the other hand, the compressive strength of mortar remarkably decreased when the bacterial nutrients were added in the mortar.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล และ ศาสตราจารย์ สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง ที่ได้ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัยจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ที่ได้ให้ความความรู้ทางด้านจุลชีววิทยา รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการเตรียมสเปร์ของแบคทีเรีย

ขอขอบคุณ ดร.กิม เหนือคลอง ดร.สินีนานู ไทยบุญรอด น.ส.จิรภา อินทรสุนทร น.ส.ชนันดา ชื่นชม นายวรินทร์ ตันอนุชิตติกุล นายชนาธิป ลิ้มวรรณเดช นายอดิศร ชวนปี นายสมพงษ์ ขำแจ้งและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมดที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนวิจัยเพื่อต่อยอดองค์ความรู้สู่การใช้ประโยชน์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) รหัสโครงการ RGU6280001 และทุนวิจัยจากมูลนิธิกระจกเงา (the Asahi Glass Foundation)

วนาลี ภาณุพรประพงค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 คอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง .....	4
2.1.2 กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต.....	8
2.1.3 แบคทีเรียกลุ่มที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (Microbial induced Calcium Carbonate Precipitation; MICP) .....	10
2.1.4 เทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรีย (Microencapsulation) .....	11
2.1.5 การทดสอบกำลังรับแรงของไมโครแคปซูล .....	11
2.1.6 การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ .....	12
2.1.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ .....	13
2.1.8 การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ตาร์ .....	14
2.1.8 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค .....	15

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมไมโครแคปซูลของแบคทีเรีย.....	17
2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย.....	24
2.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ .....	27
บทที่ 3     ระเบียบวิธีวิจัย .....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 การเตรียมสปอร์แบคทีเรียสำหรับผสมกับซีเมนต์ .....	32
3.3 เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ .....	43
3.4 การทดสอบมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง.....	46
3.5 การประมวลผลภาพ (Image Processing).....	50
3.6 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค .....	51
3.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) .....	51
3.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	53
บทที่ 4     ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล .....	54
4.1 ทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูล .....	54
4.2 ผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ .....	55
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	56
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ .....	58
4.4.1 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรีย.....	58
4.4.2 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรียร้อยละ 0.5....	62
4.4.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรียร้อยละ 1 .....	66
4.4.4 อิทธิพลของปริมาณไมโครแคปซูลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์.....	68
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค.....	71



4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) .....	72
4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	74
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	78
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
ภาคผนวก.....	80
บรรณานุกรม.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	89



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและยาวนานเนื่องจากมีราคาถูก ความทนทานสูง อีกทั้งยังสามารถหล่อเป็นรูปร่างและลักษณะผิวได้หลากหลายตามความต้องการ ซึ่งสิ่งก่อสร้างที่ใช้เป็นลักษณะของปูนเปลือยจะพบเห็นได้มากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พบว่าปัญหา รอยแตกบริเวณผิวของปูนนั้นเป็นปัญหาหลักของโครงสร้างประเภทดังกล่าว ถ้าโครงสร้างนั้นเกิด รอยแตกและไม่ได้รับการซ่อมแซมเป็นระยะเวลาเวลานาน นอกจากจะส่งผลกระทบต่อความสวยงามของ โครงสร้างนั้น ๆ แล้ว ยังจะส่งผลกระทบต่อความทนทานด้วยเช่นกัน โดยในปัจจุบันการซ่อมแซมรอยแตก บริเวณผิวมีหลายวิธีซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตก ถ้ารอยแตกมีขนาดเล็กวิธีการซ่อมแซมที่ นิยมใช้ คือ การอัดฉีดสารเชื่อมประสาน เช่น อีพ็อกซี ซึ่งข้อจำกัดของวิธีนี้คือต้องใช้ผู้มีความ ชำนาญเพื่อให้ซ่อมได้อย่างมีคุณภาพ และสำหรับวัสดุซ่อมบางชนิดจำเป็นต้องระมัดระวังไม่ให้สารเคมี แข็งตัวระหว่างการทำงาน นอกจากนี้สารเคมีบางชนิดยังติดไฟได้ง่ายและไม่อาจใช้ได้ในพื้นที่ อากาศไม่มีการถ่ายเท [1] ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเสนอวิธีการซ่อมแซมรอยแตกบริเวณผิว ทางเลือกใหม่ คือ การซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรียกลุ่มชักนำให้ เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือ Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่จะใช้ผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจากการ ย่อยสลายยูเรียของแบคทีเรียชนิดหนึ่งมาใช้ประสานรอยแตกที่บริเวณผิวของมอร์ตาร์ โดยการ ซ่อมแซมวิธีการดังกล่าวไม่มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่ยุ่งยากซับซ้อน และยังเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2 - 6] มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ที่ซ่อมแซม ตัวเอง ซึ่งประเด็นหลักที่ศึกษา คือ กำลังรับแรงอัด แรงดึง และแรงดัด ทั้งก่อนและหลังการ ซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากประเด็นข้างต้นแล้ว ยังมีประเด็นอื่นที่ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ อาทิ รูปแบบรอยแตกที่เกิดจากการหดตัว ความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้มุ่งประเด็นที่จะศึกษาไปที่ปัจจัยดังกล่าว โดยจะใช้มอร์ตาร์เป็นวัสดุหลักใน การทดสอบ เนื่องจากรอยแตกขนาดเล็กที่มักพบและมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามักจะเป็นรอยแตกที่

เกิดขึ้นบริเวณผิวปูนฉาบ ดังนั้นเพื่อเป็นการจำลองรอยแตกตามลักษณะการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ โดยจะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรอยแตกซึ่งเกิดจากการหดตัวก่อนและหลังการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมกับสปอร์ของแบคทีเรียสายพันธุ์บาซิลลัส สฟิรีคัส (*Bacillus sphaericus*) ที่อัตราส่วนของสปอร์ร้อยละ 0.5 และ 1 ของน้ำหนักซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของสปอร์แบคทีเรีย และทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ด้วยสัดส่วนสปอร์ที่เท่ากันเพื่อหาอัตราส่วนของสปอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานกับปูนฉาบในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาผลของปริมาณสปอร์แบคทีเรียต่ออัตราการซ่อมแซมรอยแตกของมอร์ตาร์
- 2) เพื่อศึกษาผลของปริมาณสปอร์แบคทีเรียต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง
- 3) เพื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1
- 2) แบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัย คือ แบคทีเรีย *Bacillus sphaericus* LMG 22257 (Belgian Coordinated Collection of Microorganisms, Ghent)
- 3) เทคนิคที่ใช้ในการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรียในงานวิจัย คือ การห่อหุ้มด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทราซันและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้โซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate) เป็นสารห่อหุ้ม
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของสปอร์แบคทีเรียร้อยละ 0.5 และ 1 ของน้ำหนักซีเมนต์ โดยวัดจากกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วัน และอัตราการซ่อมแซมรอยแตกของมอร์ตาร์
- 5) การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [7]

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้ทราบถึงพฤติกรรมของการเกิดและการซ่อมแซมรอยแตกบริเวณผิวของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของสปอร์แบคทีเรีย
- 2) สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาส่วนผสมของปูนฉาบและคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 คอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง

คอนกรีตซ่อมแซมตัวเอง (Self-healing concrete) เป็นวัสดุทางเลือกที่มีความสามารถในการประสานรอยแตกที่เกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานช่องว่างขนาดเล็กภายในเนื้อคอนกรีต จาก Li and Herbert [8] และ Gupta and Harn [9] สรุปได้ว่าประเภทของเทคนิคการซ่อมแซมตัวเองแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้

- 1) Autogenous healing เป็นเทคนิคการซ่อมแซมตัวเองที่ง่ายที่สุดเนื่องจากอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชันตามธรรมชาติของคอนกรีต เมื่อเกิดรอยแตกขนาดเล็กและบริเวณรอยแตกได้สัมผัสน้ำและอากาศ จะกระตุ้นทำให้วัสดุซีเมนต์บางส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันครั้งก่อนกลับมาทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้ง ซึ่งเทคนิคการซ่อมแซมตัวเองประเภทดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มปริมาณการเกิดได้ โดยนำสารผสมเพิ่มชนิดที่ทำให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเองมาผสมกับคอนกรีต เมื่อเกิดรอยแตกและมีน้ำบริเวณรอยแตกจะเกิดการเติมเต็มช่องว่าง และจะทำให้เกิดการลดความสามารถในการซึมน้ำของคอนกรีตโดยการขยายตัวของสารเพิ่มการขยายตัวของคอนกรีต (Expansive agent) และการเกิดกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต
- 2) Vascular self-healing เป็นเทคนิคที่นำหลอดแก้วขนาดเล็กที่บรรจุสารเคมีที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต เมื่อรอยแตกผ่านหลอดแก้วจะทำให้สารเคมีไหลออกจากหลอดแก้วและประสานรอยแตกในเนื้อคอนกรีต โดยวิธีนี้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการกำหนดตำแหน่งของหลอดแก้วเพื่อให้รอยแตกผ่านบริเวณนั้น
- 3) Capsule-based self-healing สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามสารที่บรรจุอยู่ภายในแคปซูล
  - 3.1) Chemical encapsulation เป็นเทคนิคที่ห่อหุ้มสารเคมีที่ก่อให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง (Healing agent) ในรูปแบบแคปซูลเพื่อนำมาผสมกับคอนกรีต โดยสารเคมีจะเริ่มทำงานเมื่อมีรอยแตกผ่านแคปซูลที่บรรจุสารเคมีไว้ ซึ่งข้อจำกัด

ของเทคนิคที่ใช้สารเคมีเป็นองค์ประกอบหลักในการซ่อมแซมคือ ภายในแคปซูลมีปริมาณสารเคมีที่จำกัด และไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

- 3.2) Bacterial encapsulation เป็นเทคนิคการนำแคปซูลมาห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรียชนิดที่สามารถทำให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเองในคอนกรีตได้ กล่าวคือ เมื่อเกิดรอยแตกในเนื้อคอนกรีตผ่านแคปซูลที่บรรจุสปอร์ของแบคทีเรียอยู่ภายใน และบริเวณรอยแตกนั้นมียูเอมอยู่ แบคทีเรียจะมีการขยายพันธุ์เพื่อเพิ่มจำนวนและเกิดการทำปฏิกิริยากันภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มาประสานรอยแตก

Capsule-based self-healing ชนิด Bacterial encapsulation มีข้อได้เปรียบจากการประยุกต์ใช้สิ่งมีชีวิตมาเป็นองค์ประกอบหลักจึงถือว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถลดข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณได้อีกด้วย เนื่องจากแบคทีเรียจะสามารถขยายพันธุ์และเพิ่มปริมาณได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้จุดเด่นอีกประการ คือ ความสามารถกระจายตัวของไมโครแคปซูลเนื่องจากมีขนาดเล็กจึงสามารถกระจายได้ทั่วได้อย่างอิสระแตกต่างจากวิธีหลอดแก้ว อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยในอดีตพบว่า น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง โดยหากไม่มีน้ำในบริเวณที่เกิดรอยแตกอาจจะส่งผลให้ไม่เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเองอย่างมีประสิทธิภาพได้[2] นอกจากนี้ต้นทุนในการผลิตซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง

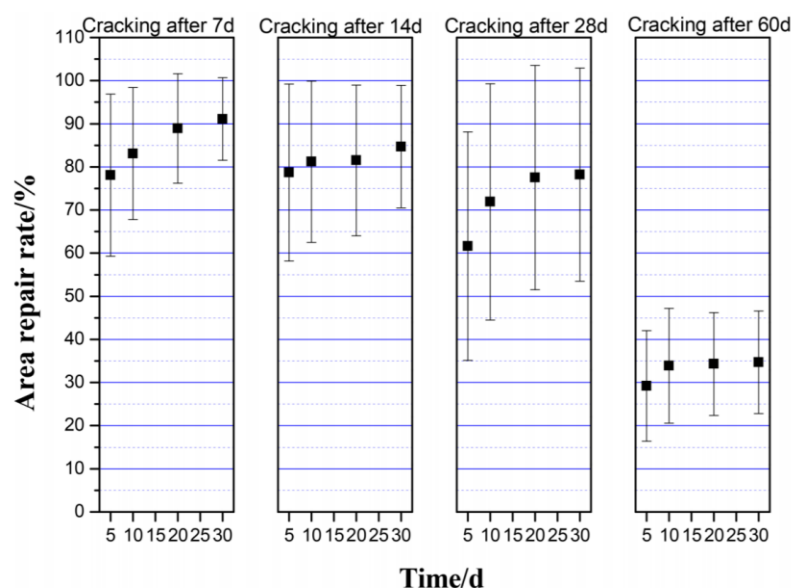
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตอาจมีค่าแตกต่างกันออกไป Meharie et al. [10] ได้นำเสนอปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของสารเคมีหรือแบคทีเรีย ดังนี้

#### 1) ขนาดของรอยแตก

สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกด้วยกระบวนการธรรมชาติของคอนกรีตสามารถซ่อมแซมรอยแตกขนาด 5 – 300 ไมโครเมตร ได้ แต่สำหรับแบคทีเรียสามารถซ่อมแซมรอยแตกอย่างสมบูรณ์ได้กว้างถึง 0.46 มิลลิเมตร ที่ 100 วัน หลังจากเริ่มกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง [11]

## 2) อายุของคอนกรีตขณะเกิดรอยแตก

เมื่อเปรียบเทียบอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเกิดรอยแตกพบว่าที่คอนกรีตอายุน้อยที่สุด (7 วัน) จะมีความสามารถซ่อมแซมรอยแตกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอายุมากกว่า (14, 28, 60 วัน) [12] ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและอัตราการซ่อมแซมรอยแตก [12]

## 3) อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาการซ่อมแซม

ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองจะดีขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ความดันสูง และมีระยะเวลาการซ่อมแซมนานขึ้น [13]

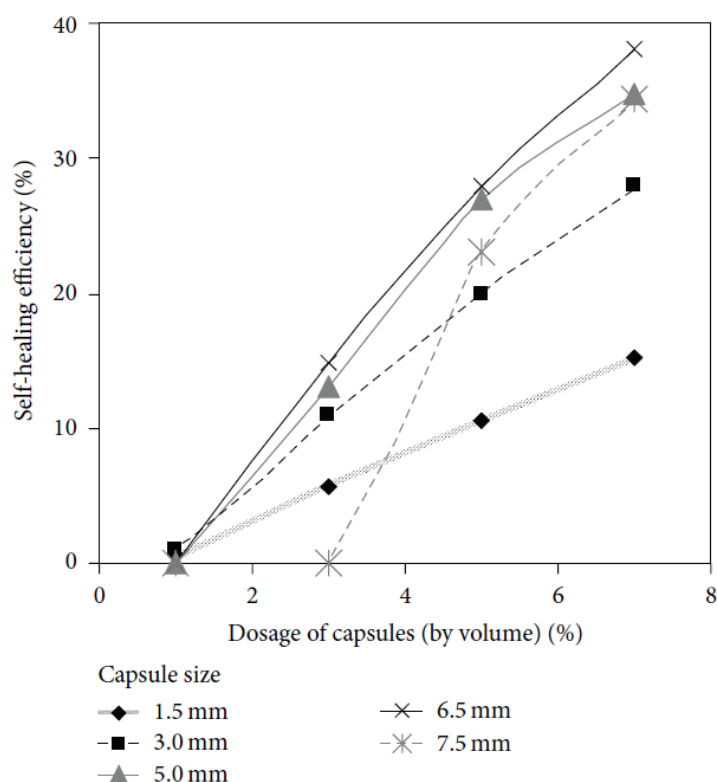
## 4) การเข้าถึงของน้ำและอากาศ

กระบวนการซ่อมแซมตัวเองนั้นจะซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อมีน้ำไหลผ่านบริเวณรอยแตก เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตมีน้ำและอากาศเป็นส่วนประกอบสำคัญ

## 5) ปริมาณ ขนาด และการกระจายตัวของแคปซูล

เมื่อแคปซูลมีขนาดใหญ่และปริมาณมากจะเพิ่มโอกาสที่รอยแตกจะแตกผ่านแคปซูล จะส่งผลให้มีอัตราการซ่อมแซมตัวเองที่สูงขึ้น ซึ่งจะสูงที่สุดที่แคปซูลขนาด 6.5 มม. ปริมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักซีเมนต์ [13] ดังแสดงในภาพที่ 2.2 แต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตลดลงด้วยเช่นกัน สำหรับรูปร่างที่เหมาะสมของแคปซูลควรจะ

มีผิวที่ขรุขระและเปลือกบางเพื่อที่แคปซูลจะสามารถแตกออกมาได้ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ทราบถึงบริเวณที่มีโอกาสจะเกิดรอยแตกสูง เมื่อใส่แคปซูลปริมาณที่สูงกว่าบริเวณอื่นจะเห็นได้ว่าการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีตมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าคอนกรีตที่มีแคปซูลกระจายโดยทั่ว นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีตด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพบว่าขนาดรอยแตกและขนาดของแคปซูลส่งผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมคอนกรีต



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคปซูลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [13]

#### 6) ความหนืดของสารที่ใช้ในการซ่อมแซม

ความหนืดของสารที่เลือกใช้ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง ถ้าสารมีความหนืดมาก ถึงแม้ว่ารอยร้าวจะผ่านแคปซูลและเปลือกแคปซูลแตกออก สารที่ภายในก็จะไม่ไหลออกมา ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง แต่ในทางกลับกัน หากสารมีความหนืดน้อยเกินไป เมื่อเกิดรอยแตกและสารไหลออกมา อาจจะถูกดูดซึมด้วยวัสดุโดยรอบก่อนการเกิดกระบวนการซ่อมแซม [14]



## 7) ส่วนผสมของคอนกรีต

Nishiwaki et al. [15] พบว่าการผสมเส้นใยในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตสามารถซ่อมแซมตัวเองได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยช่วยให้รอยแตกในคอนกรีตมีขนาดเล็กลง หากใช้เส้นใยในปริมาณที่เหมาะสม รอยแตกจะมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างสมบูรณ์

## 8) ชนิดของสารผสมเพิ่ม

Sun et al. [16] พบว่า ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารผสมเพิ่ม กล่าวคือ สารผสมเพิ่มบางชนิดช่วยลดขนาดรอยแตกให้มีขนาดแคบลง ในขณะที่สารบางชนิดช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการเกิดแคลไซต์บริเวณรอยแตก โดยสารผสมเพิ่มชนิด Super memory alloys จะช่วยให้รอยแตกมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการนำแรงกระทำออกซึ่งจะเป็นผลดีกับการซ่อมแซมตัวเองโดยใช้ไมโครแคปซูลมากที่สุด เนื่องจากจะมีการดึงเปลือกของไมโครแคปซูลให้แตกออกเพื่อให้สารภายในไหลออกมา และรอยแตกนั้นจะแคบลงเมื่อไม่มีแรงกระทำ ซึ่งรอยแตกขนาดเล็กนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของการซ่อมแซมตัวเองสูงขึ้น

## 9) ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

เมื่อเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในกระบวนการซ่อมแซมตัวเองจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการซ่อมแซมตัวเองให้เร็วขึ้น เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยายูรีโอไลติก (ดังจะแสดงในหัวข้อ 2.1.2 ต่อไป)

## 10) กลไกการซ่อมแซมตัวเอง

กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต คือ กระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และ กระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเป็นกลไกที่สามารถเติมเต็มรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด

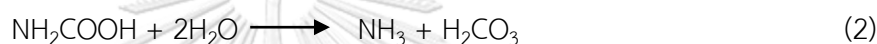
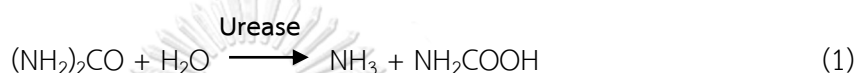
### 2.1.2 กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต

Omeregic et al. [17] ได้อธิบายไว้ว่า กระบวนการยูรีโอไลซิส (Ureolysis) ของแบคทีเรีย เป็นกระบวนการย่อยสลายยูเรียโดยใช้เอนไซม์ยูรีเอส (Urease) ให้กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยกระบวนการดังกล่าวไม่ซับซ้อนและมีช่วงระยะเวลาสั้นในการชักนำให้แคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น กระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการตรึงไนโตรเจน หรือ กระบวนการลดปริมาณซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งสารประกอบ

ดังกล่าวจะทำให้เกิดกระบวนการช่อมแซมตัวเองของคอนกรีต โดย จิรภา อินทรสุนทร [18] ได้สรุปขั้นตอนของกระบวนการดังกล่าวไว้ ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

### 1) การย่อยสลาย (Hydrolysis)

ในขั้นตอนนี้จะเกิดการย่อยสลายทั้งหมด 2 ครั้ง โดยครั้งแรกจะเป็นการย่อยสลายยูเรีย (Urea hydrolysis) ภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ดังแสดงในสมการที่ (1) และครั้งที่สองจะเป็นการย่อยสลายแอมโมเนีย (Ammonia hydrolysis) ภายนอกเซลล์แบคทีเรีย ซึ่งจะส่งผลให้บริเวณโดยรอบของเซลล์มีค่าพีเอชสูงขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ



### 2) การปรับสมดุลกรด-เบส (Acid-base equilibrium)

หลังจากขั้นแรกมีการทำให้ค่าพีเอชบริเวณโดยรอบเซลล์มีค่าสูงขึ้น ระบบจะปรับความสมดุลให้ค่าพีเอชต่ำลง ดังแสดงในสมการที่ (4) และ (5)



### 3) การตกผลึก (Precipitation)

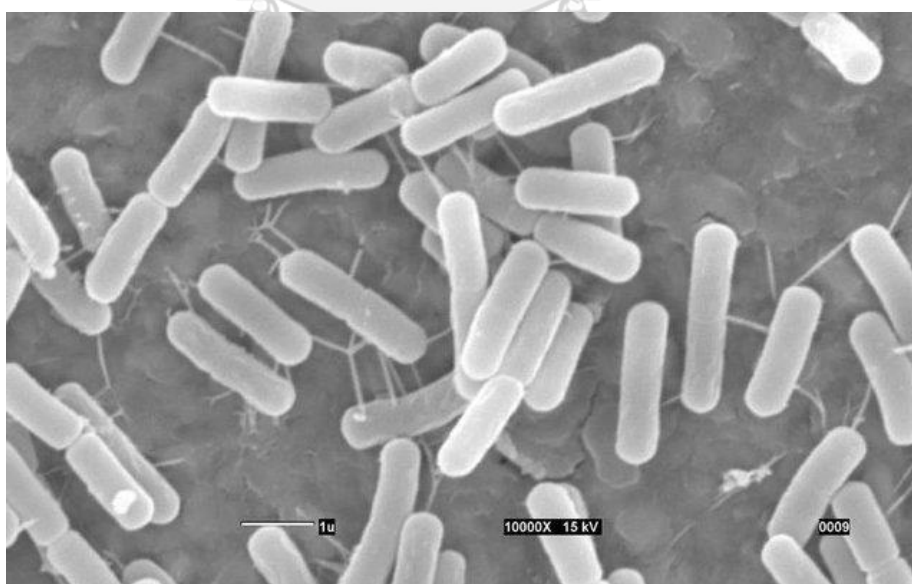
ในขั้นสุดท้ายนี้แคลเซียมไอออนซึ่งเป็นประจุบวกจะจับตัวกับประจุลบบนผนังของเซลล์ และหลังจากนั้นจะจับกับคาร์บอเนตที่ได้จากการปรับสมดุลกรด-เบส จึงทำให้เกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบริเวณโดยรอบเซลล์แบคทีเรีย ดังแสดงในสมการที่ (6) ซึ่งจะมีรูปผลึกเป็นระบบเฮกซาโกนัล (Hexagonal) ที่มีความซับซ้อนมาก โดยส่วนมากจะเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน



### 2.1.3 แบคทีเรียกลุ่มที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (Microbial induced Calcium Carbonate Precipitation; MICP)

แบคทีเรียกลุ่มที่ชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการทำให้เกิดกระบวนการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีตโดยอาศัยกระบวนการยูรีโอไลซิส ดังนั้นแบคทีเรียกลุ่มที่เลือกมาใช้จะต้องมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ยูรีเอส มากเพียงพอที่จะส่งผลให้การทำงานของเอนไซม์ชนิดดังกล่าวจะไม่ถูกยับยั้งโดยแอมโมเนีย เพื่อให้สามารถเกิดกระบวนการย่อยสลายและเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ ซึ่งจะมีแบคทีเรียที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ *Bacillus sphaericus*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pasteurii*, *Proteus vulgaris*, และ *Helicobacter pylori* เป็นต้น

*Bacillus sphaericus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างเป็นแท่งยาว ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยแบคทีเรียชนิดนี้สามารถสร้างสปอร์เพื่อให้ทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูง และสภาวะความเป็นเบสสูงได้ ซึ่งเป็นสภาวะของเนื้อคอนกรีต แต่จะดำรงชีวิตได้ดีในสภาวะเป็นกลางถึงเบสอ่อน (pH 7~9) เป็นเชื้อที่ไม่ก่อโรคในมนุษย์ ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในห้องทดลองและสิ่งแวดล้อมน้อยมาก มีความปลอดภัยทางชีวภาพอยู่ในระดับที่ 1 มักพบได้ในดิน และมักจะถูกใช้ในการกำจัดตัวอ่อนของยุงลาย โดยการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของแบคทีเรียประเภทนี้จะมีออกซิเจน (Oxygen) เป็นปัจจัยสำคัญ [19]



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของแบคทีเรีย *Bacillus sphaericus* [20]

จากงานวิจัยของ Wang et al. [19] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียชนิดนี้ในคอนกรีต พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 8 (6 ชั่วโมงเกิดสปอร์) และลดลงเมื่อมีค่าพีเอชสูงขึ้น โดยการเจริญเติบโตจะช้าที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 12 (48 ชั่วโมงเกิดสปอร์) นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการย่อยสลายยูเรียมากที่สุดที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 8.5 โดยเมื่อสภาวะมีความเป็นเบสสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการย่อยสลายยูเรียลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะความเป็นเบสแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและเกิดกระบวนการย่อยสลายยูเรียได้แต่จะมีอัตราการเกิดที่ช้าลงกว่าในสภาวะพีเอชปานกลางถึงเบสอ่อน

#### 2.1.4 เทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ของแบคทีเรีย (Microencapsulation)

ในการนำสปอร์แบคทีเรียมาผสมกับคอนกรีตนั้นจะต้องห่อหุ้มด้วยสารเคมีให้เป็นรูปแบบแคปซูลขนาดเล็กเพื่อให้สปอร์ของแบคทีเรียมานั้นสามารถดำรงอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมปกติ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) ร่วมกับเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ทำให้แคปซูลมีรูปแบบที่เหมาะสมกับการนำไปผสมกับคอนกรีตในภายหลัง และมีอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียสูง [18] นอกจากนี้ยังสามารถทำได้ในปริมาณมากจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อในรูปแบบอุตสาหกรรมอีกด้วย โดยเทคนิคการห่อหุ้มสปอร์ มีรายละเอียดดังนี้

- 1) เทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน เป็นเทคนิคพื้นฐานสำหรับการห่อหุ้มไมโครแคปซูลโดยการลำเลียงสารละลายผสมผ่านท่อสายยางและบีบอัดสารผ่านหัวเข็มขนาดเล็กลงสู่ภาชนะที่บรรจุสารสำหรับดิงน้ำออก เพื่อให้สารห่อหุ้มแข็งตัว โดยจะได้แคปซูลที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเส้นขึ้นอยู่กับขนาดของหัวเข็มและอัตราเร็วของปั๊มที่ใช้ในการบีบอัดท่อสายยาง
- 2) เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นเทคนิคที่นำของเหลวมาแช่ให้ถึงจุดเยือกแข็งเพื่อเปลี่ยนสถานะ แล้วจึงลดความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อให้สารที่กลายเป็นผลึกสูญเสียน้ำแล้วระเหิดกลายเป็นไอ โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ

#### 2.1.5 การทดสอบกำลังรับแรงของไมโครแคปซูล

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสทางกายภาพ (Texture profile analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหารสำหรับการบดเคี้ยวของฟัน โดยเครื่องทดสอบจะเหมาะสมกับ

วัสดุขนาดเล็กและไม่แข็งมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.2 2.4 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบข้างต้นจะมีหลายค่าด้วยกัน ดังนี้ Fracturability, Hardness, Cohesiveness, Gumminess, Springiness, Chewiness และ Adhesiveness โดยค่าที่สามารถบอกถึงความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ คือ ค่า Hardness เป็นค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการกระทำแรงกดไปที่ชิ้นตัวอย่างในครั้งแรก



ภาพที่ 2.2 เครื่องทดสอบ Texture Analyzer [21]

Hiramatsu and Oka [22] ได้เสนอสมการประมาณค่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุรูปทรงใด ๆ (Irregular shape) จากการทดสอบด้วยการกระทำแรงอัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$\sigma_t = \frac{0.9F_0}{d^2} \quad (7)$$

เมื่อ  $F_0$  หมายถึง แรงอัดกระทำสูงสุดที่จุดประลัย

$d$  หมายถึง ระยะระหว่างจุดที่แรงกระทำ

#### 2.1.6 การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ความพรุน (Porosity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) เป็นคุณสมบัติที่สามารถอธิบายลักษณะของเนื้อมอร์ตาร์ ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอีกด้วย เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มีเนื้อเป็นรูพรองมากจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงลดลงด้วยเช่นกัน

มาตรฐานการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เป็นไปตาม ASTM C642-06 [23] โดยนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 24 ชม. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอบแห้ง ( $W_{OD}$ ) หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิมตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ ( $W_{SD-s}$ ) และสุดท้ายนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 ชม. หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเป็นระยะเวลา 14 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก ในอากาศและในน้ำ เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิมตัวผิวแห้งหลังต้ม น้ำ ( $W_{SD-b}$ ) และน้ำหนักที่ชั่งในน้ำ ( $W_{sub}$ ) ตามลำดับ สมการคำนวณความพรุนและการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{W_{SD-b} - W_{OD}}{W_{SD-b} - W_{sub}} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_{SD-s} - W_{OD}}{W_{OD}} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ  $W_{OD}$  หมายถึง น้ำหนักอบแห้ง  
 $W_{SD-s}$  หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิมตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ  
 $W_{SD-b}$  หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิมตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ  
 $W_{sub}$  หมายถึง น้ำหนักขณะชั่งในน้ำ

### 2.1.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) เป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญที่สุดของมอร์ตาร์ เนื่องจากมอร์ตาร์มีความสามารถในการรับแรงกดและแรงอัดได้ดีกว่าแรงดึง โดยในการทดสอบจะทดสอบมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เนื่องจากการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์จะค่อนข้างคงที่และในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตจะใช้กำลังของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันในการออกแบบเช่นกัน

มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เป็นไปตาม ASTM C109-02 [7] ทดสอบโดยกระทำแรงอัดบนตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อัตราเร็ว 900 ถึง 1800 N/s จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างวิบัติ แล้วจึงนำค่าแรงกระทำและพื้นที่ผิวที่รับแรงกระทำมาคำนวณหากำลังรับแรงอัดประลัย ดังสมการที่ (10)

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (10)$$

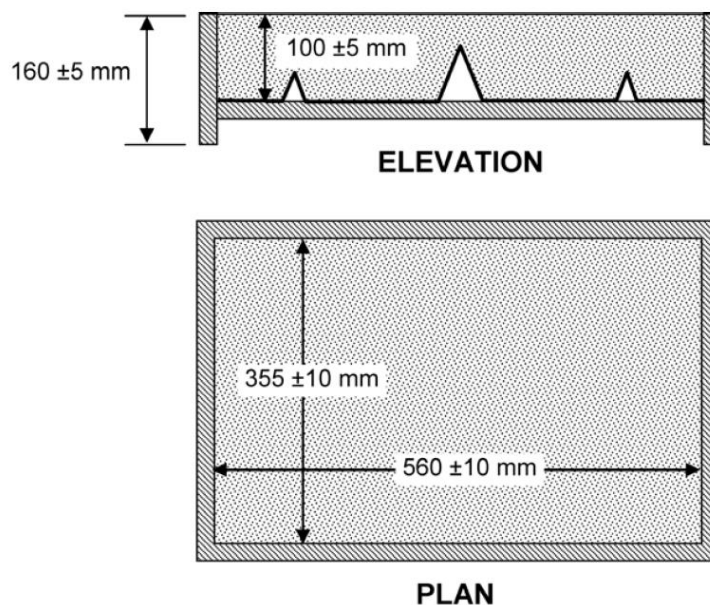
เมื่อ  $P$  หมายถึง แรงอัดกระทำสูงสุดที่จุดประลัย

$A$  หมายถึง พื้นที่ผิวที่รับแรงอัด

### 2.1.8 การทดสอบการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ตาร์

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic shrinkage cracking) เป็นการเกิดรอยแตกขนาดเล็กบริเวณผิวของคอนกรีตในช่วงอายุต้นเนื่องจากการระเหยของน้ำ บริเวณผิวที่สัมผัสอากาศและการดูดน้ำของแม่แบบทำให้บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับแม่แบบมีอัตราการสูญเสียน้ำสูงกว่าบริเวณอื่น จาก ACI 305R-99 [24]

มาตรฐานการทดสอบการหดตัวแบบพลาสติก ASTM C1579-06 [25] เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใย เพื่อเป็นการจำลองรอยแตกขนาดเล็กของคอนกรีต ในการทดสอบตามมาตรฐานจะหล่อตัวอย่างในแบบหล่อที่มีการยึดรั้งบริเวณด้านล่าง ดังภาพที่ 2.5 หลังจากนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากแม่แบบจะนำไปปมในห้องที่มีการควบคุมอัตราการระเหยของน้ำไว้ โดย 24 ชั่วโมงหลังจากผสมคอนกรีตจะมีการบันทึกความกว้างของรอยแตก เพื่อนำมาคำนวณค่า Cracking Reduction Ratio (CRR)

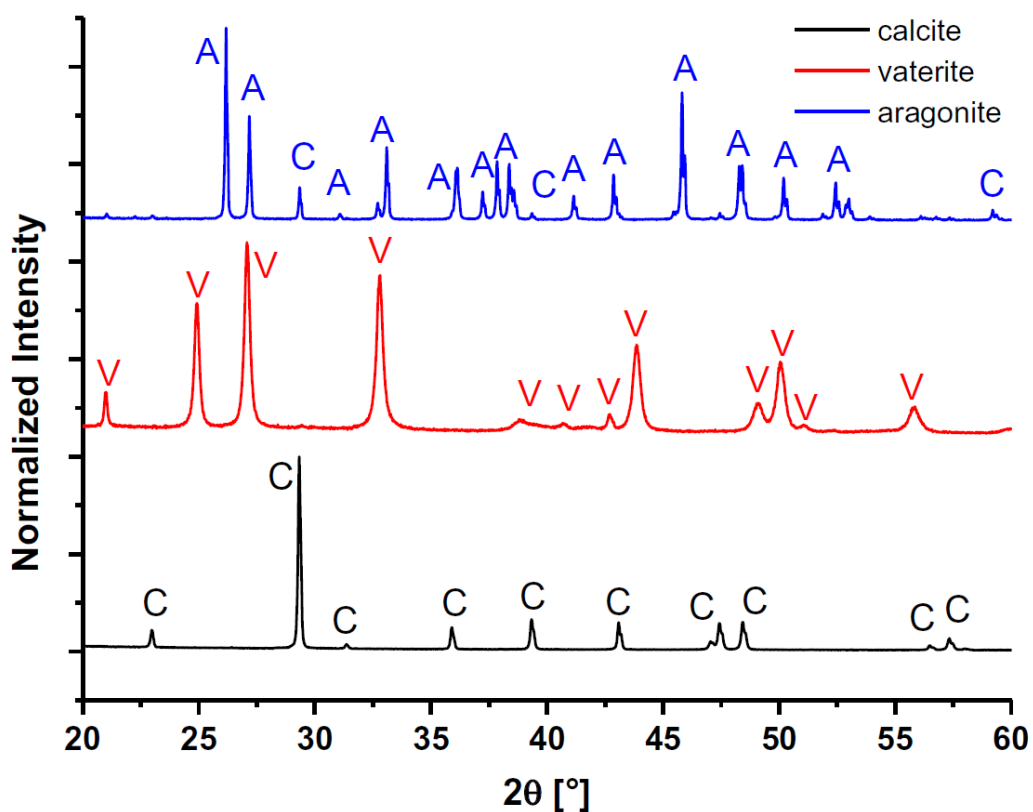


ภาพที่ 2.5 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 [25]

### 2.1.8 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคซึ่งมีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจึงต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วยในการวิเคราะห์ สำหรับเทคนิคในการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับระดับความละเอียดของตัวอย่างที่ต้องการศึกษาและชนิดของข้อมูลที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถให้ข้อมูลทั้งลักษณะทางกายภาพและปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่ต้องการศึกษาได้

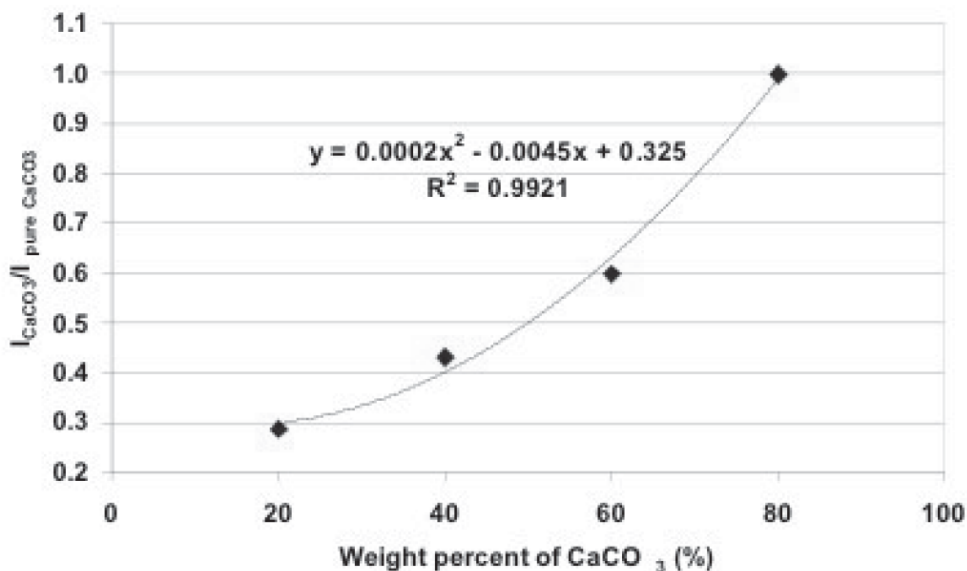
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อแยกปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดโดยอาศัยมุมของการสะท้อนที่ต่างกันโดยเปรียบเทียบกับ XRD Pattern ที่มีรูปแบบเฉพาะตัวสำหรับสารประกอบแต่ละชนิด ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 XRD Pattern ของแคลเซียมคาร์บอเนต [26]

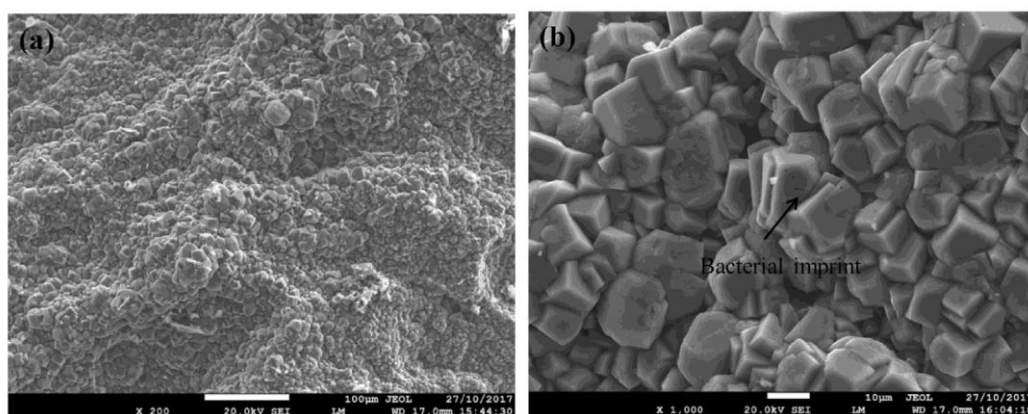


Srilomsak et al. [27] ศึกษาการทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารตั้งต้นในสารประกอบใด ๆ ที่คำนวณจากตำแหน่งพีคของค่าความเข้ม (Intensity) มีค่าใกล้เคียงสัดส่วนจริง ดังแสดงในภาพที่ 2.7



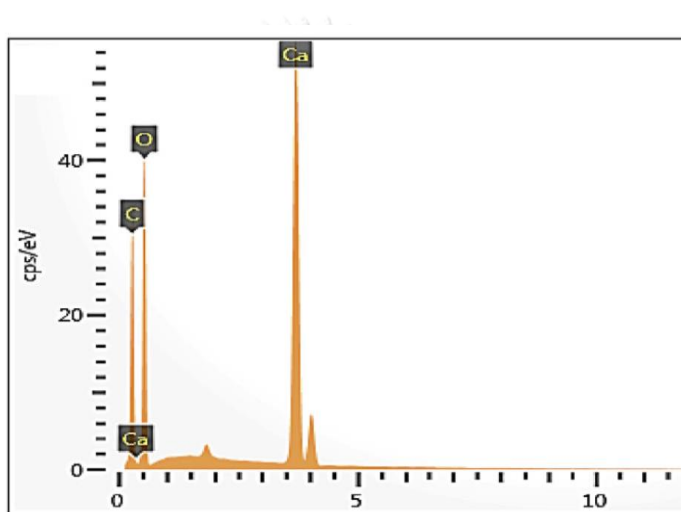
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักจริงและสัดส่วนโดยน้ำหนักจากการคำนวณ [27]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) เป็นอุปกรณ์ถ่ายภาพขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงด้วยลำอิเล็กตรอน โดยการส่องกราดลำอิเล็กตรอนให้ตกกระทบที่ผิวชิ้นตัวอย่าง แล้วจึงตรวจจับสัญญาณสะท้อนกลับเพื่อนำไปประมวลผลเป็นภาพ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [6]

อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ; EDS) เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การทำงานของอุปกรณ์นี้จะวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นตัวอย่างด้วยรังสีเอ็กซ์ เมื่อตัวอย่างถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอน จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบรังสีเอ็กซ์ ซึ่งรังสีชนิดดังกล่าวจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุแต่ละชนิด สเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณของรังสีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดได้กับค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยตำแหน่งพีคของกราฟจะบ่งบอกถึงองค์ประกอบธาตุแต่ละชนิด ซึ่งสเปกตรัมนี้จะสามารถแปลงผลเป็นค่าอัตราส่วนน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุแต่ละชนิดได้



ภาพที่ 2.9 สเปกตรัมจากอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ [6]

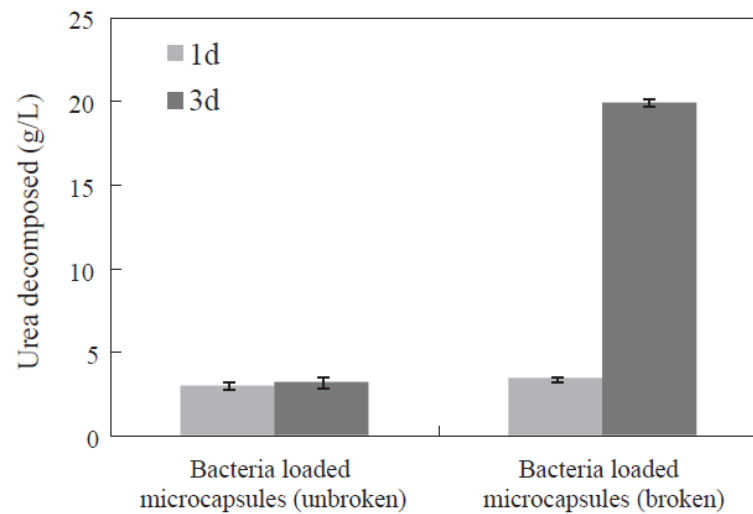
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

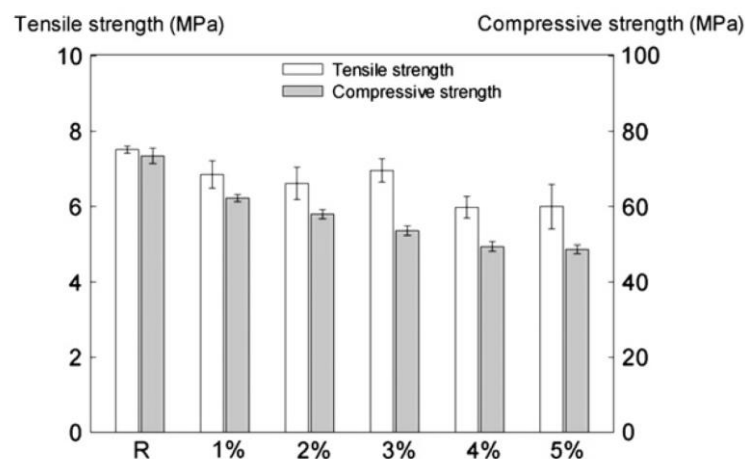
### 2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมไมโครแคปซูลของแบคทีเรีย

Wang et al. [2] ศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมในการใช้ไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์แบคทีเรียในmortar ที่ซ่อมแซมตัวเองได้ โดยใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* นำมาห่อหุ้มโดยใช้สาร Melamine ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) ปริมาณสปอร์  $10^9$  cells/g โดยตรวจสอบอัตราการรอดชีวิตของสปอร์หลังจากการห่อหุ้ม โดยการเปรียบเทียบปริมาณของยูเรียที่ถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียระหว่างวันที่เริ่มบ่มกับเมื่อผ่านไป 3 วัน จากผลการทดสอบพบว่าในตัวอย่างที่ไม่โครแคปซูลไม่แตกออกปริมาณของยูเรียที่ถูกย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่สำหรับตัวอย่างที่ไม่โครแคปซูลแตกออกปริมาณของยูเรียที่ถูกย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นสูงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2.10



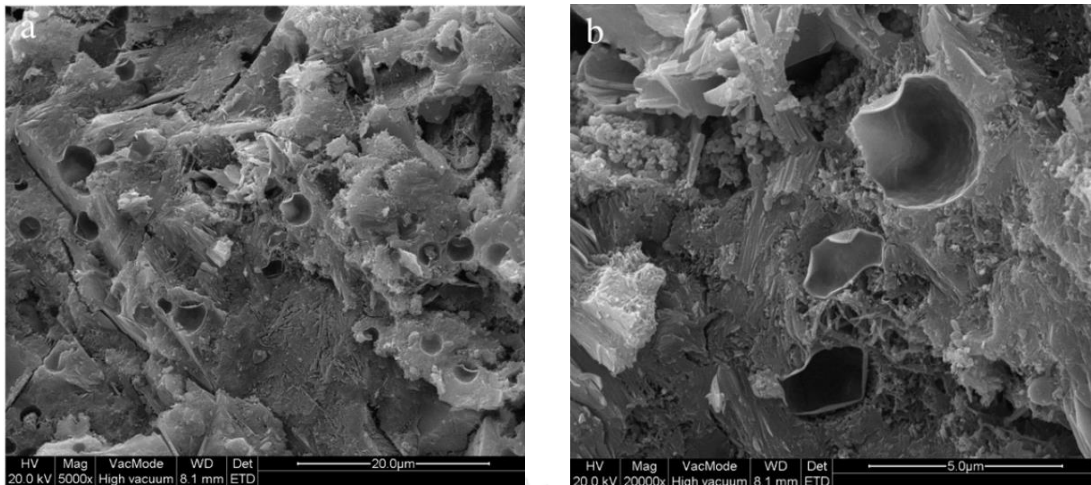
ภาพที่ 2.10 ปริมาณการย่อยสลายยูเรียของไมโครแคปซูลที่บรรจุแบคทีเรีย [2]

หลังจากนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของไมโครแคปซูลต่อคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ โดยใช้ไมโครแคปซูลที่ไม่มีสปอร์แบคทีเรีย พบว่ากำลังรับแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไมโครแคปซูลมากขึ้น และปริมาณไมโครแคปซูลที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัด คือ ร้อยละ 3 ของน้ำหนักซีเมนต์ ดังภาพที่ 2.11



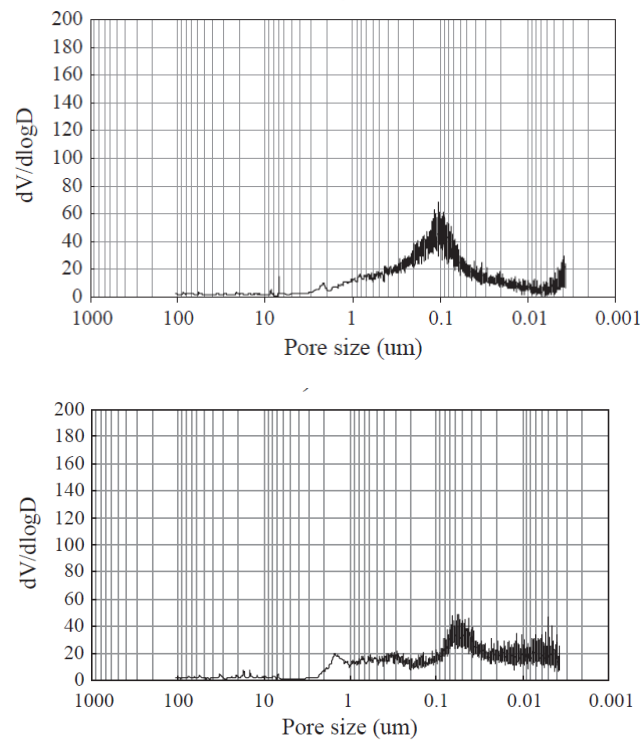
ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไมโครแคปซูลในคอนกรีตต่อกำลังรับแรงดึงและอัด [2]

ต่อมานำตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงดึงมาส่องด้วย SEM เพื่อตรวจสอบการแตกออกของไมโครแคปซูลขณะเกิดรอยแตก จะพบว่าไม่มีเม็ดไมโครแคปซูลที่ถูกฉีกออกกระจายอยู่ภายในเนื้อมอร์ตาร์ โดยบริเวณที่ใกล้กับไมโครแคปซูลที่แตกออกจะมีผลลักษณะรูพรุนหลายเหลี่ยมกระจายอยู่โดยรอบ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ไมโครแคปซูลที่แตกออกบริเวณผิวของมอร์ตาร์ [2]

ในการตรวจสอบขนาดของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตด้วยวิธีการ Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) พบว่าสามารถแบ่งช่องว่างได้เป็น 2 ขนาด คือ ช่องว่างขนาดใหญ่ (1-2 ไมโครเมตร) และช่องว่างขนาดเล็ก (0.02-0.05 ไมโครเมตร) ส่วนภายในเนื้อคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมไมโครแคปซูลมีช่องว่างขนาด 0.1-0.3 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.13



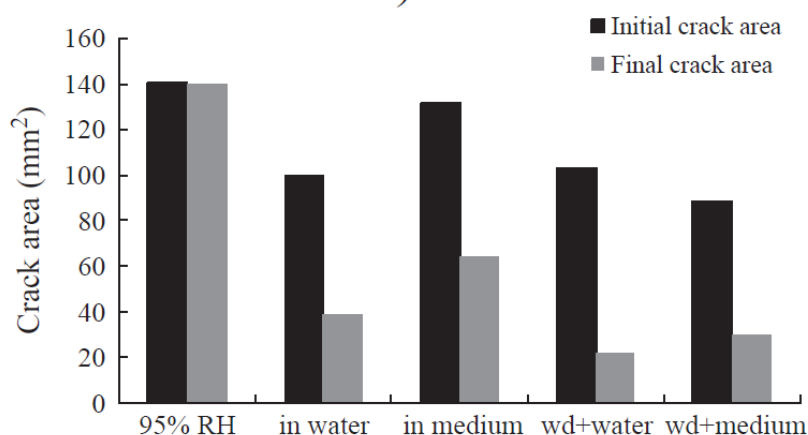
ภาพที่ 2.133 การกระจายตัวของช่องว่างในมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมไมโครแคปซูล (บน)

และ ผสมไมโครแคปซูลปริมาณ ร้อยละ 3 ของน้ำหนักซีเมนต์ (ล่าง) [2]

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมตัวเอง โดยแบ่งเป็น 5 กรณี ได้แก่

- (1) ควบคุมอุณหภูมิ 20°C และความชื้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 (95%RH)
- (2) แช่ในน้ำ (in water)
- (3) แช่ในน้ำที่ผสมด้วยยูเรียและแคลเซียมไนเตรท (in medium)
- (4) แช่ในน้ำ 16 ชั่วโมงต่อวัน หลังจากนั้นตากแห้งในอากาศปกติ (wd+water)
- (5) แช่ในน้ำที่ผสมด้วยยูเรียและแคลเซียมไนเตรท 16 ชั่วโมง ต่อวัน หลังจากนั้นตากแห้งในอากาศปกติ (wd+medium)

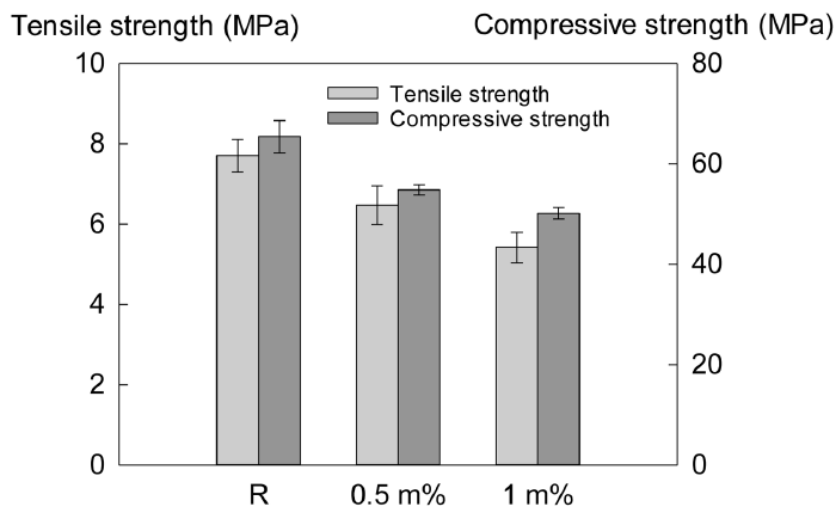
โดยจะทำการวัดประสิทธิภาพจากพื้นที่การซ่อมแซมรอยแตกหลังจากผ่านไป 3 เดือน ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 2.14 สามารถสรุปได้ว่ามีพื้นที่รอยแตกที่มีการซ่อมแซมมากที่สุดเมื่อผ่านกระบวนการ wet-dry cycle ด้วยน้ำ สำหรับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงนั้นไม่มีการบวมซ่อมแซมตัวเองเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 3 เดือน



ภาพที่ 2.14 พื้นที่รอยแตกก่อนและหลังการซ่อมแซมของมอร์ตาร์ที่ผสมไมโครแคปซูลร้อยละ 3 [2]

Wang et al. [2] ศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครแคปซูล Alginate ในงานคอนกรีต โดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus sphaericus* LMG 22257 บ่มเชื้อด้วยการเขย่า 100 rpm ที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 14-28 วัน แล้วจึงนำสปอร์แช่ในน้ำเกลือ (NaCl, 8.5 g/L) เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C นำสปอร์ในสารละลายที่มีความเข้มข้น  $2.3 \times 10^9$  spores/mL เคลือบด้วยสาร Methacrylate Modified Alginate โดยเทคนิค Freeze drying ซึ่งไมโครแคปซูลจากกระบวนการดังกล่าวจะมีขนาด 20–100 ไมโครเมตร และมีปริมาณสปอร์  $4.4 \times 10^9$  spores/g สำหรับการทดสอบผลกระทบของไมโครแคปซูลต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

ได้เลือกใช้ไมโครแคปซูลที่ไม่มีแบคทีเรียในการทดสอบเพื่อศึกษาเฉพาะผลกระทบของการผสมไมโครแคปซูลในคอนกรีต จะพบว่าเมื่อปริมาณไมโครแคปซูลมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและดึงของคอนกรีตลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.15

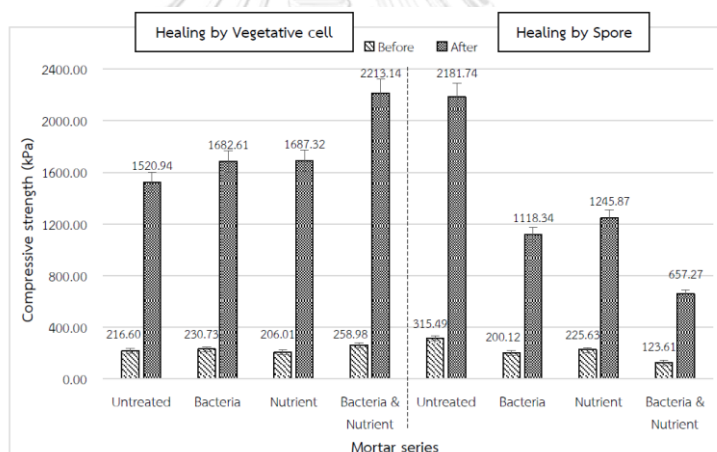


ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไมโครแคปซูลในคอนกรีตต่อกำลังรับแรงดึงและอัด [28]

จิรภา อินทรสุนทร [18] ศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการห่อหุ้มสปอร์ด้วย Sodium Alginate เพื่อนำไปผสมกับมอร์ตาร์ โดยใช้แบคทีเรียชนิด *Bacillus sphaericus* สำหรับการทดลองจะเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การคัดเลือกเทคนิคที่เหมาะสมโดยการตรวจวัดอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียหลังการห่อหุ้ม ซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง เทคนิค Extrusion, เทคนิค Spray drying และ เทคนิค Freeze drying จากผลการทดสอบพบว่า เทคนิค Freeze drying มีอัตราการรอดชีวิตที่สูงที่สุด คือ ร้อยละ 100 ในขณะที่เทคนิค Extrusion มีอัตราการรอดชีวิตที่ร้อยละ 93.81 และเทคนิค Spray drying มีอัตราการรอดชีวิตน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 79.91
- 2) การทดสอบการดำรงชีวิตของสปอร์ในไมโครแคปซูลที่ทำการผสมลงในมอร์ตาร์ จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณยูเรียที่ถูกย่อยสลายมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 61.66, 64.85, 67.36 และ 17.65 สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแบคทีเรียโดยใช้เทคนิค Extrusion, Spray drying, Freeze drying และมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมแบคทีเรีย ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าแต่ละเทคนิคได้ผลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมแบคทีเรียพบว่ามีปริมาณยูเรียที่ถูกย่อยสลายต่ำที่สุด

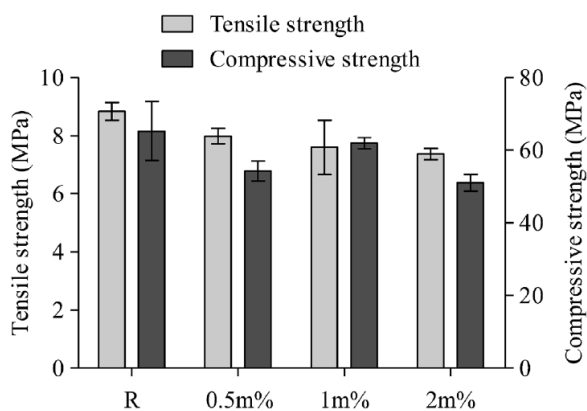
3) การประเมินประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกในมอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบการทำงานของแบคทีเรียที่ต่างกัน คือ การทำงานของแบคทีเรียในสภาพเซลล์ปกติ และในสภาพสปอร์ โดยในแต่ละชุดการทดลองมีการทดสอบความแตกต่างของกรณีการผสมอาหาร กรณีการผสมแบคทีเรีย และกรณีการผสมแบคทีเรียร่วมกับอาหาร จากนั้นทำการสร้างรอยแตกด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด และซ่อมแซมรอยแตกเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ แล้วจึงวัดอัตราร้อยละการซ่อมแซมรอยแตกรวมทั้งกำลังรับแรงอัดหลังจากการซ่อมแซม โดยจากผลการทดสอบพบว่า การซ่อมแซมโดยอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในสภาพเซลล์ปกติ มีอัตราการซ่อมแซมสูงที่สุดที่ร้อยละ 100 สำหรับมอร์ตาร์ที่เติมอาหาร และมอร์ตาร์ที่เติมอาหารผสมกับแบคทีเรีย และในการซ่อมแซมโดยอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรียในสภาพสปอร์ มีอัตราการซ่อมแซมสูงที่สุดที่ร้อยละ 95.35 สำหรับมอร์ตาร์ที่เติมอาหารผสมกับไมโครแคปซูล และรองลงมาคือมอร์ตาร์ที่เติมไมโครแคปซูล ร้อยละ 86.40 ดัง ภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 กำลังรับแรงอัดขณะแตกร้าวของคอนกรีตก่อนการซ่อมแซม และ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตหลังการซ่อมแซม 1 สัปดาห์ [18]

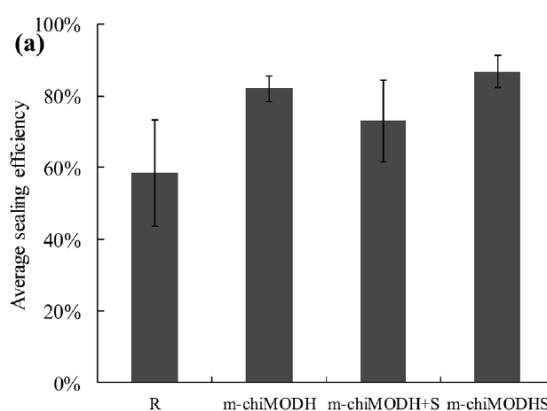
Wang et al. [6] ศึกษาการคอนกรีตซ่อมแซมตัวเองโดยการผสมไมโครแคปซูลที่ใช้ pH-responsive hydrogel ในการเคลือบสปอร์แบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus sphaericus* LMG 22257 โดยนำสปอร์ในสารละลายที่มีความเข้มข้น  $10^9$  spores/mL เคลือบด้วยสาร Methacrylate-modified chitosan ด้วยเทคนิค Freeze drying ซึ่งไมโครแคปซูลจะมีขนาดโดยเฉลี่ย 30–50 ไมโครเมตร และได้ปริมาณสปอร์  $10^9$  spores/g จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณไมโครแคปซูลมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตลดลง และ

ปริมาณไมโครแคปซูลที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัด คือ ร้อยละ 1 ของน้ำหนักซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยใช้ไมโครแคปซูลที่ไม่มีสปอร์ในการทดสอบ



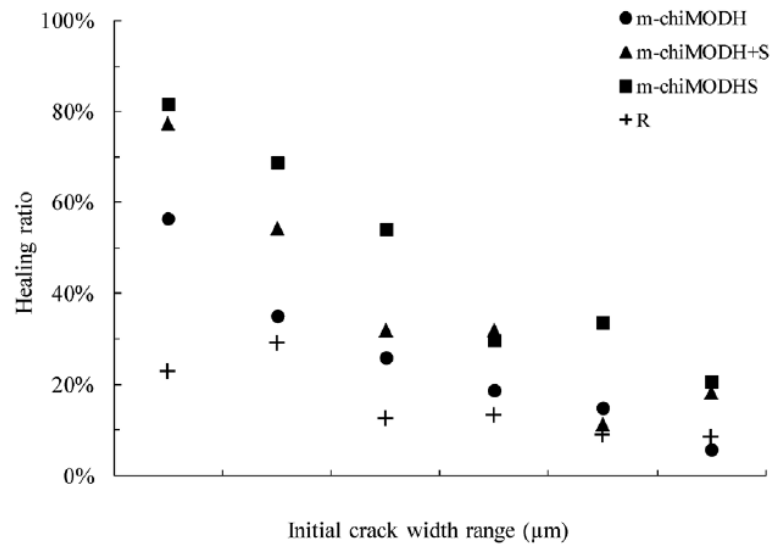
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไมโครแคปซูลในคอนกรีตต่อกำลังรับแรงดึงและอัด [6]

นอกจากนั้นมีการศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองด้วยการกระตุ้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเองโดยใช้น้ำไหลผ่าน และกระบวนการ Wet-dry cycle โดยแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ตากอากาศ 4 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ จากผลการทดสอบทั้งสองกระบวนการพบว่าตัวอย่างที่ผสมสปอร์ที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูลมีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกสูงที่สุด ตัวอย่างที่ผสมไมโครแคปซูลพร้อมกับสปอร์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบอัตราการซ่อมแซมรอยแตกรองลงมา และตัวอย่างที่ไม่มีการผสมสปอร์และไมโครแคปซูลมีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกต่ำที่สุด ดังภาพที่ 2.18 และ ภาพที่ 2.19 นอกจากนี้พบว่ากระบวนการ Wet-dry cycle ส่งผลให้รอยแตกบางรอยมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.18 อัตราการซ่อมแซมรอยแตกสำหรับการกระตุ้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเองโดยใช้น้ำไหลผ่าน [6]

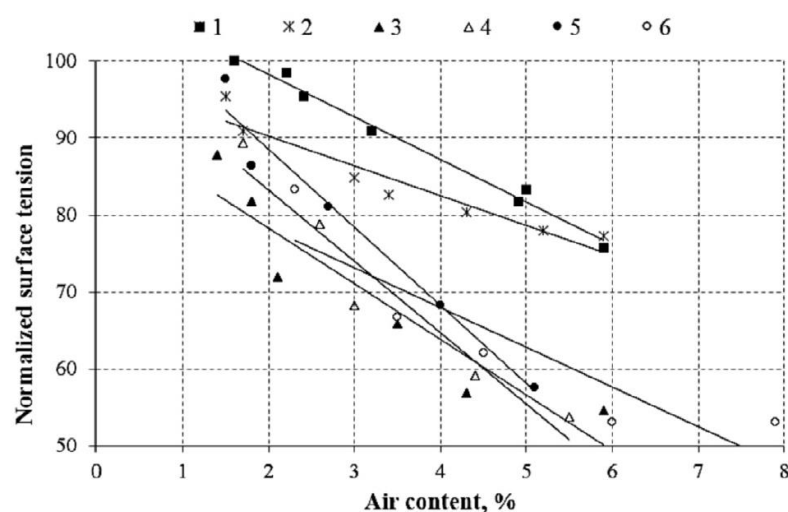




ภาพที่ 2.19 อัตราการซ่อมแซมรอยแตกสำหรับการกระตุ้นกระบวนการซ่อมแซม  
โดยวิธี wet-dry cycle [6]

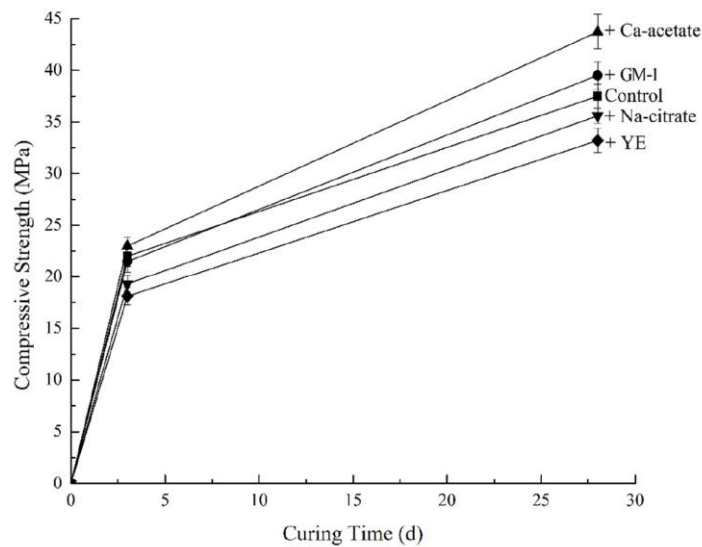
## 2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย

Sahin et al. [29] ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต และแรงดึงผิวของสารผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ พบว่าค่าแรงดึงผิวและปริมาณของสารผสมเพิ่ม สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ โดยสารผสมเพิ่มที่มีแรงดึงผิวต่ำจะส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณฟองอากาศมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.20

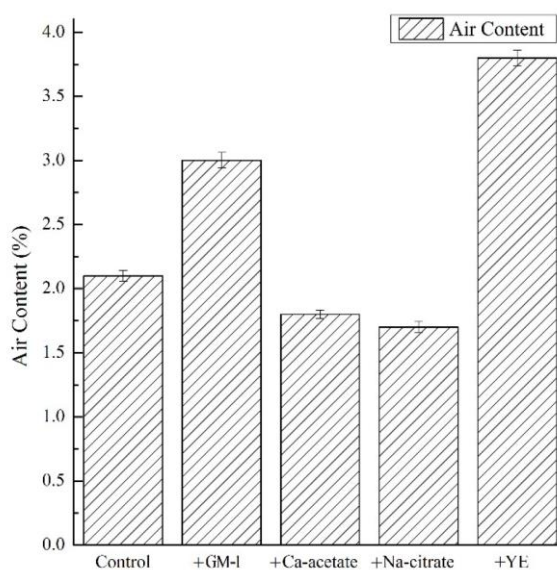


ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศในคอนกรีตและแรงดึงผิวของสารผสมเพิ่ม [29]

Chen et al. [30] ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารอาหารสำหรับแบคทีเรียทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมอะซิเตท, โซเดียมซิเตรทและสารสกัดยีสต์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต พบว่าสารสกัดยีสต์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2.21 และนอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดยีสต์ส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.22 เนื่องจากสารชนิดข้างต้นมีส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างแบบแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic Compound)



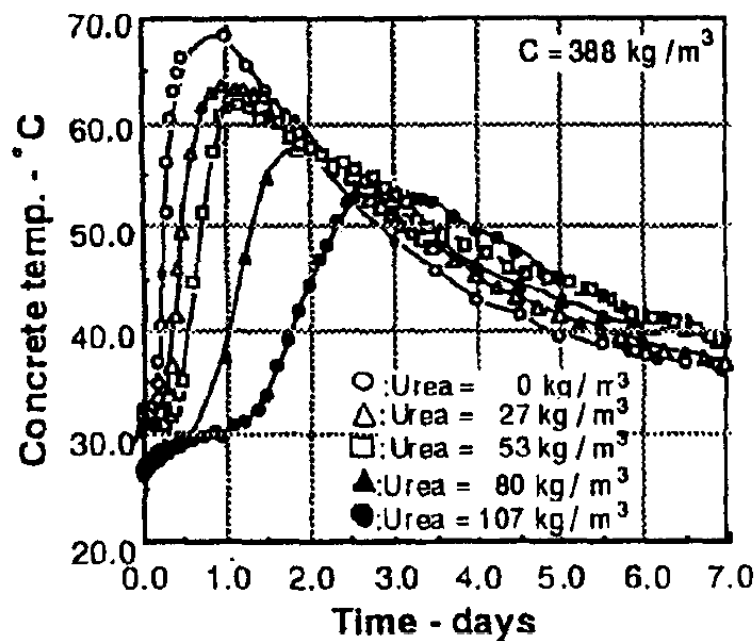
ภาพที่ 2.21 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย [30]



ภาพที่ 2.22 ปริมาณอากาศในคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย [30]

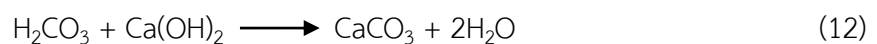
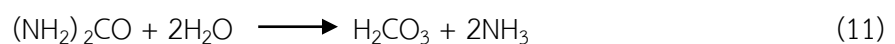
Vandervoot [31] ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารอาหารสำหรับแบคทีเรียทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ยูเรีย, สารสกัดยีสต์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของยูเรียคือร้อยละ 2 ของน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อผสมยูเรียในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงจาก 2 สาเหตุ ดังนี้

- 1) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและยูเรียซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) จะส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดต่ำลงและการพัฒนากำลังของคอนกรีตจึงช้าลงไปด้วย จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นมีค่าลดลง โดยการลดลงของอุณหภูมิในระบบสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบของ Mwaluwinga et al. [32] ดังแสดงในภาพที่ 2.23

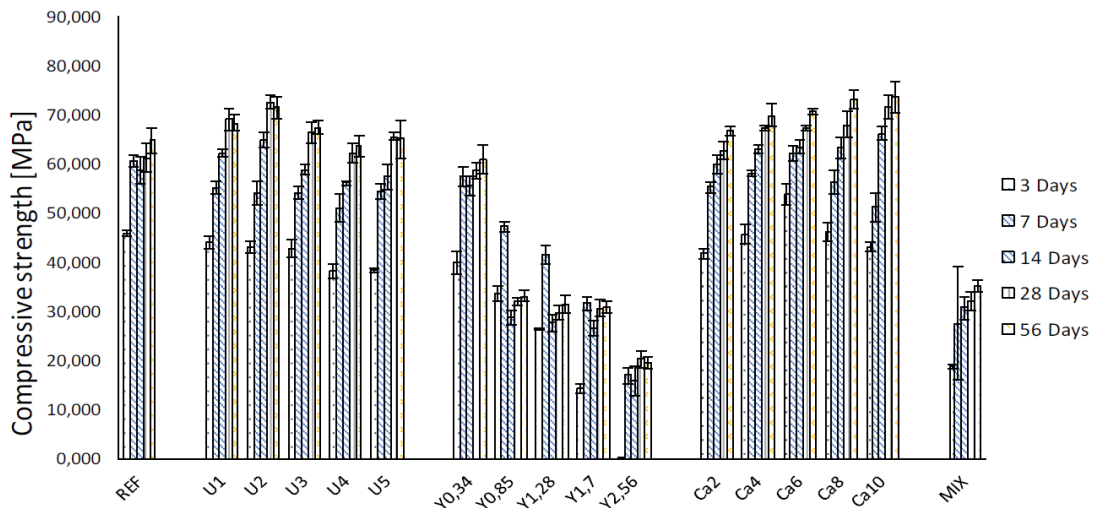


ภาพที่ 2.23 อุณหภูมิของคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย [32]

- 2) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและยูเรียจะแย่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันไปใช้ ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ



นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดยีสต์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง แต่ในทางกลับกันแคลเซียมไนเตรทจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรีย [31]

### 2.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์

จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกโดยใช้สปอร์ของแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะพบว่าในงานวิจัยในส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการทดสอบประสิทธิภาพด้วยการมองเห็น (Visualization) สำหรับวิธีการจำลองรอยแตกจะเน้นใช้เครื่องทดสอบกระทำแรงลงไปที่ขึ้นตัวอย่างทั้งกดด้วยแรงอัดและแรงดัด ซึ่งเป็นการยากที่จะควบคุมขนาดรอยแตกให้มีลักษณะเหมาะสมกับการซ่อมแซม รอยแตกที่มีลักษณะแคบและมีการกระจายตัวโดยทั่วจะมีลักษณะเหมาะสมกับการเลือกใช้กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์มากกว่ารอยแตกที่มีขนาดกว้างและมีตำแหน่งการเกิดเฉพาะตำแหน่ง

**ตารางที่ 2.1** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต โดยอาศัยกระบวนการของสเปิร์มแคตที่เรียกกลุ่ม MICP ที่บรรจุในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคต่าง ๆ

งานวิจัย	วิธีจำลองแยก	วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก			วิธีการระบุกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง
		Visualization	Durability Properties	Mechanical Properties	
Jonkers, 2011 [33]	Compression test	Optical microscopy	Water permeability	-	แช่น้ำ เป็นเวลา 56 วัน
Wiktor and Jonkers, 2011 [11]	Tensile test using embedded steel (ในวันที่ 56)	(1) SEM (2) Optical microscopy with image analysis	-	-	แช่น้ำ เป็นเวลา 100 วัน
Wang et al., 2012 [34]	Three-point bending test (ในวันที่ 14)	(1) SEM (2) Optical microscopy with image analysis	Capillary water absorption	-	แช่น้ำที่ผสมยูเรียและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 40 วัน
Wang et al., 2014 [35]	(1) Tensile test using embedded steel (2) Splitting tensile test	(1) SEM (2) Optical microscopy	Water permeability	-	Wet-dry cycle โดยการแช่น้ำ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 28 วัน

**ตารางที่ 2.1** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต โดยอาศัยกระบวนการของสโปรแบริเรียรี่ในกลุ่ม MICP ที่บรรจุในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคต่าง ๆ (ต่อ)

งานวิจัย	วิธีจำลองรอยแตก	วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก			วิธีการกระตุ้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง
		Visualization	Durability Properties	Mechanical Properties	
Wang et al., 2014 [2]	(1) Tensile test using embedded steel (2) Splitting tensile test	(1) SEM (2) Optical microscopy with image analysis	(1) Water permeability (2) Water absorption	(1) Compressive Strength (2) Tensile Strength	(1) ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สูง (> 95%RH) (2) แช่น้ำ (3) แช่น้ำที่ผสมยูเรียและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (4) Wet-dry cycle โดยการแช่น้ำ 16 ชั่วโมงต่อวัน (5) Wet-dry cycle โดยการแช่น้ำที่ผสมยูเรียและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 16 ชั่วโมงต่อวัน
Fathy et al., 2015 [3]	Compression test (ในวันที่ 7 และ 14)	-	-	(1) Compressive Strength (2) Tensile Strength (3) Flexural Strength	ไม่ระบุวิธี ใช้เวลาทั้งหมด 43 วัน
Khalilq et al., 2016 [4]	Compression test (ในวันที่ 3, 7, 14, 28)	(1) SEM (2) Opt. Microscopy	-	Compressive Strength	ไม่ระบุวิธี ใช้เวลาทั้งหมด 28 วัน

**ตารางที่ 2.1** งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของคอนกรีต โดยอาศัยกระบวนการของสโปรแคทีเรียในกลุ่ม MICP ที่บรรจุในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคต่าง ๆ (ต่อ)

งานวิจัย	วิธีจำลองแยก	วิธีการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก			วิธีการกระตุ้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง
		Visualization	Durability Properties	Mechanical Properties	
Liu et al., 2016 [36]	Splitting tensile test (ในวันที่ 14)	(1) SEM (2) Optical microscopy	-	-	ไม่ระบุวิธี ใช้เวลาทั้งหมด 30 วัน
Tziviloglou et al., 2016 [5]	Three-point bending test (ในวันที่ 28)	(1) SEM (2) Optical microscopy	Water Permeability	(1) Compressive Strength (2) Flexural Strength	Wet-dry cycle โดยการแช่น้ำ 12 ชั่วโมงต่อวัน และ แช่น้ำ โดยใช้เวลาทั้งหมด 56 วัน
Zhang et al., 2017 [37]	Compression test (ในวันที่ 28)	(1) SEM (2) Optical microscopy	-	-	แช่น้ำ เป็นเวลาทั้งหมด 28 วัน
Wang et al., 2018 [6]	Three-point bending test (ในวันที่ 28)	(1) SEM (2) Optical microscopy with image analysis	-	(1) Compressive Strength (2) Tensile Strength	ใช้น้ำไหลผ่าน เป็นเวลาทั้งหมด 70 วัน

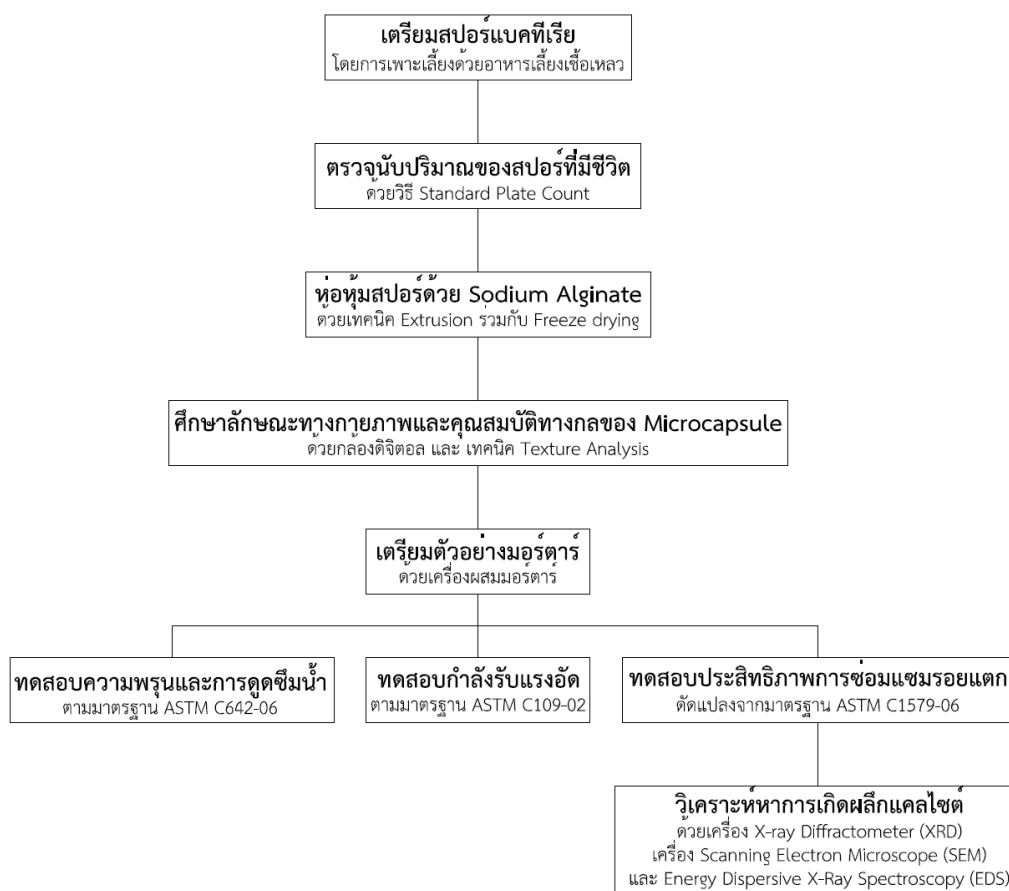
## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรียและมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์ของแบคทีเรีย โดยเริ่มต้นจากการเตรียมสปอร์และห่อหุ้มด้วยเทคนิค Extrusion ร่วมกับ Freeze drying หลังจากนั้นศึกษาลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล และตรวจนับปริมาณสปอร์ที่มีชีวิต เมื่อเตรียมไมโครแคปซูลเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มการทดสอบมอร์ตาร์ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [23] การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [7] ส่วนที่สองคือการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก ซึ่งดัดแปลงขนาดของตัวอย่างจากมาตรฐาน ASTM C1579-06 [25] ให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากข้อจำกัดในการเตรียมสปอร์แบคทีเรียในปริมาณมาก เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบจึงนำตัวอย่างมอร์ตาร์มาศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ และวิเคราะห์ชนิดของผลึกและปริมาณตะกอนเพื่อยืนยันว่าการซ่อมแซมรอยแตกเกิดจากกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตของแบคทีเรียภายในไมโครแคปซูล โดยมีการสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 3.1 และกล่าวถึงรายละเอียดในบทนี้





ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การเตรียมสปอร์แบคทีเรียสำหรับผสมกับซีเมนต์

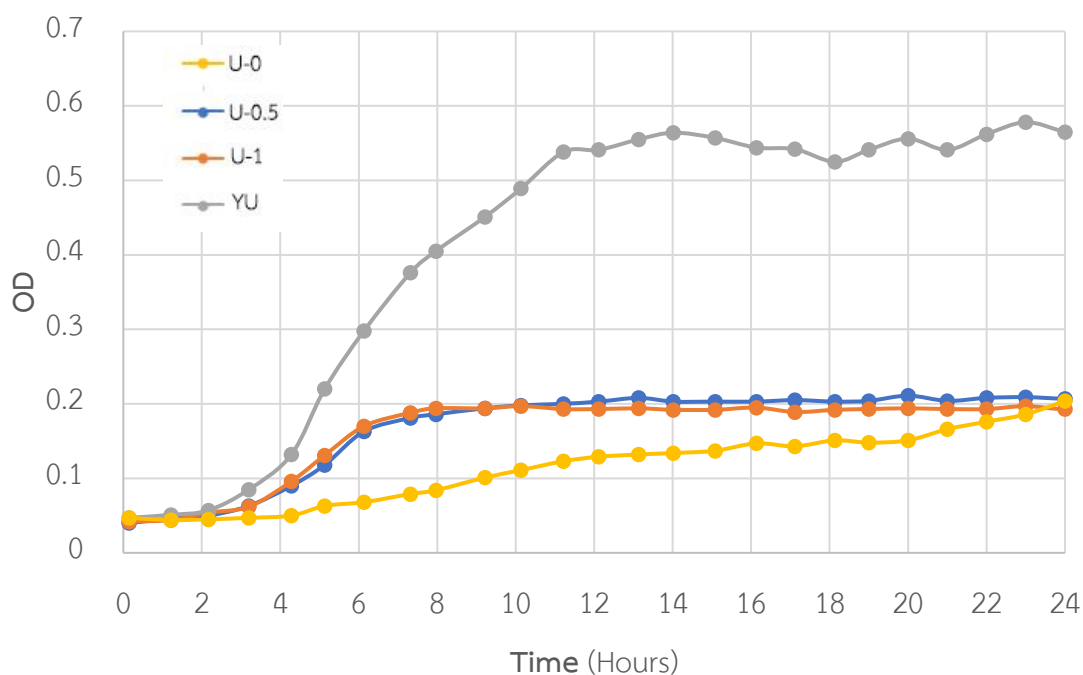
กระบวนการเตรียมสปอร์แบคทีเรียทั้งหมดต้องทำในห้องทดลองปลอดเชื้อเท่านั้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อน หลังจากนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเคลือบสปอร์เรียบร้อยแล้วจึงจะสามารถนำสปอร์ที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูลมาใช้งานภายนอกห้องทดลองปลอดเชื้อได้ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 1) ทดสอบหาสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวที่เหมาะสม

ทดลองเลี้ยงเชื้อด้วยสูตรอาหารที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร ส่วนประกอบของสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมการเจริญเติบโตให้เหมือนกันทั้งหมด ได้แก่ อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้นของหัวเชื้อ 1% v/v ที่ Optical Density (OD) = 2 และ ปริมาตรที่ใช้งาน (Working volume) ร้อยละ 20 จากนั้นตรวจวัดการเจริญเติบโตของเชื้อด้วยค่าการดูดกลืนแสง (OD) ผลการทดสอบดังภาพที่ 3.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สูตรอาหารที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเลี้ยงเชื้อ คือ อาหารสูตร YU เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อสูงที่สุด

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบสูตรอาหารเหลวที่ใช้ในการทดสอบอัตราการเจริญเติบโต

สูตรอาหาร	Nutrient Broth (กรัม)	Yeast Extract (กรัม)	NaHCO <sub>3</sub> (กรัม)	Urea (กรัม)	น้ำกลั่น (มล.)
U-0	0.15	-	0.0424	-	50
U-0.5	0.15	-	0.0424	0.25	50
U-1	0.15	-	0.0424	0.5	50
YU	-	1	-	1	50



ภาพที่ 3.2 อัตราการเจริญเติบโตของเชื้อในอาหารทั้ง 4 ชนิด

## 2) เตรียมอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

เตรียมส่วนผสมอาหารเหลวสูตร YU ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับอาหารแข็งจะใช้สูตรอาหาร U-1 ผสมกับ Agar ในอัตราส่วน 15 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร และผสมสารในบีกเกอร์พร้อมคนด้วยแท่งแก้วให้เข้ากัน หลังจากนั้นเทอาหารที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วใส่ขวด Flask พร้อมอุดฝาขวดด้วยสำลีและปิดด้วยพอยส์ แล้วจึงนำขวด Flask

ที่บรรจุอาหาร ฆ่าเชื้อโรคด้วยเครื่อง Autoclave ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 นาที



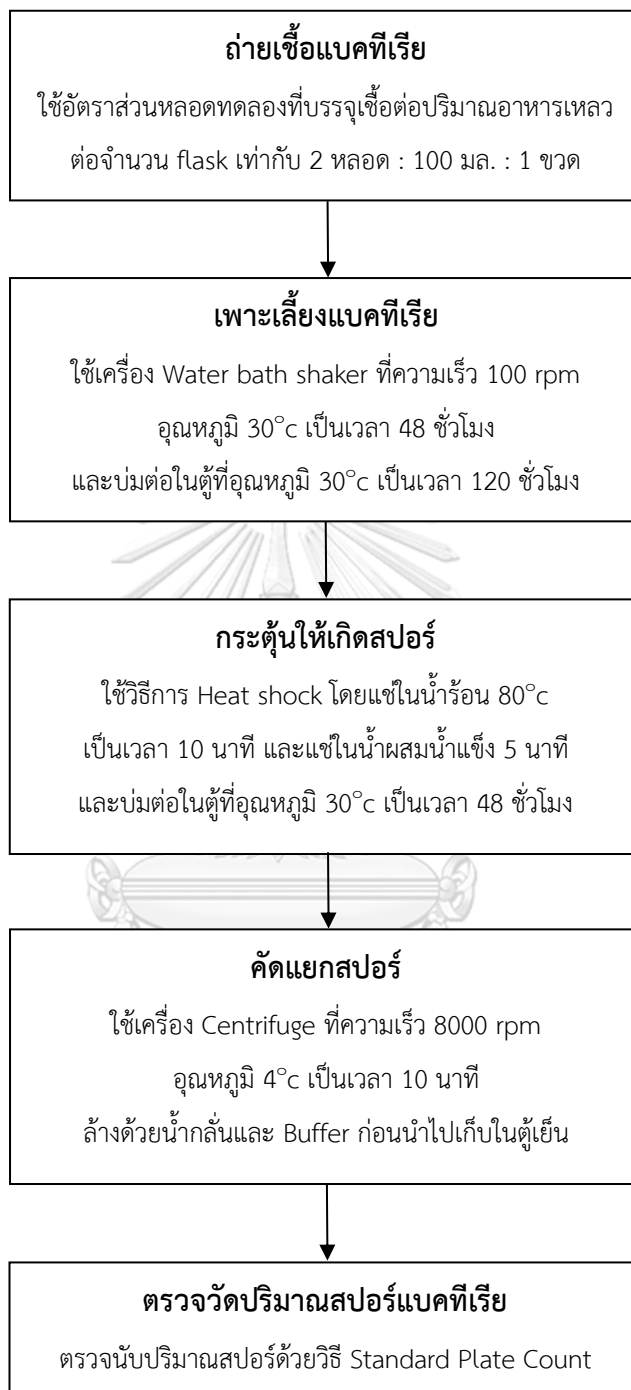
ภาพที่ 3.3 เครื่อง Autoclave สำหรับนึ่งฆ่าเชื้อโรค

### 3) เตรียมสปอร์ของแบคทีเรีย

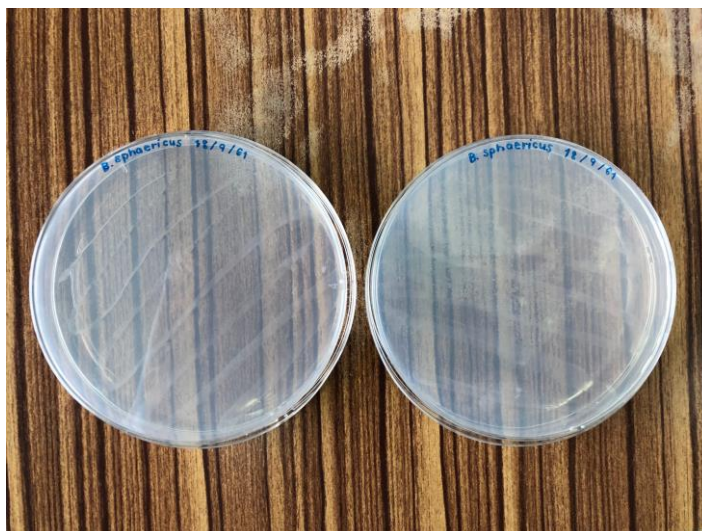
ภาพที่ 3.4 สรุปลขั้นตอนของการเตรียมสปอร์ในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.1) กระตุ้นเชื้อแบคทีเรียเมื่อเก็บรักษาระยะยาวที่อุณหภูมิ 4°C

นำอุปกรณ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave เข้าภายในตู้ปลอดเชื้อ แล้วจึงเทอาหารแข็งใส่ใน Plate โดยเทให้มีความหนาประมาณครึ่งหนึ่งของ Plate และปิดฝา ฆ่าเชื้อด้วยแสง UV-C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเมื่ออาหารแข็งตัวให้ย้ายเชื้อจากอาหารเก่าโดยใช้ห่วงเชี่ยเชื้อ (Loop) ที่ฆ่าเชื้อโดยการลนไฟเรียบร้อยแล้ว เชี่ยเชื้อจากอาหารเก่ามาป้ายบริเวณผิวของอาหารใหม่ที่เตรียมไว้ แล้วจึงนำเชื้อไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อเชื้อมีการเจริญเติบโตจะสังเกตเห็นการรอยสีขาวขุ่นบริเวณผิวด้านบนของอาหาร ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสปอร์ของแบคทีเรีย



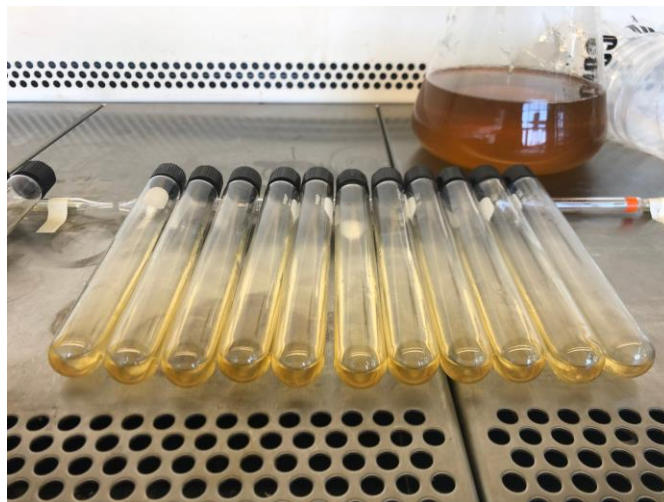
ภาพที่ 3.5 เชื้อบริเวณผิวของอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง

### 3.2) ขยายพันธุ์เชื้อด้วยการเลี้ยงในอาหารแข็ง

นำอุปกรณ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave เข้าภายในตู้ปลอดเชื้อ ดังแสดงในภาพที่ 3.6 แล้วจึงเทอาหารแข็งใส่ในหลอดทดลอง โดยให้มีความสูงประมาณ 1 นิ้ว และปิดฝา วางหลอดเอียง ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ฆ่าเชื้อด้วยแสง UV-C เป็นเวลา 30 นาที เมื่ออาหารแข็งตัวให้ย้ายเชื้อจากอาหารเก่าโดยใช้ห่วงเขี่ยเชื้อที่ฆ่าเชื้อโดยการลนไฟเรียบร้อยแล้ว เขี่ยเชื้อจากอาหารเก่ามาป้ายที่อาหารใหม่ ที่ได้เตรียมไว้ และปิดฝาไม่สนิท เพื่อให้มีอากาศผ่านเข้าไป หลังจากนั้นนำเชื้อไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 ชม.



ภาพที่ 3.6 ตู้ปลอดเชื้อสำหรับกระบวนการขยายพันธุ์เชื้อ



ภาพที่ 3.7 ลักษณะการวางหลอด Slant สำหรับการเตรียมอาหารแข็ง

### 3.3) เตรียมสปอร์ด้วยการเลี้ยงในขวด Flask

นำอุปกรณ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave เข้าภายในตู้ปลอดเชื้อ แล้วจึงเทแบ่งอาหาร โดยแบ่งอาหารเหลวเป็นขวดละ 100 มล. ใช้ Micropipette ดูดอาหารปริมาณ 1 มล. จากขวด Flask และหยดบริเวณผิวของอาหารแข็ง ใช้หวง เชี่ยเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยการลนไฟเรียบร้อยแล้วเชี่ยเชื้อบริเวณผิวหน้าของอาหารแข็งให้ผสมกับอาหารเหลวให้หมด เทอาหารเหลวที่ผสมกับเชื้อกลับใส่ขวด Flask เดิมที่นำอาหารออกมา โดยใช้เชื้อจากหลอดทดลอง จำนวน 2 หลอด ต่อ Flask 1 ขวด เมื่อทำครบ 2 หลอด ให้ลนไฟบริเวณปากขวดก่อนใช้สำลีและแผ่น พอยลปิดฝาขวด ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 อาหารเลี้ยงเชื้อเหลวในขวด Flask

นำขวด Flask ที่ทำการถ่ายเชื้อเรียบร้อยแล้วไปเขย่าในเครื่อง Water bath shaker ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ที่อุณหภูมิ 30°C และความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 48 ชม. หลังจากนั้นนำเชื้อไปเขย่าเสร็จจึงนำกลับมาบ่มในตู้ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 วัน และ Heat shock โดยการแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C ในเครื่อง Water bath ดังแสดงในภาพที่ 3.10 เป็นเวลา 10 นาทีแล้วนำมาแช่ในน้ำเย็นจัดเป็นเวลา 5 นาทีต่อทันที และเชื้อกลับไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Water bath shaker สำหรับกระบวนการขยายพันธุ์เชื้อ



ภาพที่ 3.10 เครื่อง Water bath สำหรับกระบวนการ Heat shock

คัดแยกสปอร์โดยการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ดังแสดงในภาพที่ 3.11 ที่อุณหภูมิ 4°C และความเร็ว 8000 rpm เป็นเวลา 15 นาที นำเชื้อที่ทำการแยกจากอาหารเหลวเรียบร้อยแล้วไปปั่นกับสารละลาย Buffer (0.1%w/v) จำนวน 2 รอบและหลังจากนั้นจึงนำไปปั่นกับน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave เรียบร้อยแล้วอีก 2 รอบที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน คูดน้ำออกจากเชื้อโดยให้เหลือ น้ำเพียงเล็กน้อยแล้วจึงนำไปปั่นกับเครื่อง Vortex จนกระทั่งเชื้อไม่เป็นก้อนติด บริเวณก้นหลอดเทเชื้อใส่หลอดทดลองพร้อมปิดฟิล์มบริเวณรอบฝาของหลอดทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.12 แล้วจึงเก็บใส่ตู้เย็นเพื่อเตรียมนำไปห่อหุ้มสปอร์



ภาพที่ 3.11 เครื่อง Centrifuge สำหรับคัดแยกสปอร์



ภาพที่ 3.12 ลักษณะการจัดเก็บสปอร์เมื่อสิ้นสุดกระบวนการขยายพันธุ์เชื้อ

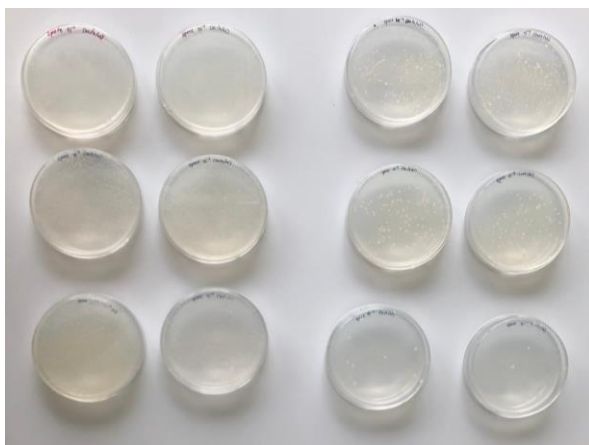


### 3.4) ตรวจนับปริมาณเชื้อ

ทดสอบความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรียโดยวิธี Standard plate count โดยการเตรียมน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วในหลอดทดลอง หลอดละ 9 มล. จำนวน 4 หลอด โดยใช้หลอดปิเปตที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว พร้อมทั้งเขียนสัญลักษณ์ความเข้มข้นบริเวณผิวหลอดทดลองโดยเริ่มตั้งแต่  $10^{-1}$  จนถึง  $10^{-4}$  ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะทำภายในตู้ปลอดเชื้อ

ฆ่าเชื้อหลอดปิเปตและบริเวณปากของหลอดทดลองด้วยการลนไฟ ดูดอาหารเหลวที่มีเชื้อจากขวด Flask ด้วยหลอดปิเปตเป็นปริมาณ 1 มล. แล้วจึงหยดใส่ลงในหลอด  $10^{-1}$  หลังจากนั้นลนไฟบริเวณปากของหลอดทดลองอีกครั้ง ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน เปลี่ยนหลอดปิเปตทุกครั้ง และทำการฆ่าเชื้อหลอดปิเปตบริเวณปากของหลอดทดลองด้วยการลนไฟ ดูดสารจากหลอด  $10^{-1}$  ที่เขย่าเรียบร้อยแล้วใส่หลอดถัดไป คือ หลอด  $10^{-2}$  และทำเช่นเดิมจนกระทั่งครบ 4 หลอด

เมื่อเจือจางเชื้อเรียบร้อยแล้ว จึงหยดสารจากหลอดนั้น ๆ ใส่ Plate ละ 1 มล. โดยทำซ้ำหลอดละ 2 ครั้ง หลังจากนั้นเทอาหารแข็งที่ยังไม่แข็งและผ่านการฆ่าเชื้อตามลงไป แล้วจึงเขย่าให้เข้ากันโดยไม่ให้ของเหลวหกออกมาภายนอก Plate นำ Plate ทั้งหมดที่แข็งตัวแล้วไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จึงได้ลักษณะจุดโคโลนีของเชื้อดังแสดงในภาพที่ 3.13 แล้วจึงจะตรวจนับปริมาณของแบคทีเรียได้ปริมาณสปอร์ทั้งหมดได้เป็น  $3.3 \times 10^8$  cfu ที่ปริมาตร 20 มล. หรือมีสปอร์ที่ความเข้มข้น  $1.65 \times 10^7$  cfu/ml ก่อนนำไปผ่านกระบวนการห่อหุ้มสปอร์



ภาพที่ 3.13 ลักษณะจุดโคโลนีของเชื้อสำหรับการตรวจนับปริมาณเชื้อ

#### 4) ห่อหุ้มสพอร์แบคทีเรียด้วยสาร Alginate โดยเทคนิค Extrusion และ Freeze drying

##### 4.1) เทคนิค Extrusion

เตรียมสารละลาย Alginate (2%w/v) ปริมาณ 5500 มล. และกวนต่อที่ อุณหภูมิ 80°C ความเร็ว 100 rpm จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด หลังจากนั้นเติมสพอร์ทั้งหมด ลงไปแล้วจึงกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที หยด สารละลายที่ทำการผสมสพอร์เรียบร้อยแล้วลงในสารละลาย Sodium Chloride (2%w/v) ผ่านหัวเข็ม (Syringe needle) ขนาด 23G โดยเครื่องสูบแบบรีดสาย (Peristaltic pump) โดยลำเลียงผ่านสายยางซิลิโคน ด้วยความเร็ว 2 rpm ดังแสดง ในภาพที่ 3.14 เก็บรักษาไมโครแคปซูลไว้ในสารละลายเดิมที่ใช้ในกระบวนการ Cross Link ที่อุณหภูมิ 4°C



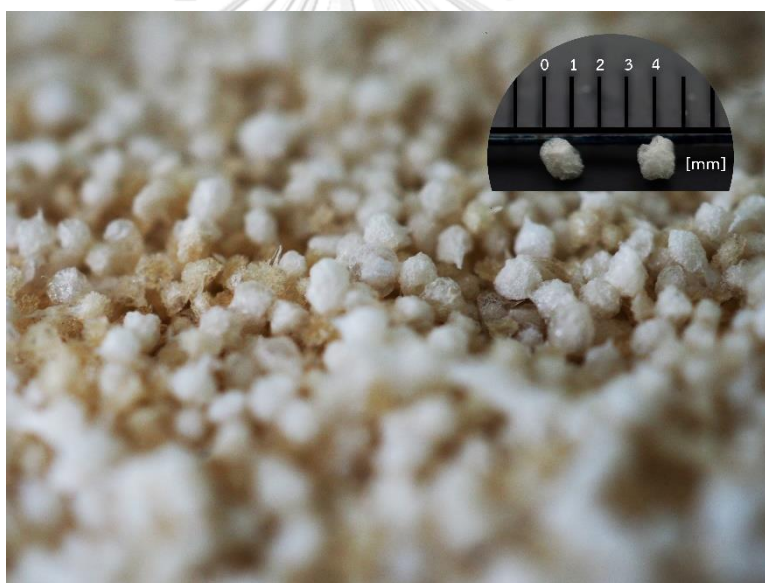
ภาพที่ 3.14 การห่อหุ้มสพอร์ด้วยเทคนิค Extrusion

##### 4.2) เทคนิค Freeze drying

นำไมโครแคปซูลกรองสารละลายออกและซับให้แห้งมาบรรจุใน Flask และ นำ Flask ไปเชื่อมต่อกับเครื่อง Freeze Dryer ดังแสดงในภาพที่ 3.15 หลังจากนั้น ลดความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ 0.1 mBar ที่สภาวะสูญญากาศ เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับปริมาณของไมโครแคปซูลต่อ Flask เมื่อเม็ดไมโครแคปซูลแห้งจะมีลักษณะดังภาพที่ 3.16 การเก็บรักษาจะต้องเก็บไว้ในโถดูดความชื้น



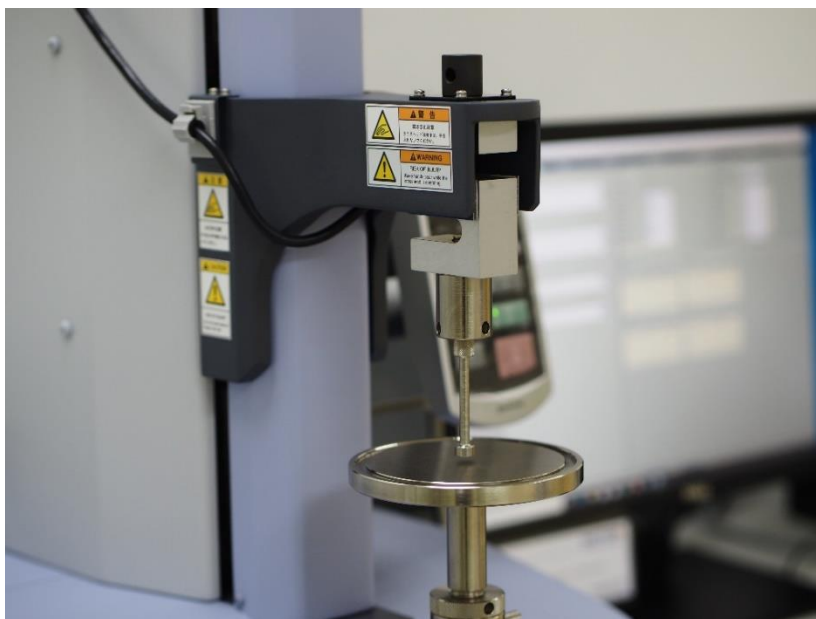
ภาพที่ 3.15 การห่อหุ้มสปอร์ด้วยเทคนิค Freeze Drying



ภาพที่ 3.16 ไมโครแคปซูลที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Extrusion ร่วมกับ Freeze Drying

##### 5) ทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูล

นำไมโครแคปซูลมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. กระทำแรงอัดบนตัวอย่างด้วยเครื่อง Texture Analyzer ดังแสดงในภาพที่ 3.17 ที่อัตราเร็ว 0.5 มม.ต่อวินาที ขณะทดสอบบันทึกค่าแรงกระทำที่จุดประลัยของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 3.17 เครื่อง Texture Analyzer

### 3.3 เตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

เตรียมส่วนผสมซีเมนต์ ทราย น้ำ โดยใช้อัตราส่วนปูนต่อทรายเป็น 1 : 2.75 และ w/c เท่ากับ 0.6 และปริมาณไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์ร้อยละ 0.5 และ 1 ของน้ำหนักซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [7] โดยสมบัติของทรายและไมโครแคปซูลแสดงในตารางที่ 3.3 และสารอาหารสำหรับแบคทีเรียมีส่วนผสมเป็นร้อยละต่อน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนี้ Yeast Extract 0.85%, Urea 4% และ  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  8% สำหรับตัวอย่างที่มีผสมสารอาหารสำหรับแบคทีเรียจะต้องปรับลดน้ำ 2.4% ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามปริมาณสารสัมพันธ์ของสารที่มีองค์ประกอบของน้ำ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนผสม	ซีเมนต์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (มล.)	สปอร์ (กรัม)	สารอาหาร (กรัม)
C	100	275	60	0	0
S-0	100	275	58.54	0	12.85
S-0.5	100	275	58.54	0.5	12.85
S-1	100	275	58.54	1	12.85

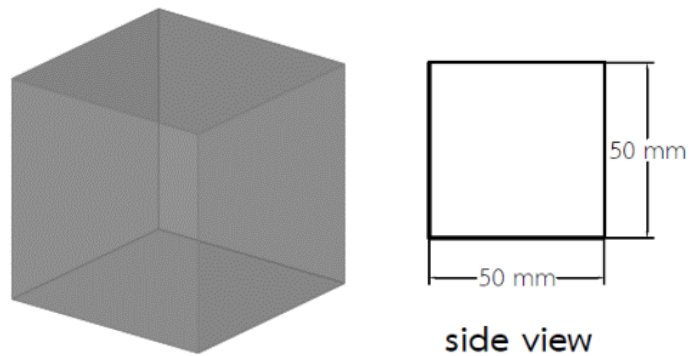
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของทรายและไมโครแคปซูลที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติ	ทราย	ไมโครแคปซูล
ความถ่วงจำเพาะ	2.57	0.20
หน่วยน้ำหนักกบแห้ง (กก./ลบ.ม.)	1664	166.60
การดูดซึมน้ำ (%)	0.7	414.75
โมดูลัสความละเอียด	2.42	-
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	-	1.5

การผสมส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C305-14 [38] โดยเริ่มจากเทน้ำหรือน้ำผสมสารอาหาร ลงบนผงซีเมนต์ แล้วจึงเปิดเครื่องผสมมอร์ตาร์เป็นระยะเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นจึงเริ่มเททรายจนหมดแล้วจึงใส่สปอร์ ภายในระยะเวลา 30 วินาที ถัดมาอีก 30 วินาทีจึงปิดเครื่องผสม ปลดถังไว้ 90 วินาทีแล้วจึงเปิดเครื่องอีก 60 วินาที เมื่อจบกระบวนการผสมแล้วจึงนำมอร์ตาร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วเทใส่แบบหล่อ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

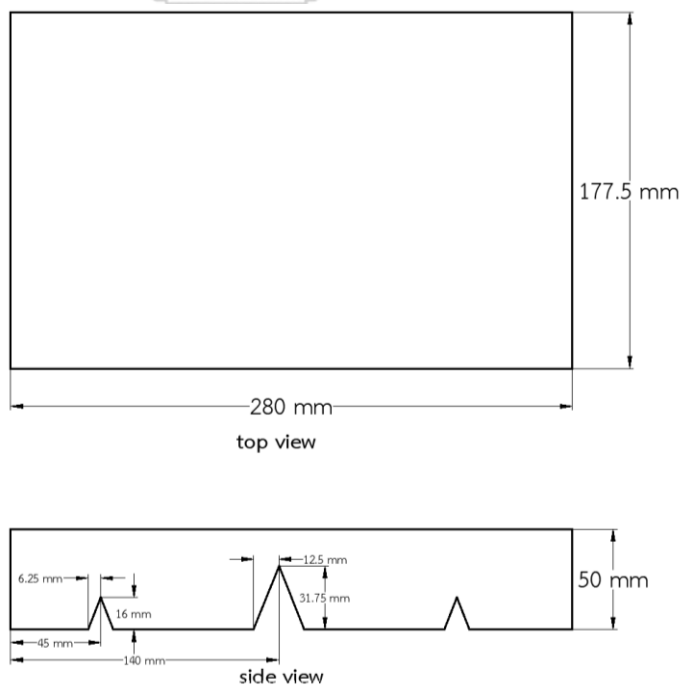
เทมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ ASTM C109-02 [7] รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3.18 โดยแบ่งเทเป็น 2 ชั้นและทำการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กชั้นละ 16 ครั้งภายใน 10 วินาที นำตัวอย่างที่ในแบบหล่อไปบ่มในสภาวะอุณหภูมิ  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งควบคุมความชื้นโดยการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบแล้วจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 28 วัน



ภาพที่ 3.18 ขนาดขึ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด

2) ตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก

เทมอร์ตาร์ที่ทำการผสมเรียบร้อยแล้วลงในแบบหล่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 280 x 177.5 x 50 มม. มีรอยบากบริเวณฐาน ดังแสดงในภาพที่ 3.19 และ 3.20 ซึ่งดัดแปลงจาก ASTM C1579-06 [25] นำตัวอย่างที่อยู่ในแบบเก็บไว้ในห้องบ่มที่อุณหภูมิ  $36 \pm 3^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $30 \pm 10$  และความเร็วลมไม่ต่ำกว่า 4.7 เมตรต่อวินาที โดยอ้างอิงตาม ASTM C1579-06 [25] ห้องควบคุมสภาพแวดล้อมแสดงในภาพที่ 3.21 และหยุดการควบคุมความเร็วลมเมื่อถึง Final setting time



ภาพที่ 3.19 ขนาดขึ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก



ภาพที่ 3.20 แบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก



ภาพที่ 3.21 ห้องที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตก

### 3.4 การทดสอบมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง

- 1) การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C642-06 [23]  
นำตัวอย่างที่บ่มครบ 28 วันไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชม. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิว และสุดท้ายนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 ชม. โดยจะชั่งน้ำหนักในทุกขั้นตอน เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาความพรุนและการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ โดยมีการสรุปขั้นตอน ดังภาพที่ 3.22

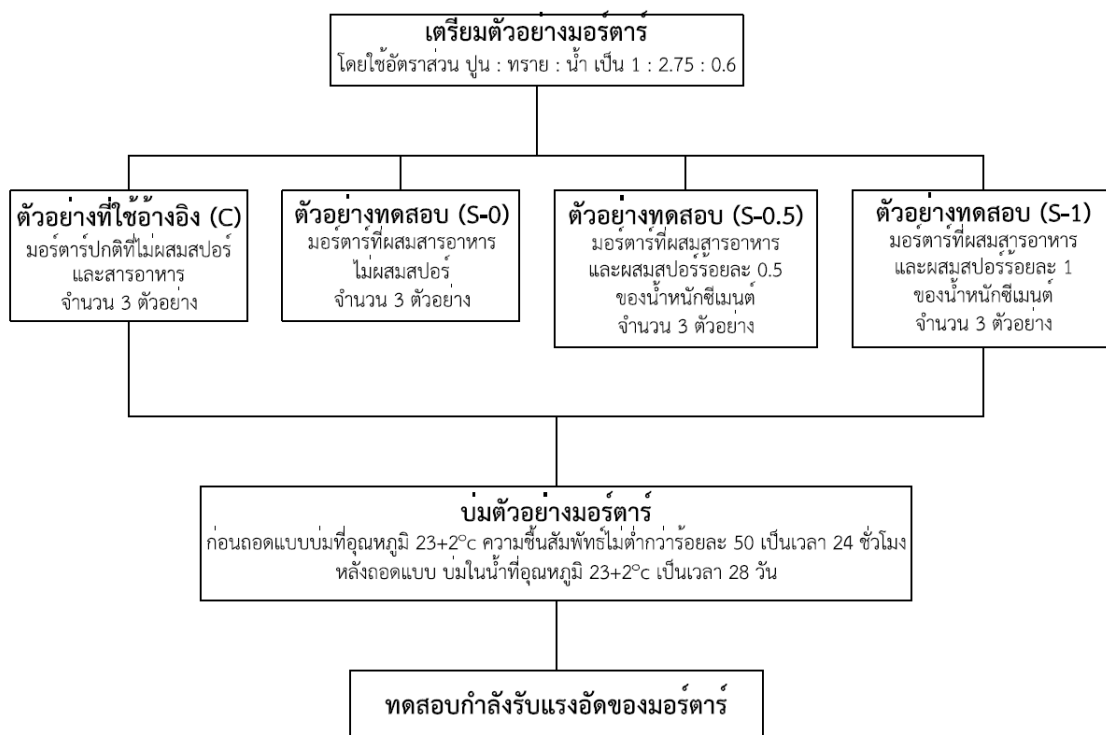


ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนสำหรับการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

2) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109-02 [7]

นำตัวอย่างที่บ่มครบ 28 วันขึ้นจากน้ำแล้วนำมาเช็ดให้ผิวแห้ง ก่อนการทดสอบวัดพื้นที่หน้าตัดด้านที่ใช้รับแรงกดด้านละ 3 ค่า และชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหาหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ กระทำแรงอัดบนตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อัตราเร็ว 900 ถึง 1800 นิวตันต่อวินาที ขณะทำการทดสอบบันทึกค่าแรงกระทำที่จุดประลัยของตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหา กำลังรับแรงอัดประลัย ตามสมการที่ (10) ขั้นตอนโดยสรุป ดังภาพที่ 3.23





ภาพที่ 3.23 ขั้นตอนสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ-mortar

## 2) การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกของ-mortar

บันทึกภาพรอยแตกโดยใช้กล้องดิจิทัลทุก 24 ชั่วโมงโดยเริ่มตั้งแต่ Final setting time และในวันที่ 4 จะเริ่มต้นกระบวนการซ่อมแซมตัวเองโดยฉีบน้ำปริมาณ 100 มล. ไปที่บริเวณผิวตัวอย่างที่เกิดรอยแตกทุก 12 ชั่วโมง เพื่อเริ่มกระบวนการซ่อมแซมตัวเองของ-mortar จะทำการบันทึกภาพรอยแตกก่อนการรดน้ำครั้งแรกของทุกวัน และสิ้นสุดกระบวนการทดสอบในวันที่ 28 นับจากวันที่เริ่มต้นกระบวนการซ่อมแซม โดยสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกของ mortars

สำหรับการบันทึกภาพจะควบคุมแสงจากธรรมชาติโดยการคลุมด้วยผ้าสีดำและใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นไฟ LED ทดแทน ตั้งระนาบเซนเซอร์รับภาพขนานกับพื้นโดยอ้างอิงจากมาตรวัดระดับของตัวกล้อง และตั้งระนาบเซนเซอร์รับภาพห่างจากผิวตัวอย่างเป็นระยะ 28 ซม. เพื่อให้ได้ความละเอียดของภาพที่ 1 พิกเซล เท่ากับ 0.025 มม. เมื่อเกิดรอยแตกจะแบ่งส่วนการวัดรอยแตกตามบริเวณที่เกิดรอยแตกเพื่อความสะดวกในการติดตามการซ่อมแซมรอยแตก เพื่อนำมาใช้สำหรับการคำนวณ อัตราการซ่อมแซมรอยแตก (Healing Rate) ร้อยละการซ่อมแซมความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) และร้อยละการซ่อมแซมพื้นที่รอยแตก ( $HR_A$ ) ดังสมการที่ (13) (14) และ (15) ตามลำดับ

$$Healing Rate = \frac{W_{ci} - W_{cj}}{\Delta t} \quad (13)$$

เมื่อ  $W_{ci}$  หมายถึง ความกว้างรอยแตกในวันที่  $i$   
 $W_{cj}$  หมายถึง ความกว้างรอยแตกในวันที่  $j$   
 $\Delta t$  หมายถึง จำนวนวันตั้งแต่วันที่  $i$  ถึง วันที่  $j$

$$HR_w = \frac{W_{c1} - W_{cj}}{W_{c1}} \times 100 \quad (14)$$

เมื่อ  $W_{c1}$  หมายถึง ความกว้างรอยแตกในวันที่ 1 หลังพ่นน้ำ

$W_{cj}$  หมายถึง ความกว้างรอยแตกในวันที่ j หลังพ่นน้ำ

$$HR_A = \frac{A_{c1} - A_{cj}}{A_{c1}} \times 100 \quad (15)$$

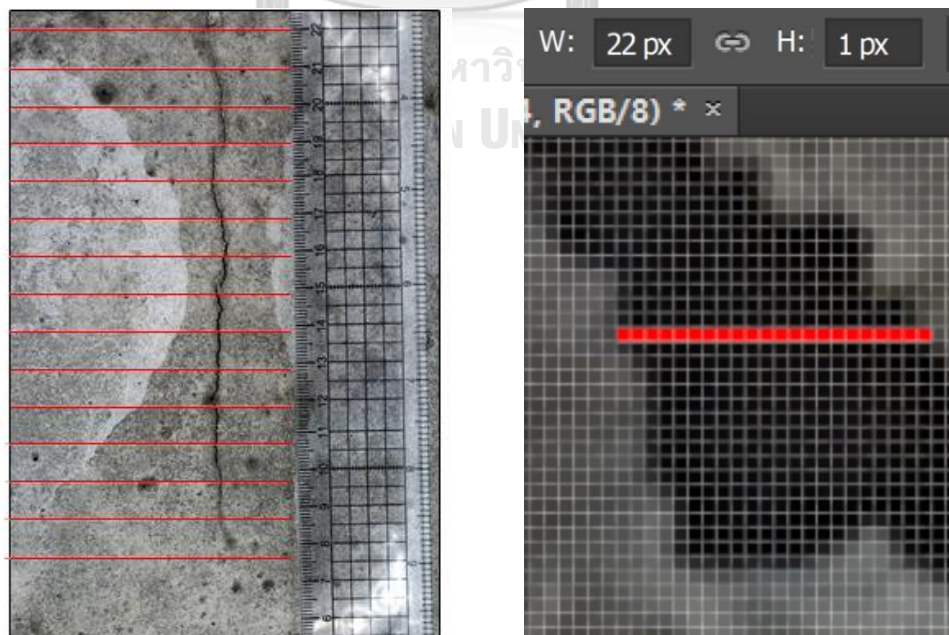
เมื่อ  $A_{c1}$  หมายถึง พื้นที่รอยแตกในวันที่ 1 หลังพ่นน้ำ

$A_{cj}$  หมายถึง พื้นที่รอยแตกในวันที่ j หลังพ่นน้ำ

### 3.5 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

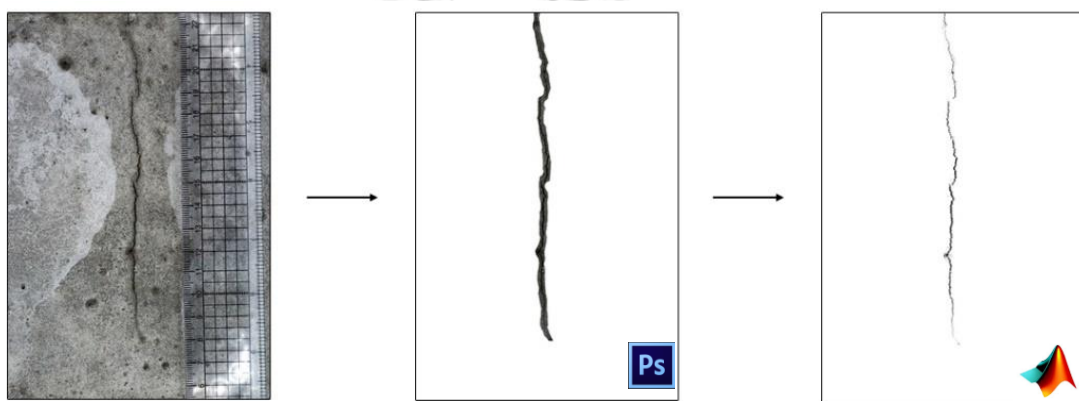
ในการวิเคราะห์ผลจากการเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่ายจะต้องอาศัยกระบวนการประมวลผลทางภาพเพื่อแปลงผลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ โดยในงานวิจัยนี้จะต้องวัดทั้งความกว้างและพื้นที่รอยแตกซึ่งจะมีกระบวนการที่แตกต่างกัน ดังนี้

- 1) การวัดขนาดความกว้างรอยแตก โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop ในการระบุตำแหน่งในการวัดโดยแต่ละภาพจะใช้จุดอ้างอิงเดียวกันและจำนวนจุดที่วัดจะขึ้นอยู่กับความยาวของรอยแตกของแต่ละตัวอย่างซึ่งแต่ละจุดจะมีระยะห่าง 1 ซม. และวัดความกว้างรอยแตกเฉพาะพิกเซล ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 การวัดขนาดความกว้างรอยแตก

- 2) การวัดพื้นที่รอยแตก โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop ในการระบุตำแหน่งของรอยแตกอย่างหยาบเพื่อให้ค่าสีที่ปรากฏในภาพมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด แล้วจึงปรับแต่งภาพและวัดขนาดพื้นที่ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยการแปลงจากภาพสีเป็นขาวดำ แล้วนับพื้นที่พิกเซล เฉพาะรอยแตกสีดำ ซึ่งภาพจะผ่านกระบวนการลดจุดรบกวนในภาพด้วยการกระจายช่วงความเข้มสีให้เต็มช่วงของกราฟ Histogram แล้วตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกทั้งหมดโดยการเปลี่ยนเป็นค่าสีขาว หลังจากนั้นจะใช้กระบวนการ Image Morphological Operation คือการเปรียบเทียบค่าสีดำที่ต้องการเก็บไว้จากจุดโดยรอบทั้งหมด 8 จุด ถ้าจุดสีดำนั้นถูกล้อมรอบด้วยสีขาวจะถูกเปลี่ยนเป็นสีขาว ผลลัพธ์จากแต่ละโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 3.26



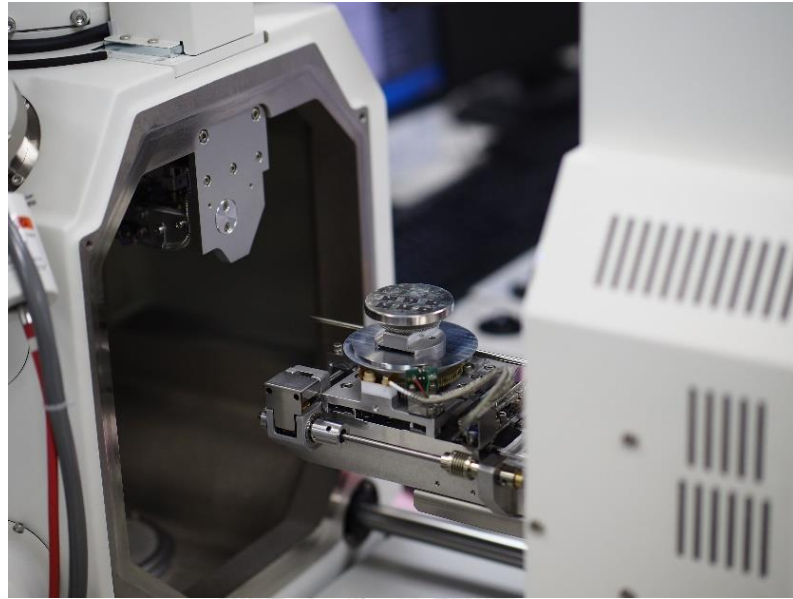
ภาพที่ 3.26 กระบวนการวัดขนาดพื้นที่รอยแตก

### 3.6 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

เมื่อสิ้นสุดการทดสอบกระบวนการซ่อมแซมตัวเอง ผู้วิจัยได้แบ่งชิ้นตัวอย่างบริเวณรอยแตกเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) ซึ่งจะเป็นการยืนยันการเกิดผลึกแคลไซต์จากกระบวนการซ่อมแซมตัวเองภายในมอร์ตาร์

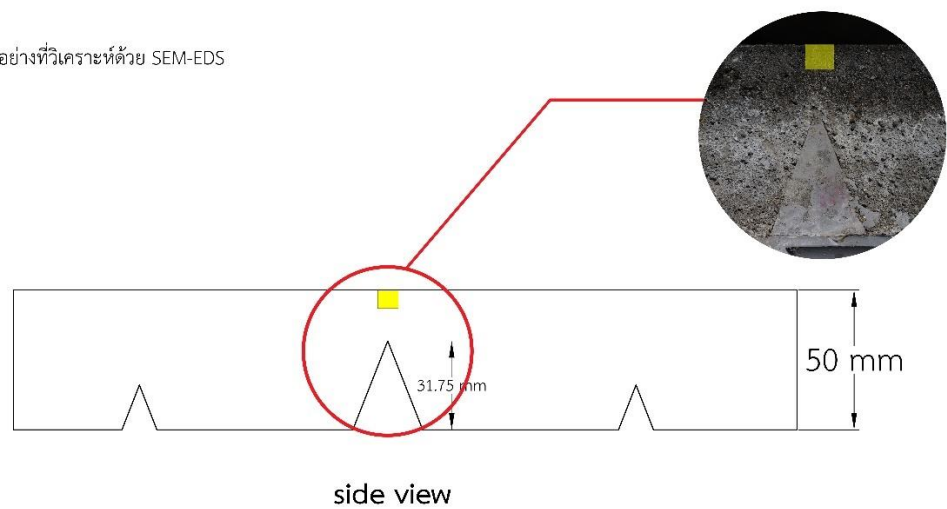
#### 3.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS)

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของผลึกแคลไซต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) ลักษณะดังภาพที่ 3.27 สำหรับการเตรียมตัวอย่างจะต้องทุบก้อนมอร์ตาร์ให้แตกแล้วจึงเลือกเฉพาะเศษตัวอย่างบริเวณรอยแตกดังแสดงในภาพที่ 3.28 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 50 มม. เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ

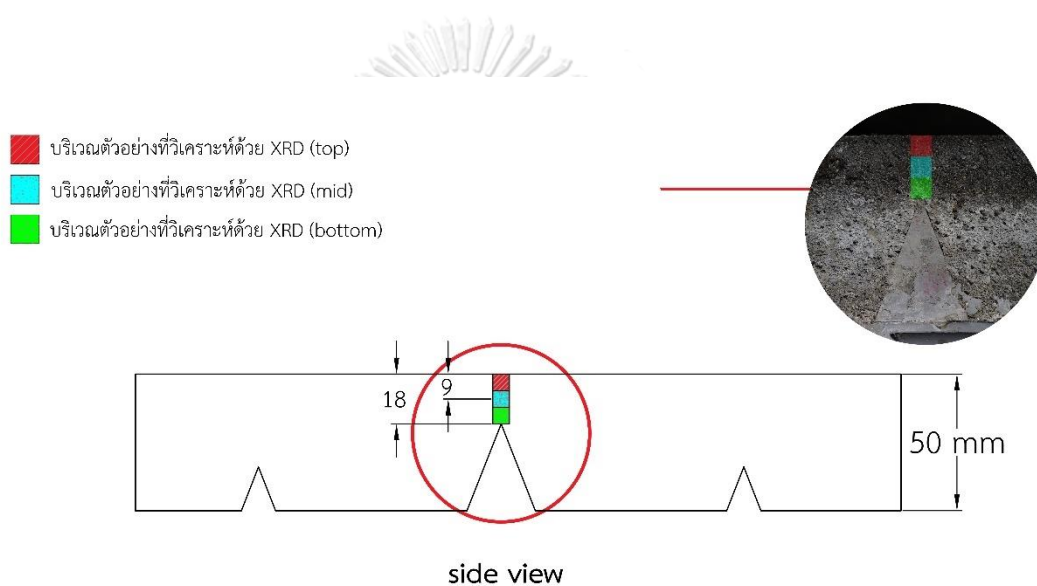
■ บริเวณตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วย SEM-EDS



ภาพที่ 3.28 บริเวณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ

### 3.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การวิเคราะห์หาปริมาณของผลึกแคลไซต์ในมอร์ตาร์ที่ทำการผสมสปอร์ของแบคทีเรียด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้นเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าการซ่อมแซมรอยแตกของมอร์ตาร์เกิดจากปฏิกิริยายูริโอไลซิส สำหรับการเตรียมตัวอย่างจะต้องทุบก้อนมอร์ตาร์ให้แตก เลือกรชิ้นตัวอย่างบริเวณรอยแตกทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ 0 มม. 9 มม. และ 18 มม. จากผิวรอยแตก ดังแสดงในภาพที่ 3.29 และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 เพื่อลดขนาดอนุภาคที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ให้มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.



ภาพที่ 3.29 บริเวณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

## บทที่ 4

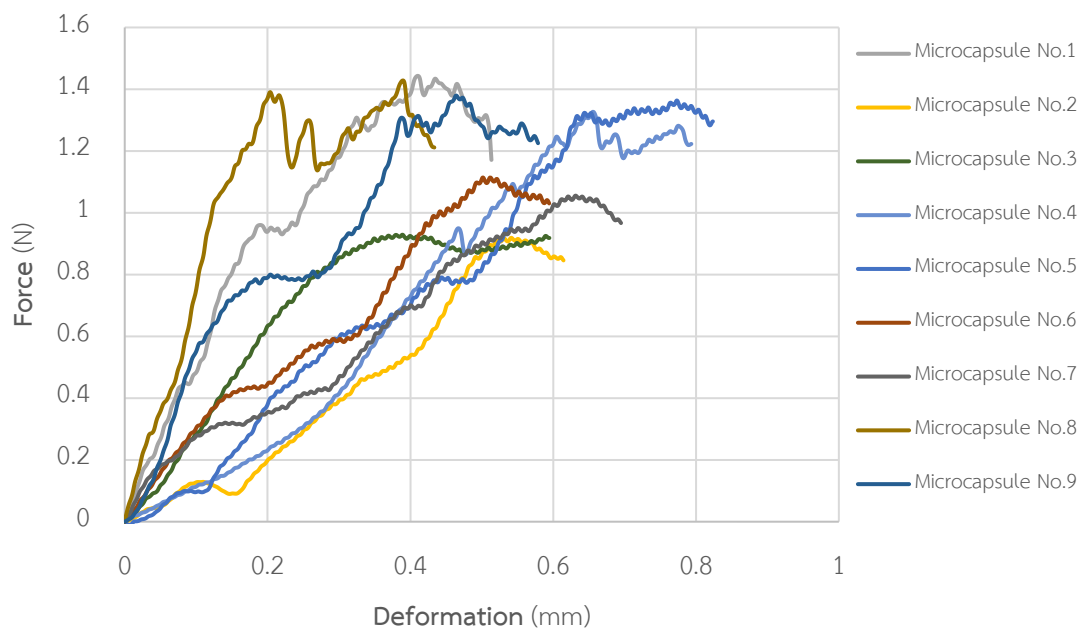
### ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูล

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 ได้ค่าเฉลี่ยของแรงกระทำสูงสุดจากตัวอย่าง 9 ชิ้น เป็น  $1.2 \pm 0.2$  N และสามารถคำนวณค่าความสามารถในการรับแรงดึงของไมโครแคปซูล จากสมการที่ (7) ได้เท่ากับ 0.48 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดึงประลัยของมอร์ตาร์ที่ผสมสารอาหาร (S-0, S-0.5 และ S-1) ซึ่งมีสมมติฐานว่ากำลังรับแรงดึงประลัยมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดประลัยของกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ผสมสารอาหาร (แสดงในหัวข้อที่ 4.3) จะได้ค่าประมาณ 2.1 MPa จะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับแรงดึงของไมโครแคปซูลมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงประลัยของมอร์ตาร์ จึงสามารถสรุปได้ว่าเปลือกของไมโครแคปซูลสามารถฉีกออกได้เมื่อมีรอยแตกผ่านบริเวณเนื้อมอร์ตาร์ที่มีไมโครแคปซูลผสมอยู่

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูล

Microcapsule No.	Maximum Compression Force (N)
1	1.4
2	0.9
3	0.9
4	1.3
5	1.4
6	1.1
7	1.1
8	1.4
9	1.3
Average	$1.2 \pm 0.2$



ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงของไมโครแคปซูล

#### 4.2 ผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกลุ่มตัวอย่างที่ผสมสารอาหาร (S-0) กับตัวอย่างมอร์ตาร์ปกติ (C) พบว่าสารอาหารสำหรับแบคทีเรียส่งผลให้ความพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารอาหารสำหรับแบคทีเรียที่ผสมเพิ่มในมอร์ตาร์ มีสารลดแรงตึงผิวจึงส่งผลให้มอร์ตาร์มีปริมาณฟองอากาศที่มากขึ้น [29] มาจากยีสต์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของสารอาหารนั้นมีส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างแบบแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic Compound) [30] ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะส่งผลให้มีปริมาณฟองอากาศในมอร์ตาร์มากขึ้น [29] โดยโครงสร้างโมเลกุลลักษณะดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายกับโมเลกุลของสบู่ที่จะมี 2 ด้าน คือ ด้านที่ดึงดูดน้ำ (hydrophilic) และด้านที่ไม่ดึงดูดน้ำ (hydrophobic) ด้านที่ไม่ดึงดูดน้ำจะทำหน้าที่ดึงดูดอากาศทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสารอาหารมีความพรุนสูงกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ปกติ และเมื่อมีความพรุนสูงจะส่งผลให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากน้ำจะสามารถเข้าไปอยู่ในรูพรongของเนื้อมอร์ตาร์ได้มากขึ้น



ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

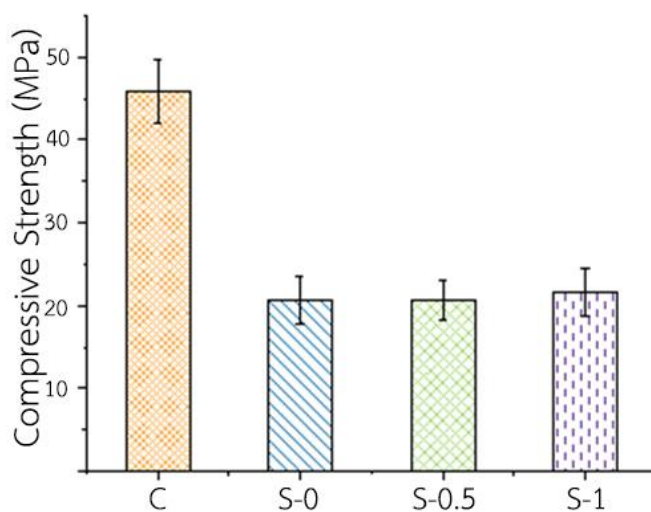
Specimen	ความพรุน (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
C	$7.4 \pm 0.1$	$16.0 \pm 0.2$
S-0	$10.3 \pm 0.2$	$20.2 \pm 0.2$
S-0.5	$10.5 \pm 0.1$	$21.2 \pm 0.2$
S-1	$12.2 \pm 0.2$	$23.6 \pm 0.5$

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มตัวอย่างที่ผสมสารอาหารทั้งหมด (S-0 S-0.5 และ S-1) พบว่าความพรุนและการดูดซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าสปอร์ของแบคทีเรียไม่ได้ส่งผลต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ แต่สารอาหารสำหรับแบคทีเรียจะส่งผลให้ความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น

#### 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันแสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะกลุ่มตัวอย่างที่ผสมสารอาหาร (S-0) กับตัวอย่างมอร์ตาร์ปกติ (C) จะพบว่าสารอาหารสำหรับแบคทีเรียส่งผลให้กำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารอาหารของแบคทีเรียนั้นมีส่วนผสมของยีสต์และยูเรียที่ส่งผลในเชิงลบต่อความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ [31] โดยปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับน้ำจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์โดยการดึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปใช้แทนในปฏิกิริยาดังกล่าว [32] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ว่าสารอาหารส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเนื้อมอร์ตาร์มีความเป็นรูพรุนมากก็จะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างที่ผสมสารอาหารทั้งหมด (S-0 S-0.5 และ S-1) พบว่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าสปอร์ของแบคทีเรียไม่ได้ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 อย่างมีนัยสำคัญ แต่สารอาหารสำหรับแบคทีเรียส่งผลให้กำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 ของมอร์ตาร์ลดลง



ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 28 ของตัวอย่างมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 28 และค่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

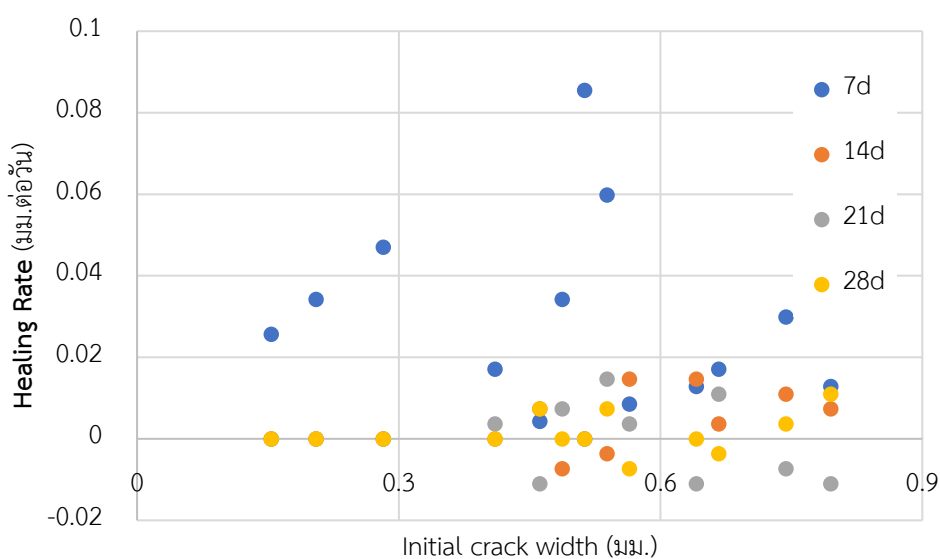
Specimen		กำลังรับแรงอัด (MPa)
Specimen	No.	
C	1	41.4
	2	48.6
	3	47.6
	ค่าเฉลี่ย	45.9 ± 3.9
S-0	1	23.6
	2	20.6
	3	17.8
	ค่าเฉลี่ย	20.7 ± 2.9
S-0.5	1	18.1
	2	21.3
	3	22.7
	ค่าเฉลี่ย	20.7 ± 2.3
S-1	1	24.2
	2	22.2
	3	18.5
	ค่าเฉลี่ย	21.6 ± 2.9

#### 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์

##### 4.4.1 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบคทีเรีย

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่าง S-0 พบว่ารอยแตกบริเวณผิวมีความยาวประมาณ 13 ซม. โดยมีขนาดความกว้างมากที่สุดเท่ากับ 0.79 มม. ที่ความกว้างข้างต้นมีค่า  $HR_w$  (ในวันที่ 28 หลังเริ่มพ่นน้ำ) เท่ากับ ร้อยละ 16.1 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และความกว้างรอยแตกมากที่สุดที่สามารถซ่อมแซมได้อย่างสมบูรณ์ ภายในระยะเวลา 28 วัน คือ 0.28 มม.

ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Initial crack width และ Healing rate พบว่าในช่วง 7 วันแรกหลังจากเริ่มพ่นน้ำจะมีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกสูงที่สุด และนอกจากนี้พบว่าความกว้างของรอยแตกส่งผลต่ออัตราการซ่อมแซมรอยแตก โดยบริเวณที่รอยแตกขนาดเล็กจะมีอัตราการซ่อมแซมสูงกว่าบริเวณที่มีรอยแตกขนาดใหญ่ เนื่องจากรอยแตกขนาดเล็กเป็นรอยแตกที่อยู่ในตำแหน่งช่วงปลายของรอยแตก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิด Autogenous Healing ได้สูงที่สุด เนื่องจากการพ่นน้ำจะส่งผลให้ผงปูนจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ไหลไปติดอยู่บริเวณมุมของรอยแตกที่ผงปูนไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ เมื่อน้ำได้สัมผัสกับผงปูนจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอีกครั้งและเกิดเป็นกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกด้วยสารตั้งต้นของมอร์ตาร์เอง



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial crack width และ Healing Rate ของตัวอย่าง S-0

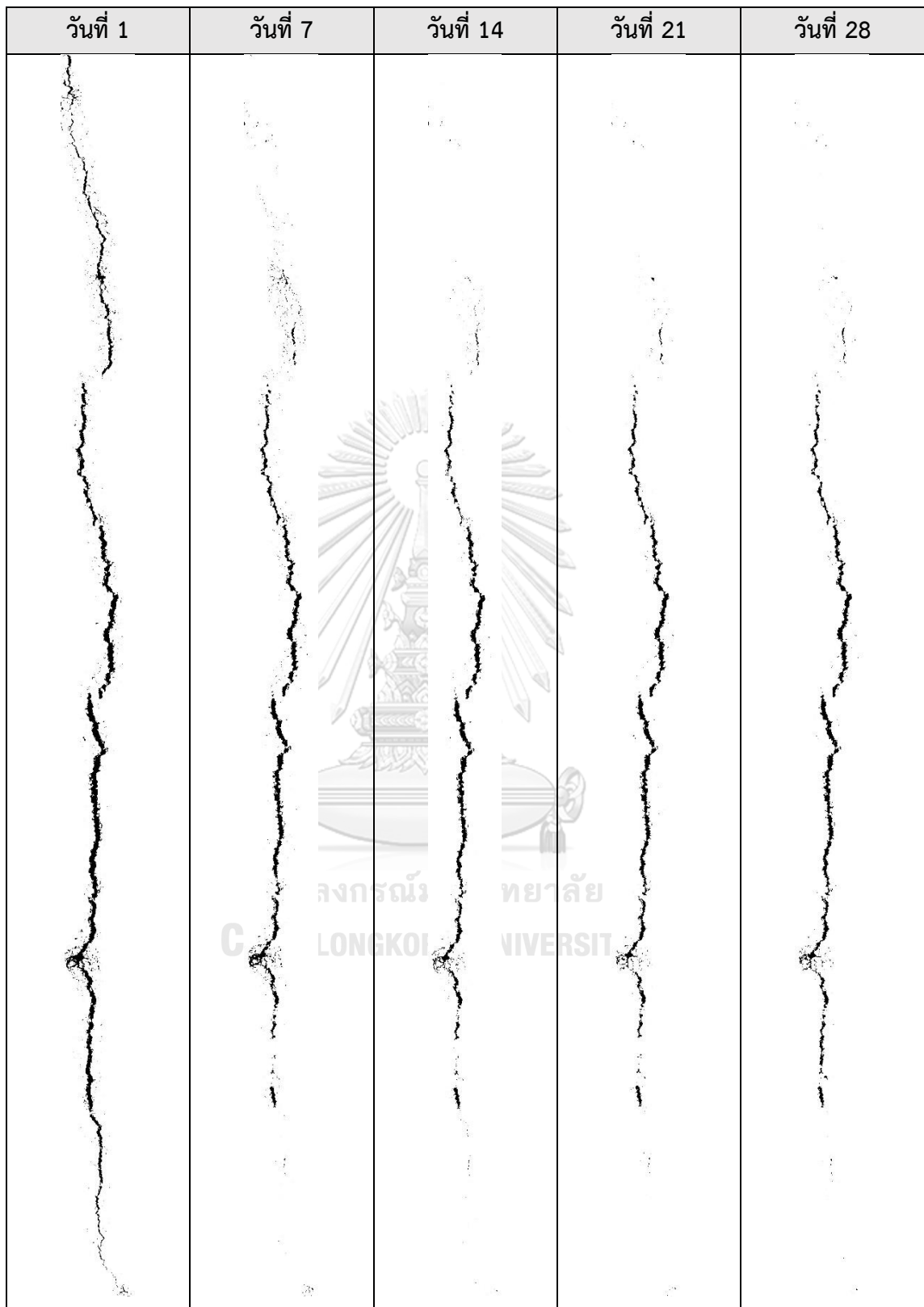
ตารางที่ 4.4 Healing Rate และ Healing Ratio จากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) ของตัวอย่าง S-0

Specimen	S-0									
d* (ซม.)	วันที่									
	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28
	$W_{c1}$ (มม.)	Healing Rate (มม.ต่อวัน)								
1	0.15	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.28	0.15	-0.05	0.1	0.08	0	0	0	0	0
3	0.54	0.54	0	0	0	-0.05	-0.13	0	0.01	0.01
4	0.41	0.41	-0.38	0.03	0.05	0	0	0	0	0
5	0.46	0.33	0.03	0.1	-0.08	-0.31	-0.05	0.01	-0.01	0.01
6	0.64	0.59	-0.28	0.33	-0.41	-0.05	-0.1	0.01	-0.01	0
7	0.67	0.21	0.46	-0.08	-0.46	0	-0.03	0	0.01	0
8	0.79	0.1	0.38	-0.28	0.05	-0.15	-0.03	0.01	-0.01	0.01
9	0.74	0.05	0.08	0.1	0	-0.08	0.03	0.01	-0.01	0
10	0.56	0.1	0.08	0.13	-0.08	-0.1	-0.08	0.01	0	-0.01
11	0.49	0.15	0	0	-0.1	0.18	-0.03	-0.01	0.01	0
12	0.51	0.31	0.21	0	0	0	0	0	0	0
13	0.21	0	0.21	0	0	0	0	0	0	0
$HR_w$ (%)										
1	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0	54.5	36.4	72.7	100	100	100	100	100	100
3	0	100	100	100	100	90.5	66.7	61.9	81	90.5
4	0	100	6.2	12.5	25	25	25	25	31.3	31.3
5	0	72.2	77.8	100	83.3	16.7	5.6	16.7	0	11.1
6	0	92	48	100	36	28	12	28	16	16
7	0	30.8	100	88.5	19.2	19.2	15.4	19.2	30.8	26.9
8	0	12.9	61.3	25.8	32.3	12.9	9.7	16.1	6.5	16.1
9	0	6.9	17.2	31	31	20.7	24.1	34.5	27.6	31
10	0	18.2	31.8	54.5	40.9	22.7	9.1	27.3	31.8	22.7
11	0	31.6	31.6	31.6	10.5	47.4	42.1	31.6	42.1	42.1
12	0	60	100	100	100	100	100	100	100	100
13	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100

\*หมายเหตุ : d หมายถึง ระยะทางตามแนวขนานกับรอยแตก วัดอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นของรอยแตก



ภาพที่ 4.4 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-0



ภาพที่ 4.5 รอยแตกที่ใช้ในการวัดพื้นที่รอยแตกของตัวอย่าง S-0

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรียร้อยละ 0.5

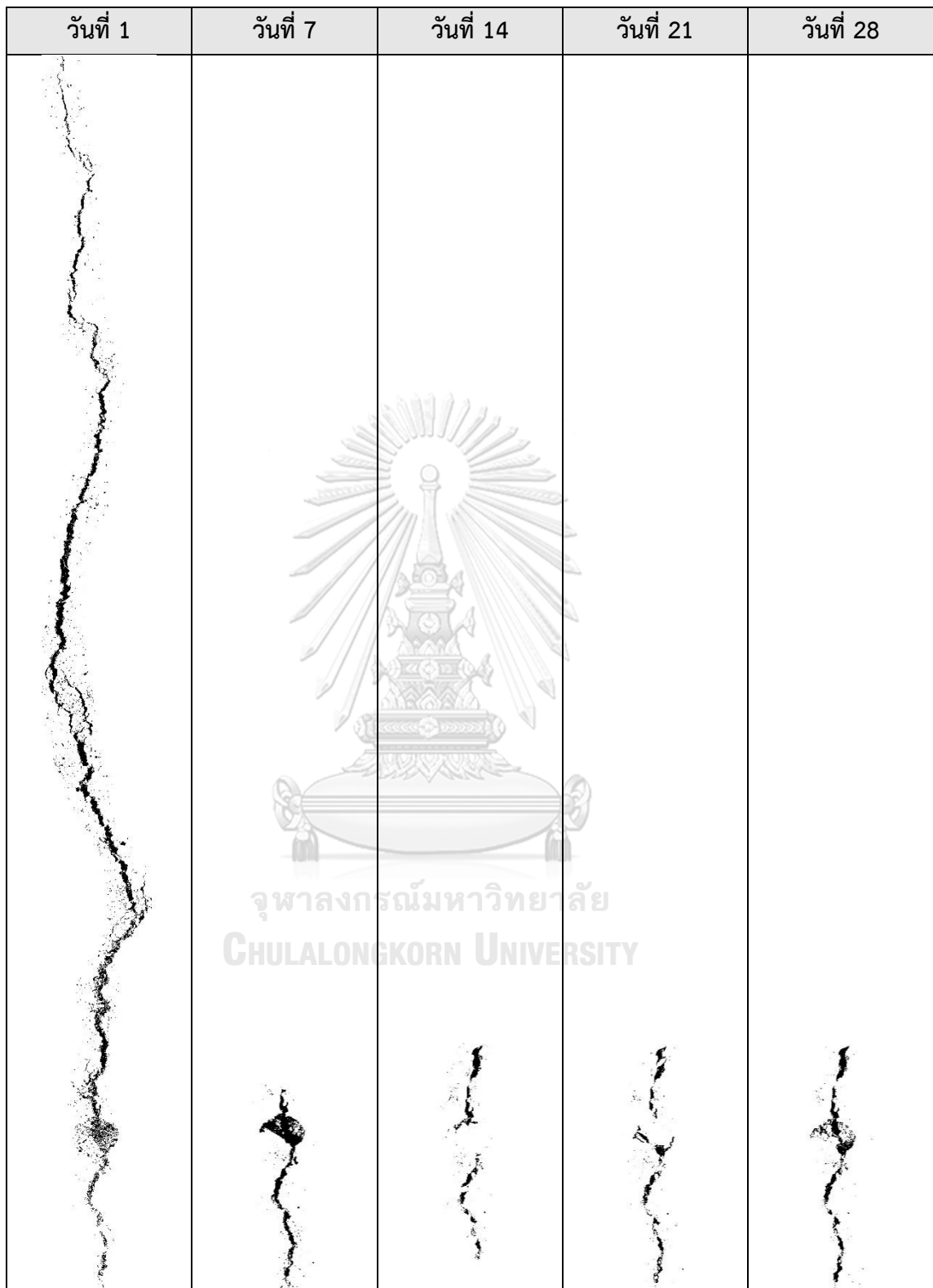
จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่าง S-0.5 ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 พบว่ารอยแตกบริเวณผิวมีความยาวประมาณ 11 ซม. โดยมีขนาดความกว้างมากที่สุดเท่ากับ 0.82 มม. ความกว้างข้างต้นมีค่าเฉลี่ยของ  $HR_w$  (ในวันที่ 28 หลังเริ่มพ่นน้ำ) เท่ากับ ร้อยละ 64.1 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และความกว้างรอยแตกมากที่สุดที่สามารถซ่อมแซมได้อย่างสมบูรณ์ ภายในระยะเวลา 28 วัน คือ 0.74 มม.

เมื่อพิจารณาอัตราการซ่อมแซมรอยแตก ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จะพบว่าในช่วง 7 วันแรกหลังจากเริ่มพ่นน้ำจะมีอัตราการซ่อมแซมรอยแตกสูงที่สุดเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์ และนอกจากนี้พบว่ามีบางตำแหน่งที่ค่า Healing rate ตีกลับ แสดงว่ารอยแตกมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุจากกระบวนการกระตุ้นการซ่อมแซมตัวเองโดยการพ่นน้ำไปยังบริเวณรอยแตกทำให้รอยแตกขยายใหญ่ขึ้น ทำให้เห็นว่าการซ่อมรอยแตกด้วยวิธีนี้ ถ้ามีปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มากเพียงพอเมื่อฉีดน้ำเข้าไปบริเวณรอยแตกจะส่งผลให้ตะกอนหลุดออกและไม่สามารถซ่อมแซมรอยแตกได้ดีเท่าที่ควร



ภาพที่ 4.6 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-0.5





ภาพที่ 4.7 รอยแตกที่ใช้ในการวัดพื้นที่รอยแตกของตัวอย่าง S-0.5

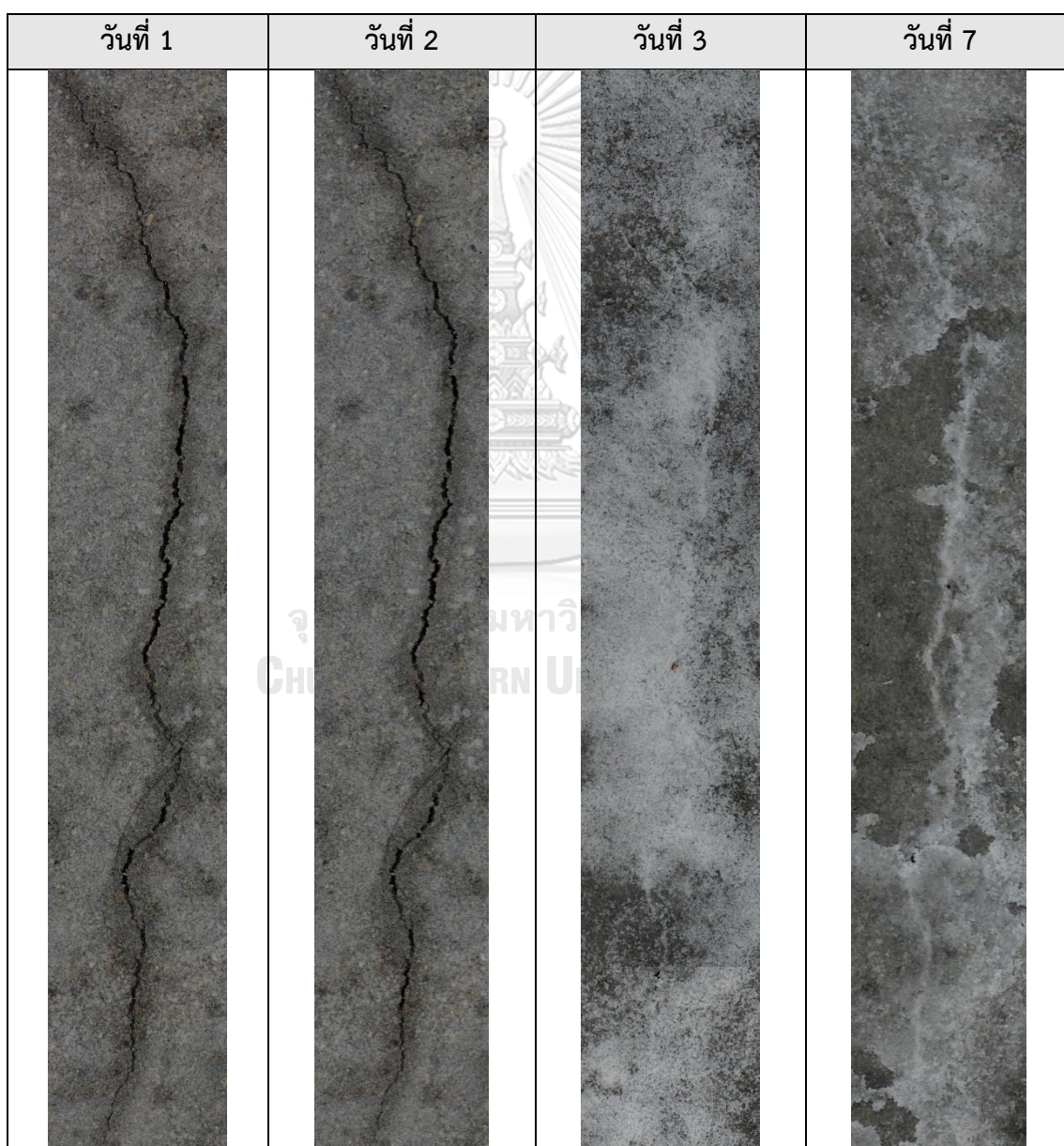
ตารางที่ 4.5 Healing Rate และ Healing Ratio จากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) ของตัวอย่าง S-0.5

Specimen	S-0.5									
d* (ซม.)	วันที่									
	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28
	$W_{c1}$ (มม.)	Healing Rate (มม.ต่อวัน)								
1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.33	0.1	0.23	-0.41	0.41	0	0	0	0	0
3	0.38	0.33	0.05	-0.18	0.18	0	0	0	0	0
4	0.56	-0.05	0.62	0	0	0	0	0	0	0
5	0.74	0.49	0.26	0	0	0	0	0	0	0
6	0.56	0.23	0.33	0	0	0	0	0	0	0
7	0.67	0	0.67	0	0	-0.67	0.67	0	0	0
8	0.69	0	0.69	-0.54	0.54	-0.49	0.49	0	0	0
9	0.82	0.21	0.62	-0.18	0.18	0	0	0	0	0
10	0.82	0.82	0	0	0	0	0	0	-0.09	0
11	0.77	0.77	0	-0.33	0.21	-0.08	-0.23	0	0	0
$HR_w$ (%)										
1	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0	30.8	100	-23.1	100	100	100	100	100	100
3	0	86.7	100	53.3	100	100	100	100	100	100
4	0	-9.1	100	100	100	100	100	100	100	100
5	0	65.5	100	100	100	100	100	100	100	100
6	0	40.9	100	100	100	100	100	100	100	100
7	0	0	100	100	100	0	100	100	100	100
8	0	0	100	22.2	100	29.6	100	100	100	100
9	0	25	100	78.1	100	100	100	100	100	100
10	0	100	100	100	100	100	100	100	25	28.1
11	0	100	100	56.7	83.3	73.3	43.3	46.7	50	53.3

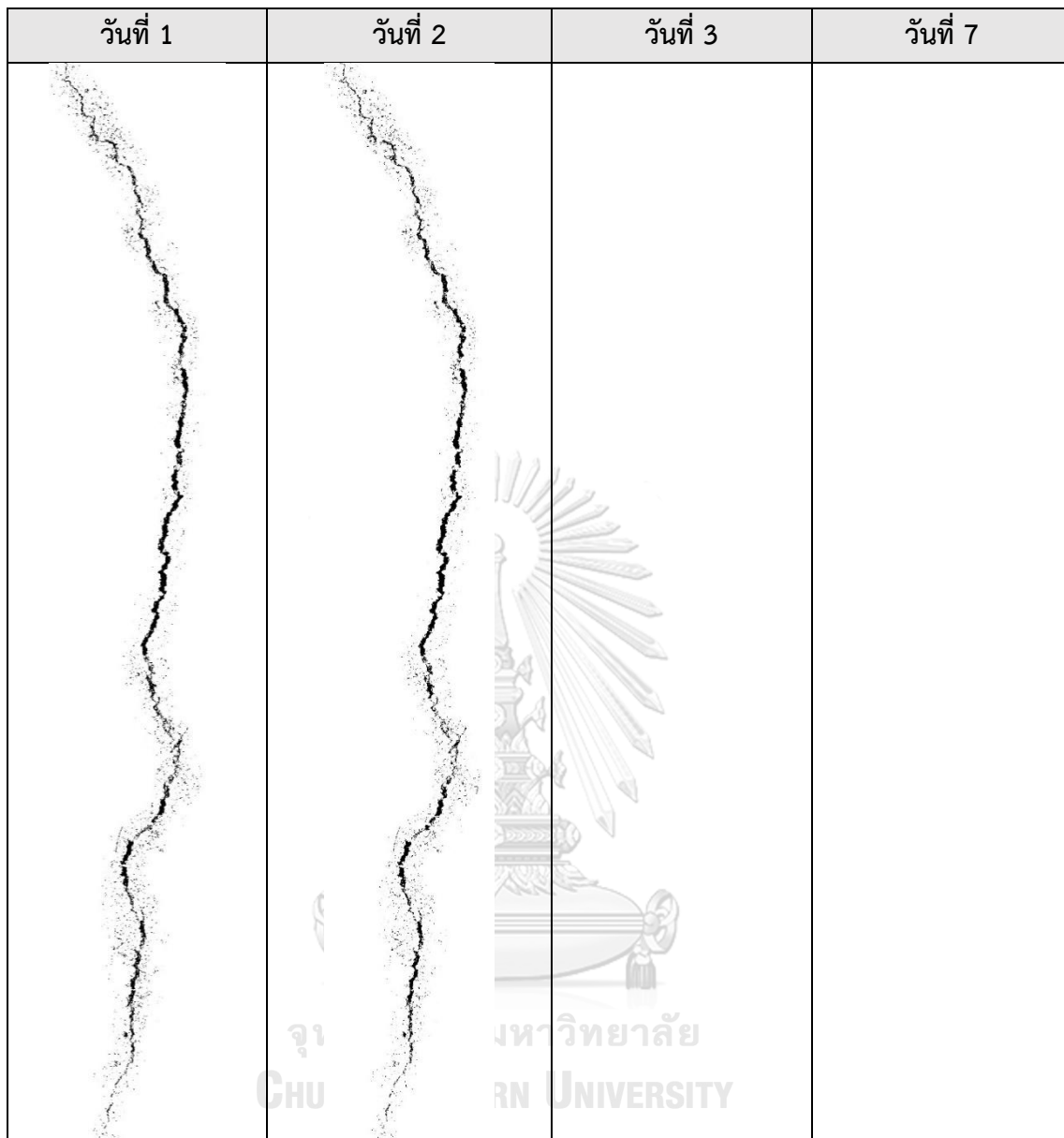
\*หมายเหตุ : d หมายถึง ระยะทางตามแนวขนานกับรอยแตก วัดอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นของรอยแตก

#### 4.4.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่างที่ผสมสปอร์แบคทีเรียร้อยละ 1

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของตัวอย่าง S-1 พบว่ารอยแตกบริเวณผิวมีความยาวประมาณ 10 ซม. โดยมีขนาดความกว้างมากที่สุดเท่ากับ 0.80 มม. จากภาพที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าตัวอย่าง S-1 สามารถซ่อมแซมรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 3 วันหลังจากพ่นน้ำ และนอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับตัวอย่าง S-1 ที่มีความกว้างรอยแตกไม่เกิน 0.80 มม. ขนาดความกว้างของรอยแตกไม่ส่งผลต่ออัตราในการซ่อมแซมรอยแตกอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.8 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-1



ภาพที่ 4.9 รอยแตกที่ใช้ในการวัดพื้นที่รอยแตกของตัวอย่าง S-1

ตารางที่ 4.6 Healing Rate และ Healing Ratio จากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) ของตัวอย่าง S-1

Specimen	S-1									
d* (ซม.)	วันที่									
	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28
	$W_{c1}$ (มม.)	Healing Rate (มม.ต่อวัน)								
1	0.36	0.03	0.33	0	0	0	0	0	0	0
2	0.23	-0.15	0.38	0	0	0	0	0	0	0
3	0.38	0.03	0.36	0	0	0	0	0	0	0
4	0.67	0.03	0.64	0	0	0	0	0	0	0
5	0.80	0.03	0.77	0	0	0	0	0	0	0
6	0.46	-0.03	0.49	0	0	0	0	0	0	0
7	0.13	-0.03	0.15	0	0	0	0	0	0	0
8	0.41	0	0.41	0	0	0	0	0	0	0
9	0.46	0	0.46	0	0	0	0	0	0	0
10	0.18	0.05	0.13	0	0	0	0	0	0	0
HR <sub>w</sub> (%)										
1	0	7.1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	0	-66.7	100	100	100	100	100	100	100	100
3	0	6.7	100	100	100	100	100	100	100	100
4	0	3.8	100	100	100	100	100	100	100	100
5	0	3.2	100	100	100	100	100	100	100	100
6	0	-5.6	100	100	100	100	100	100	100	100
7	0	-20	100	100	100	100	100	100	100	100
8	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
9	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0	28.6	100	100	100	100	100	100	100	100

\*หมายเหตุ : d หมายถึง ระยะทางตามแนวขนานกับรอยแตก วัดอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นของรอยแตก

#### 4.4.4 อิทธิพลของปริมาณไมโครแคปซูลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์

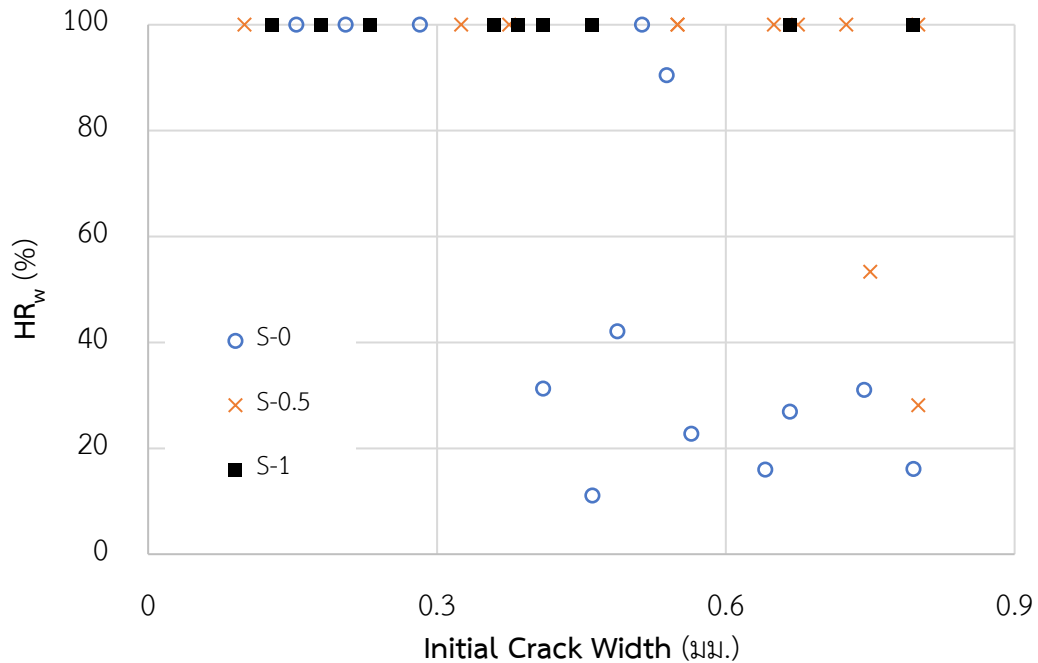
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์ด้วยค่า Healing Ratio ที่วัดจากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) และพื้นที่รอยแตก ( $HR_A$ ) ของมอร์ตาร์ ที่ผสมสปอร์ที่ปริมาณต่างกัน แสดงดังต่อไปนี้

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์จากความกว้างรอยแตก ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.10 พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกน้อยที่สุด โดยพบว่าที่รอยแตกขนาดกว้าง 0.46 มม. มีค่า  $HR_w$  เท่ากับ ร้อยละ 11.1 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผสมสปอร์ในปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 นอกจากนี้พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ร้อยละ 1 มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกที่ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ร้อยละ 0.5 โดยมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ปริมาณร้อยละ 1 สามารถซ่อมแซมรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ตลอดช่วงความยาวแต่ มอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ปริมาณร้อยละ 0.5 จะสามารถซ่อมแซมรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์เฉพาะตำแหน่งที่รอยแตกมีขนาดไม่เกิน 0.74 มม. เท่านั้น

ตารางที่ 4.7 ความกว้างรอยแตกเริ่มต้น ( $W_{c1}$ ) และ Healing Ratio จากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) ในวันที่ 28 หลังเริ่มพ่นน้ำ

Specimen	S-0		S-0.5		S-1	
	$W_{c1}$ (มม.)	$HR_w$ (%)	$W_{c1}$ (มม.)	$HR_w$ (%)	$W_{c1}$ (มม.)	$HR_w$ (%)
1	0.15	100	0.10	100	0.36	100
2	0.28	100	0.33	100	0.23	100
3	0.54	90.5	0.38	100	0.38	100
4	0.41	31.3	0.56	100	0.67	100
5	0.46	11.1	0.74	100	0.80	100
6	0.64	16	0.56	100	0.46	100
7	0.67	26.9	0.67	100	0.13	100
8	0.79	16.1	0.69	100	0.41	100
9	0.74	31	0.82	100	0.46	100
10	0.56	22.7	0.82	28.1	0.18	100
11	0.49	42.1	0.77	53.3		
12	0.51	100				
13	0.21	100				

\*หมายเหตุ : d หมายถึง ระยะทางตามแนวขนานกับรอยแตก วัดอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นของรอยแตก

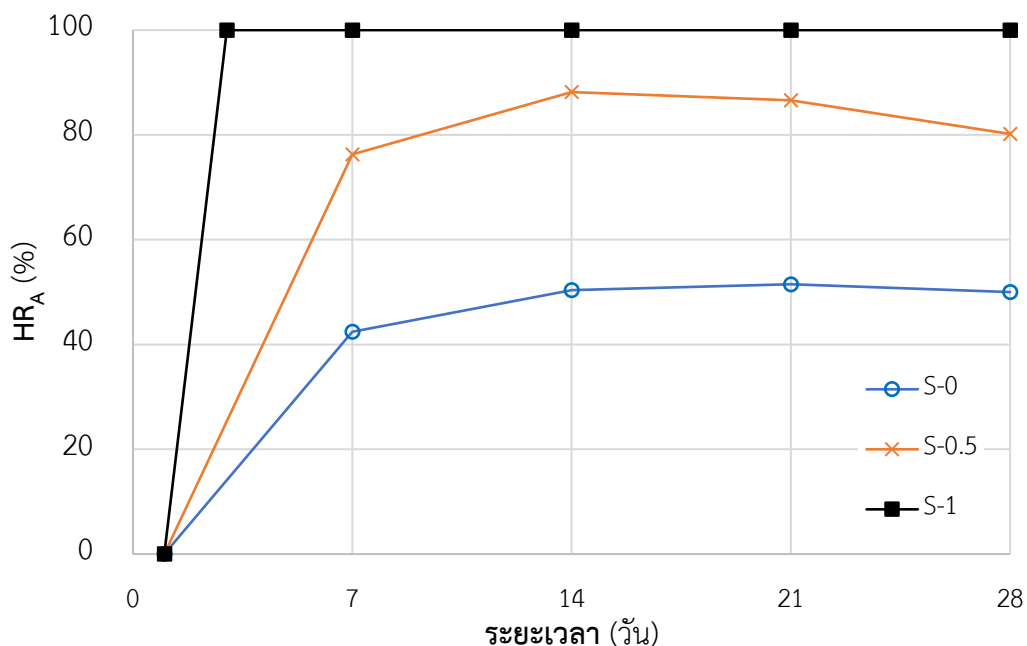


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial crack width และ Healing Ratio จากความกว้างรอยแตก ( $HR_w$ ) ของวันที่ 28 ของตัวอย่าง S-0, S-0.5 และ S-1

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์จากพื้นที่รอยแตก ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ ภาพที่ 4.11 พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสปอร์มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกที่ต่ำที่สุดโดยที่ 28 วันหลังจากพ่นน้ำ มีค่า  $HR_A$  เท่ากับ ร้อยละ 50 และมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ร้อยละ 0.5 และ 1 มีค่า  $HR_A$  เท่ากับ ร้อยละ 80.2 และ 100 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 พื้นที่รอยแตก ( $A_{Ci}$ ) และ Healing Ratio จากพื้นที่รอยแตก ( $HR_A$ ) ในวันที่ 1, 7, 14, 21 และ 28 หลังเริ่มพ่นน้ำ

Specimen	S-0					S-0.5					S-1				
	วันที่					วันที่					วันที่				
	1	7	14	21	28	1	7	14	21	28	1	7	14	21	28
$A_{Ci}$ (ตร.มม.)	63.0	36.3	31.3	30.6	31.5	60.2	14.3	7.1	8.1	11.9	41.0	0	0	0	0
$HR_A$ (%)	0	42.4	50.4	51.5	50.0	0	76.3	88.2	86.6	80.2	0	100	100	100	100



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และ Healing Ratio จากพื้นที่รอยแตก ( $HR_A$ ) ของตัวอย่าง S-0, S-0.5 และ S-1

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $HR_w$  และ  $HR_A$  ระหว่างตัวอย่างที่ผสมสปอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน จะพบว่าตัวอย่างที่ผสมสปอร์มากกว่าจะสามารถซ่อมแซมรอยแตกได้ดีกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณสปอร์แบคทีเรียส่งผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยแตกของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ร้อยละ 1 มีประสิทธิภาพการซ่อมแซมรอยแตกได้ดีที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ

#### 4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

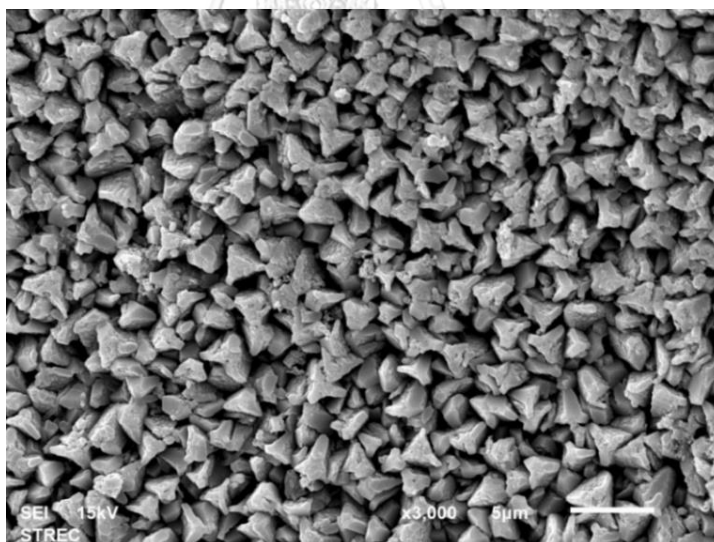
งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างตะกอนบริเวณผิวรอยแตกของมอร์ตาร์ที่ผ่านกระบวนการซ่อมแซมตัวเองสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS) เพื่อยืนยันการเกิดและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาการซ่อมแซมตัวเองของมอร์ตาร์



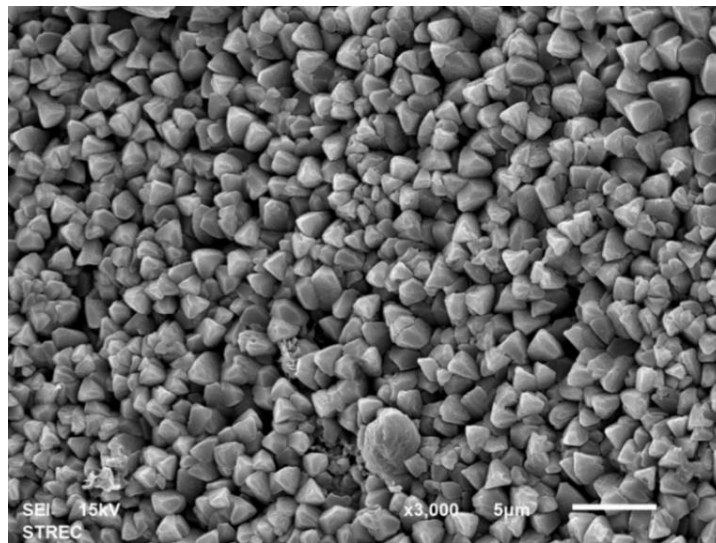
#### 4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS)

ภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่าของตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์ (S-0) และผสมสปอร์ร้อยละ 1 (S-1) ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างผสมสปอร์จะมีการเรียงตัวของผลึกที่มีความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบบที่เรีย

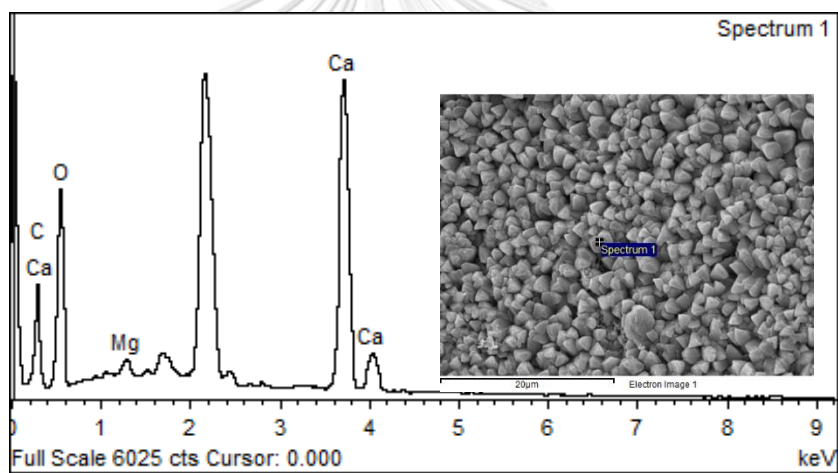
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลึกตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์ (S-0) และผสมสปอร์ร้อยละ 1 (S-1) ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุแสดงในภาพที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งผลึกของทั้ง 2 ตัวอย่าง มีส่วนประกอบของอะตอมธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และแคลเซียม ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของผลึกจะพบว่ามีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกของแคลไซต์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแร่ Polymorph อื่นที่อยู่ในกลุ่มของแคลเซียมคาร์บอเนต จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลึกตัวอย่างที่พบนี้เป็นผลึกแคลไซต์



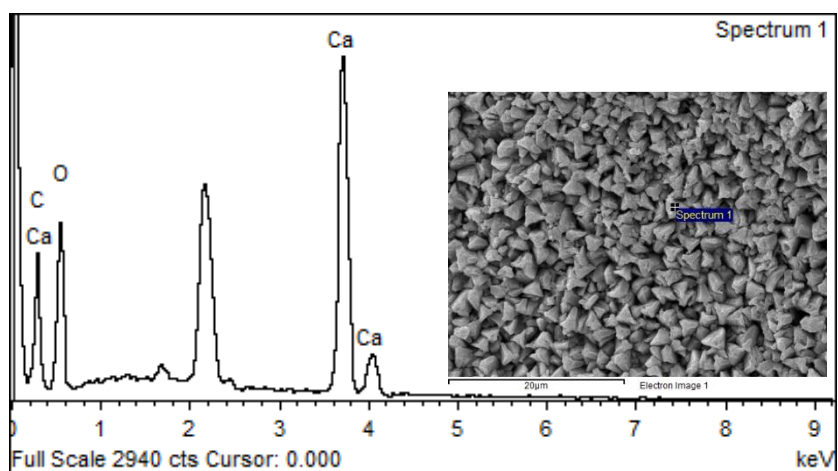
ภาพที่ 4.12 ผลึกมอร์ตาร์ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของตัวอย่าง S-0



ภาพที่ 4.13 ผลึกมอร์ตาร์ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของตัวอย่าง S-1



ภาพที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของผลึกตัวอย่าง S-0

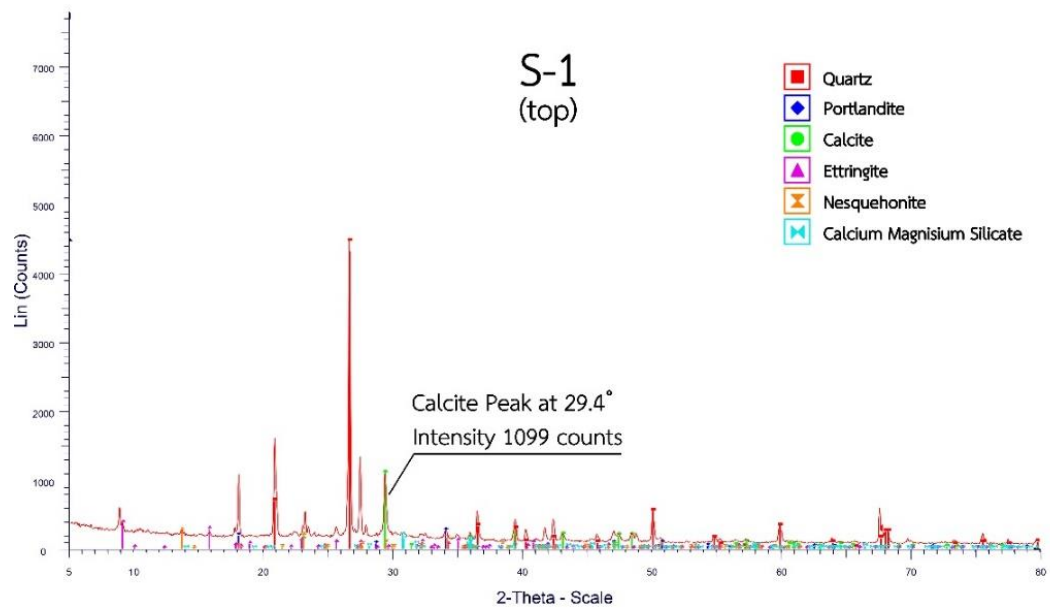
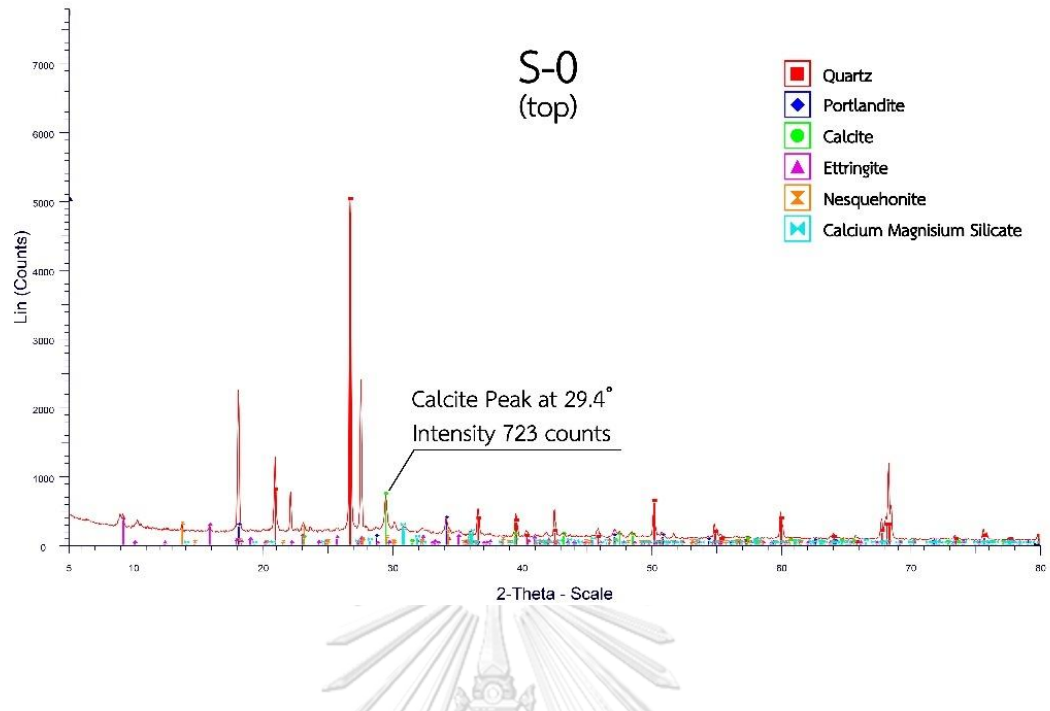


ภาพที่ 4.15 องค์ประกอบทางเคมีของผลึกตัวอย่าง S-1

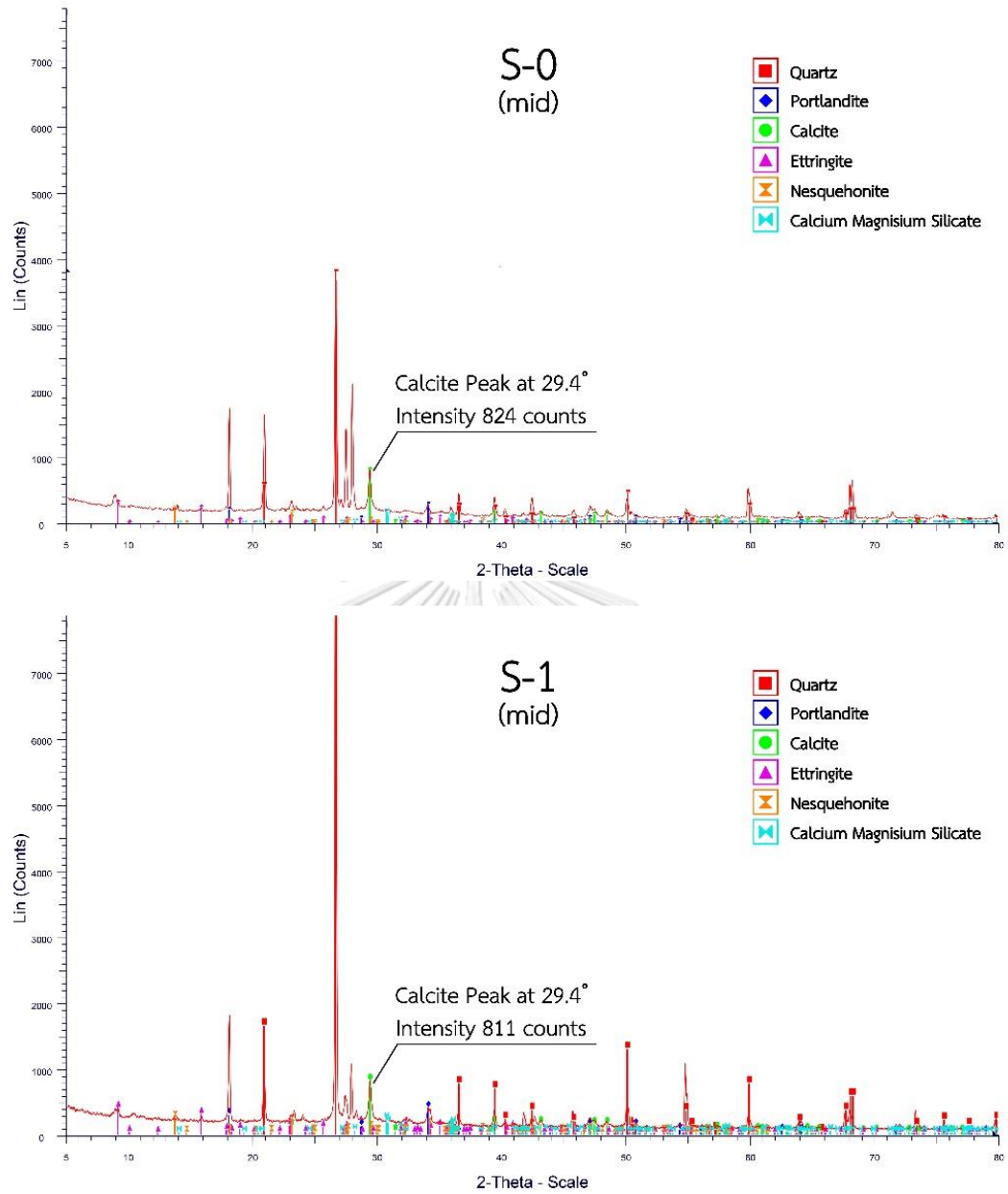
#### 4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ ร้อยละ 1 และไม่ผสมสปอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าผงตัวอย่างของมอร์ตาร์มีส่วนประกอบของแคลไซต์ทั้งหมดรวมถึงตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์แบบคทีเรียด้วยเช่นกัน เนื่องจากทั้งตัวอย่าง S-0 และ S-1 เป็นมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของสารอาหารสำหรับแบบคทีเรีย ซึ่งมีส่วนประกอบของแคลเซียมไนเตรทและยูเรีย โดยสารทั้งสองชนิดนี้ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถเกิดการตกตะกอนเป็นผลึกแคลไซต์ได้

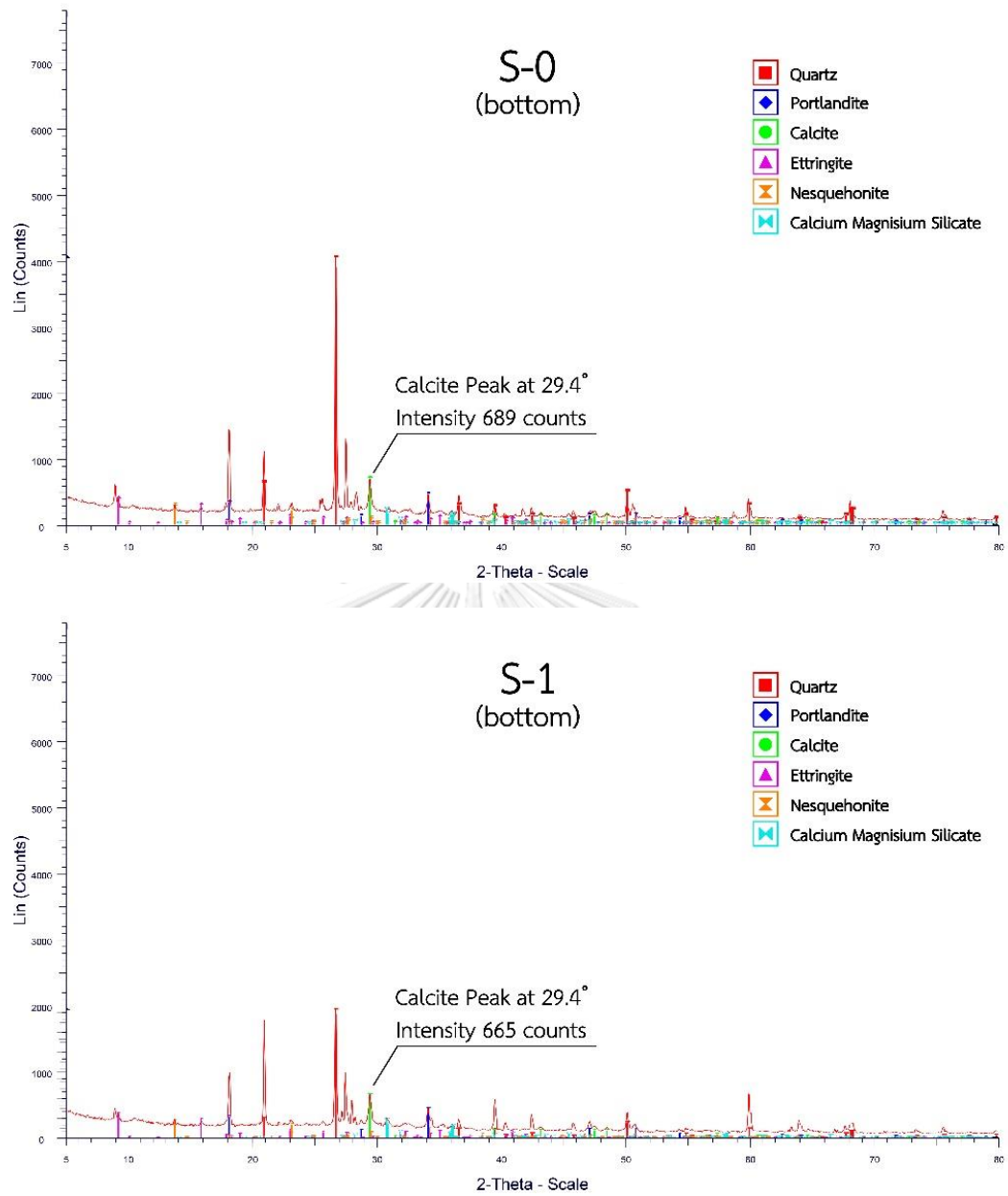
สำหรับผงตัวอย่างที่อยู่บริเวณผิวรอยแตก เมื่อพิจารณาดำแหน่งพีคของกราฟที่แสดงถึงความเป็นผลึกของแคลไซต์ที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ  $29.4^{\circ}$  ของตัวอย่างมอร์ตาร์ S-0 และ S-1 จะพบว่าสามารถวัดค่าความเข้ม (Intensity) ได้เท่ากับ 723 และ 1099 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 เนื่องจากค่าความเข้มในตำแหน่งพีคเป็นค่าที่สามารถบอกได้ถึงปริมาณของผลึกนั้น ๆ โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ร้อยละ 1 จะมีปริมาณของผลึกแคลไซต์สูงที่สุด และตัวอย่างที่ไม่ผสมสปอร์จะมีปริมาณของผลึกแคลไซต์ต่ำที่สุด นอกจากนี้พบว่าที่ความลึก 9 มม. และ 18 มม. จากผิวรอยแตก จะมีปริมาณของผลึกแคลไซต์ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าความเข้มของตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ  $29.4^{\circ}$  ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 และ 4.18 จึงสามารถสรุปได้ว่าการซ่อมแซมรอยแตกด้วยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากสปอร์ของแบบคทีเรียสามารถประสานรอยแตกบริเวณผิวได้ดีกว่าภายในเนื้อมอร์ตาร์



ภาพที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์  
ของตัวอย่างที่อยู่บริเวณผิวย่อยแตกจากตัวอย่าง S-0 (บน) จากตัวอย่าง S-1 (ล่าง)



**ภาพที่ 4.17** ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างที่อยู่ที่มีความลึก 9 มม. จากผิวรอยแตกจากตัวอย่าง S-0 (บน) จากตัวอย่าง S-1 (ล่าง)



**ภาพที่ 4.18** ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์  
ของตัวอย่างที่อยู่ที่มีความลึก 18 มม. จากผิวรอยแตกจากตัวอย่าง S-0 (บน) จากตัวอย่าง S-1 (ล่าง)

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์พบว่าสารอาหารสำหรับแบคทีเรียเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง แต่ในทางกลับกันไมโครแคปซูลที่บรรจุสปอร์ของแบคทีเรียไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ โดยสารอาหารสำหรับแบคทีเรียจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำสูงขึ้น

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์พบว่าปริมาณสปอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประสานรอยแตกของมอร์ตาร์ คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักผงซีเมนต์ ปริมาณสปอร์ดังกล่าวสามารถประสานรอยแตกได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลาเพียง 72 ชั่วโมง หลังจากพ่นน้ำบริเวณผิวรอยแตก โดยความกว้างรอยแตกมากที่สุดที่สามารถซ่อมแซมได้อย่างสมบูรณ์มีขนาด 0.8 มม.

ผลการศึกษาลักษณะผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของผลึกตะกอนบริเวณรอยแตกที่มีการซ่อมแซมพบว่า เป็นผลึกแคลไซต์ สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมสปอร์ของแบคทีเรียร้อยละ 1 โดยน้ำหนักซีเมนต์จะมีปริมาณแคลไซต์สูงที่สุดที่บริเวณผิวรอยแตก

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการอัดขึ้นรูปร่วมกับวิธีแช่แข็งอบแห้ง มีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้กับมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวเอง โดยสามารถช่วยคงสภาพความมีชีวิตเมื่อสปอร์อยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสมของการผสมและขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ อีกทั้งยังสามารถฉีกขาดเมื่อมอร์ตาร์เกิดรอยแตกผ่านบริเวณที่มีไมโครแคปซูล เพื่อให้สปอร์ของแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับน้ำและอากาศ ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายยูเรียและการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิคการกระตุ้นสปอร์ด้วยการฉีดพ่นน้ำและตากแห้งเป็นวัฏจักร สามารถช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาชีวภาพของสปอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาสัดส่วนของปริมาณอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาอายุรีโอไลซิสในมอร์ตาร์ เนื่องจากสารอาหารสำหรับแบคทีเรียดังกล่าวเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง
- 2) ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบเฉพาะการซ่อมแซมรอยแตกในช่วงอายุต้นของมอร์ตาร์ สำหรับการใช้งานจริงรอยแตกสามารถเกิดขึ้นได้ทุกช่วงอายุของมอร์ตาร์ จึงควรมีการศึกษาอายุการใช้งานที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมรอยแตกด้วยวิธี MICP เพื่อเป็นคำแนะนำสำหรับการใช้งานต่อไปในอนาคต
- 3) ควรมีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ตาร์หลังผ่านกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกด้วยวิธี MICP เช่น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำ ความพรุนและการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรง เป็นต้น







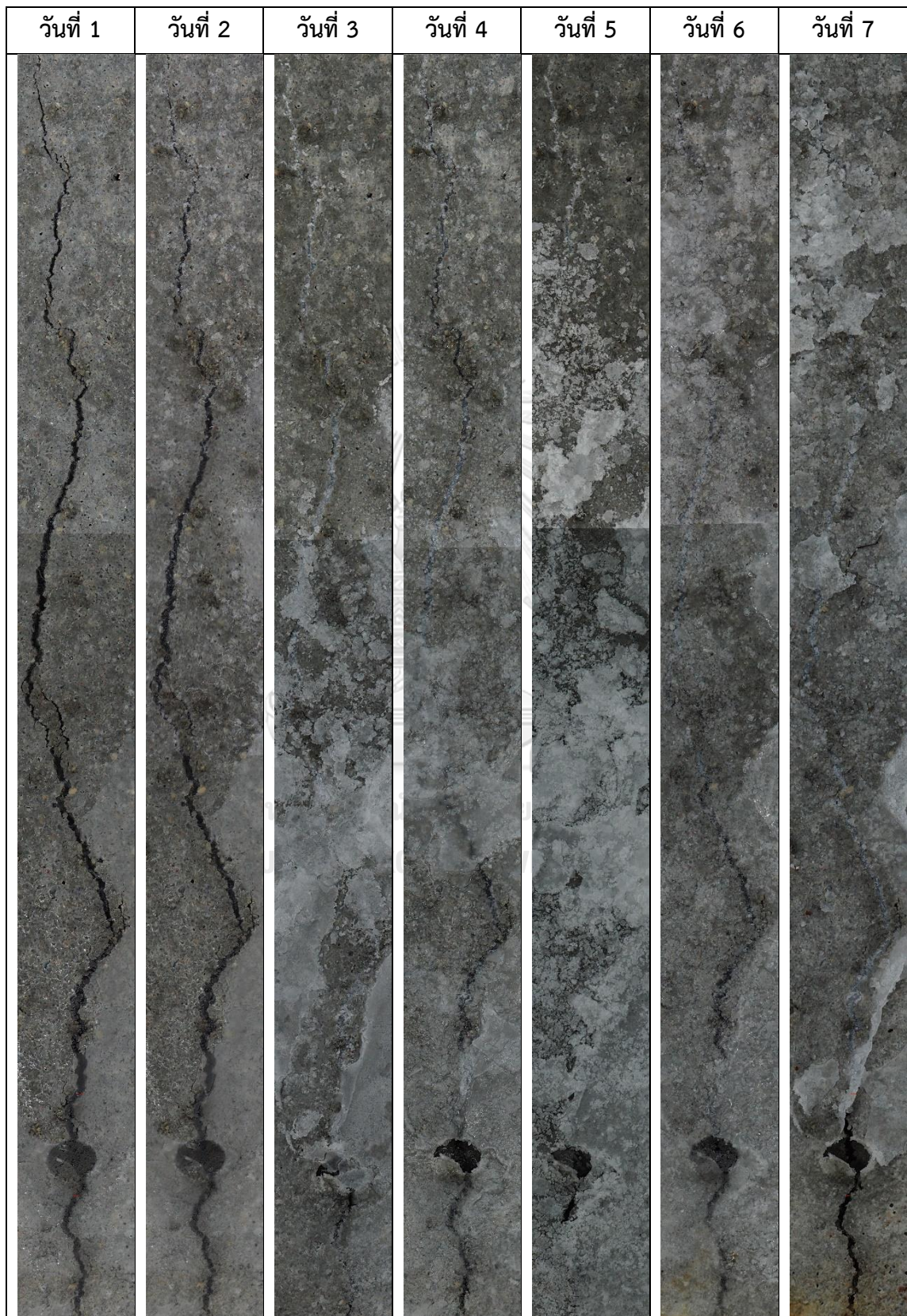
## ภาคผนวก ก

ภาพรอยแตกหลังผ่านกระบวนการซ่อมแซมในช่วงระยะเวลา 7 วันแรก

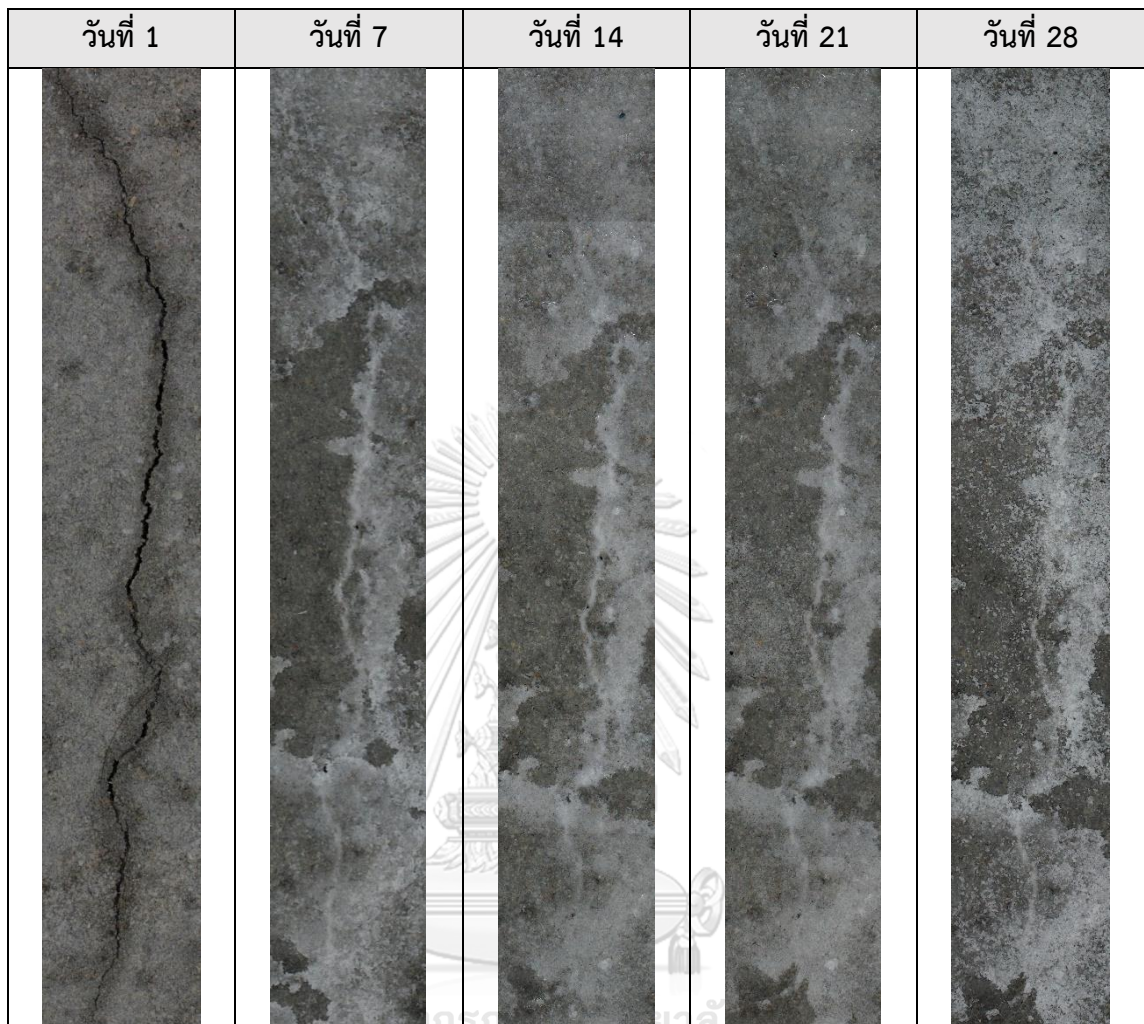
ภาพที่ ก-1 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-0 ในช่วงระยะเวลา 7 วันแรก



ภาพที่ ก-2 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-0.5 ในช่วงระยะเวลา 7 วันแรก



ภาพที่ ก-3 รอยแตกบริเวณผิวของตัวอย่าง S-1 ในช่วงระยะเวลา 28 วันแรก



## บรรณานุกรม

- [1] DPT, (2016). Standard practice of concrete repair. (*DPT1901-16*). Bangkok, Thailand.
- [2] Wang, J., Soens, H., Verstraete, W., and De Belie, N., (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*. 56, 139-153.
- [3] Fathy, A., Abaza, O., Sharaf, A., Labib, G., Asaad, M., Abou-Zeid, M.N., and Fahmy, E.H. (2014). *Properties of bacteria-induced self-healing mortar*. in *CSCE 2014 General Conference*. Halifax, NS.
- [4] Khaliq, W. and Ehsan, M.B., (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*. 102, 349-357.
- [5] Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H., and Schlangen, E., (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*. 122, 118-125.
- [6] Wang, J., Mignon, A., Trenson, G., Van Vlierberghe, S., Boon, N., and De Belie, N., (2018). A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. *Cement and Concrete Composites*. 93, 309-322.
- [7] ASTM, (2002). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. (*C109-02*). West Conshohocken, PA, USA.
- [8] Li, V.C. and Herbert, E., (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 10(6), 207-128.
- [9] Souradeep, G. and Kua, H.W., (2016). Encapsulation technology and techniques

- in self-healing concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 28(12), 15 pages.
- [10] Meharie, M.G., Kaluli, J.W., Abiero-Gariy, Z., and Kumar, N.D., (2017). Factors affecting the self-healing efficiency of cracked concrete structures. *American Journal of Applied Scientific Research*. 3(6), 7 pages.
- [11] Wiktor, V. and Jonkers, H.M., (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*. 33(7), 763-770.
- [12] Qian, C., Chen, H., Ren, L., and Luo, M., (2015). Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Frontiers in Microbiology*. 6, 9 pages.
- [13] Huang, H. and Ye, G., (2016). Numerical studies of the effects of water capsules on self-healing efficiency and mechanical properties in cementitious materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 10 pages.
- [14] Van Tittelboom, K. and De Belie, N., (2013). Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials*. 6(6), 2182-2197.
- [15] Nishiwaki, T., Kwon, S., Homma, D., Yamada, M., and Mihashi, H., (2014). Self-healing capability of fiber-reinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties. *Materials*. 7(3), 2141-2154.
- [16] Sun, L., Liang, D., Gao, Q., and Zhou, J., (2013). Analysis on factors affecting the self-repair capability of SMA wire concrete beam. *Mathematical Problems in Engineering*, 6 pages.
- [17] Omoregie, A.I., Ginjom, R.H., and Nissom, P.M., (2018). Microbially induced carbonate precipitation via ureolysis process: a mini-review. *Transactions on*

*Science and Technology*. 5(4), 245-256.

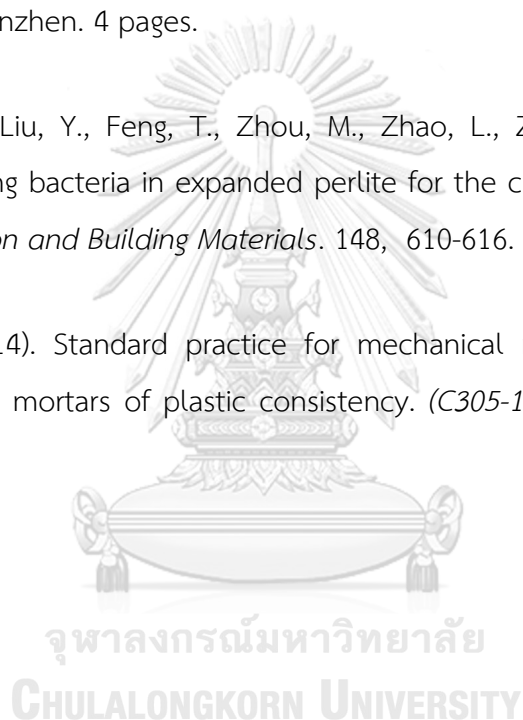
- [18] Intarasontron, J., *Evaluation of self - healing efficiency in concrete by bacterial Spores of microbial induced calcium carbonate precipitation*, in *Environmental Engineering*. (2017), Chulalongkorn University. 141 pages.
- [19] Wang, J., Jonkers, H.M., Boon, N., and De Belie, N., (2017). *Bacillus sphaericus LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 101(12), 5101-5114.
- [20] Keerthana, K., (2016). *Comparative study on durability properties of bacterial concrete*. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 3(12), 129-132.
- [21] Kodama, M., Takita, Y., Tamate, H., Saito, A., Gong, J., Makino, M., Khosla, A., Kawakami, M., and Furukawa, H., (2017). *Novel soft meals developed by 3D printing*. *Future Foods*, 161-181.
- [22] Hiramatsu, Y. and Oka, Y., (1966). *Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 3(2), 89-113.
- [23] ASTM, (2006). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. (C642-06)*. West Conshohocken, PA, USA.
- [24] ACICommittee, (1999). *Hot weather concreting. (ACI 305R)*. Farmington Hills, MI, USA.
- [25] ASTM, (2006). *Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete: Using a Steel Form Insert. (C1579-06)*.
- [26] Ševčík, R., Šašek, P., and Viani, A., (2018). *Physical and nanomechanical*

properties of the synthetic anhydrous crystalline  $\text{CaCO}_3$  polymorphs: vaterite, aragonite and calcite. *Journal of Materials Science*. 53(6), 4022-4033.

- [27] Srilomsak, S., Kamonin, O., and Prertkaew, T., (2009). Quantitative analysis by X-ray diffraction. *Journal of Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)*. 1(2), 111-124.
- [28] Wang, J., Mignon, A., Snoeck, D., Wiktor, V., Van Vliergerghe, S., Boon, N., and De Belie, N., (2015). Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. *Frontiers in Microbiology*. 6, 14 pages.
- [29] Şahin, Y., Akkaya, Y., Boylu, F., and Taşdemir, M., (2017). Characterization of air entraining admixtures in concrete using surface tension measurements. *Cement and Concrete Composites*. 82, 95-103.
- [30] Chen, X., Yuan, J., and Alazhari, M., (2019). Effect of microbiological growth components for bacteria-based self-healing on the properties of cement mortar. *Materials*. 12(8), 15 pages.
- [31] Vandervoort, M., *Impact of bioagents on the cementitious matrix*, in *Engineering and Architecture*. (2019), Ghent University. 110 pages.
- [32] Mwaluwinga, S., Ayano, T., and Sakata, K., (1997). Influence of urea in concrete. *Cement and Concrete Research*. 27(5), 733-735.
- [33] Jonkers, H.M., (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*. 56, 12 pages.
- [34] Wang, J.Y., De Belie, N., and Verstraete, W., (2012). Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 39(4), 567-576.



- [35] Wang, J., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., and De Belie, N., (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 68, 110-120.
- [36] Liu, B., Dong, B., Han, N., Xing, F., Deng, X., and Zhu, G., *The feasibility of waterproof microcapsule system for bacteria-based self-healing cementitious material*, in *5th International Conference on Durability of Concrete Structures*. (2016): Shenzhen. 4 pages.
- [37] Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., and Li, Z., (2017). Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 148, 610-616.
- [38] ASTM, (2014). Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. (C305-14). West Conshohocken, PA, USA.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วนาลี ภาณุพรประพงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	42/78 ม.ภาณุการ์เด้น ถ.สวนผัก 58 แขวง ศาลาธรรมสพนธ์ เขต ทวี วัฒนา กทม. 10170



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY