

การใช้ *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 ในการปรับปรุงคุณสมบัติ เชิงกลของคอนกรีต

The Use of *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 to Improve the Mechanical Properties of Concrete

ราชีช หล่มศรี (Rachit Lomsri)* ดร.อริกา วงศ์กวานกลม (Dr.Athika Wongkvanklom)**

ดร.ดวงนก ฐนังธีรพงษ์ (Dr.Duangkanok Tanangteerapong)^{1***,****}

(Received: June 28, 2019; Revised: September 24, 2019; Accepted: September 25, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้แบคทีเรีย *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 ในชิ้นงานคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนของแบคทีเรียตั้งแต่ 10-40% โดยน้ำหนัก รวมทั้งหาสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการใส่แบคทีเรีย ผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานพบว่าปริมาณแบคทีเรียในช่วง 10-40% ไม่ส่งผลเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่ใส่แบคทีเรีย 40% หรือ BC-40 ที่จำลองรอยร้าวภายในชิ้นงาน (Pre-cracks) มีค่า strength index สูงที่สุด แสดงถึงการสร้างสารจากแบคทีเรียที่ช่วยให้ชิ้นงานคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้ผลจากการนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วย XRD FTIR และ SEM พบว่าสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงในชิ้นงานคือ CaCO_3 โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมแบคทีเรีย 40% จะเห็นปริมาณ CaCO_3 ได้มากที่สุด

ABSTRACT

This research aimed to study the use of *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 in the concrete specimen. The experiment on varying bacteria ratio of 10-40 wt% into the specimens was conducted to improve the compressive strength properties of concrete and investigate new compound after bacteria being added into concrete specimens. The results obviously indicated that bacteria ratios had no negative effect on compressive strength of the concrete specimen. When creating the internal pre-crack of specimen by 40% of maximum compressive strength, it was found that the bacteria could produce a new compound and thus, increased in compressive strength. This result was confirmed by XRD, FTIR and SEM analysis which showed the most CaCO_3 amount in the BC-40 specimen.

คำสำคัญ: คอนกรีต *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 Pre-cracks

Keywords: Concrete, *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159, Pre-cracks

¹ Corresponding author: duangkanok@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

***นักวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

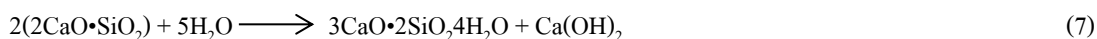
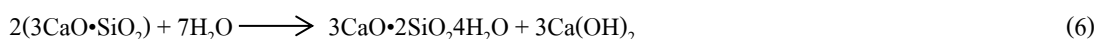
****ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ในช่วงเวลา 50 ปีที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้แบคทีเรียเพื่อผลิตผลึกต่างๆ มากมาย โดยมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในวิชาสาขาต่างๆ เช่น วิศวกรรมธรณี (Geological Engineering) ซึ่งการนำแบคทีเรียมาบำบัดสารพิษในธรรมชาติที่ค่อนข้างหลากหลาย เช่น แบคทีเรียที่สามารถดูดซับสารพิษในน้ำเสียและในดิน [1-2] การดูดซับพิษแบบฝังกลบ [3] และวิศวกรรมโยธา (Civil Engineering) [4-5] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำแบคทีเรียมาประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมโยธาเพื่อช่วยการเพิ่มคุณสมบัติคอนกรีต โดยที่คอนกรีตเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างเนื่องจากความแข็งแรงความทนทานและต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ และหนึ่งปัญหาของคอนกรีตคือ รอยแตกร้าว ซึ่งการเกิดรอยแตกร้าวเริ่มจากรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เมื่อรอยแตกร้าวขยายหรือรวมกันจะทำคอนกรีตเสียกำลังรับแรงอัดและสามารถเกิดอุบัติเหตุได้ [6] โดยการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเหล่านี้มักจะใช้วิธีการใช้ปูนซีเมนต์เทพัส ซึ่งเป็นวิธีที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการผลิตซีเมนต์เป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ รวมไปถึงวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป [6] ทำให้มีการเล็งเห็นความสำคัญของการประหยัดการใช้ทรัพยากร โดยหันมาใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์และส่งผลเสียต่อธรรมชาติน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเป็นที่มาของแนวคิดหาวิธีซ่อมแซมทางชีวภาพของการเกิดรอยแตกร้าวที่ไม่ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ เพื่อยืดอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้างและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม คือเทคนิคการซ่อมแซมโดยการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยแบคทีเรีย โดยการหาสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่เหมาะสมการงานวิจัยนี้คือสามารถสร้างสปอร์เพื่อให้มีชีวิตอยู่ได้ยาวนานในเนื้อคอนกรีตได้หลายร้อยปี โดยไม่จำเป็นต้องได้รับอาหารเป็นเวลานาน และต้องเป็นแบคทีเรียที่ทนต่อสภาพความเป็นด่างแก่ของซีเมนต์ได้ เป็นต้น โดยที่แบคทีเรียจะต้องมีคุณสมบัติหนึ่งขานำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตนี้ จะใช้กลไกในการดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



และอีกปฏิกิริยาที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานคอนกรีตคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดจากซีเมนต์และน้ำผสมกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ Calcium silicate hydrate (C-S-H) ดังสมการต่อไปนี้



ดังนั้น จากคุณสมบัติของแบคทีเรียที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า แบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างเอนโดสปอร์ได้และทนต่อความเป็นด่างได้สูง และแบคทีเรียดังกล่าวไม่ส่งผลเสียหรือเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตต่างๆ เนื่องจาก *B. pseudofirmus* ATCC 700159 จัดอยู่ในแบคทีเรียประเภท Non-Pathogenic ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ *B. pseudofirmus* ATCC 700159 ผสมลงในชิ้นงานคอนกรีตในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยกำลังรับแรงอัด การทดสอบ 40% Pre-cracks และการหาสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD FTIR และ SEM อีกด้วย

วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปในชิ้นงานคอนกรีตที่ใส่แบคทีเรีย

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้คือ *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 เมื่อนำกล้าเชื้อแบคทีเรียออกจากหลอดสตูยูกาส (Stock) จะขยายพันธุ์ด้วยอาหารเหลว NB (5 g/L peptone, 5 g/L Sodium chloride, 1.50 g/L meat extract B# และ 1.50 g/L yeast extract) โดยจะถูกลี้นที่อุณหภูมิ 30°C ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อลงอาหารแข็ง NA (5 g/L peptone, 5 g/L Sodium chloride, 1.50 g/L meat extract B#, 1.50 g/L yeast extract และ 3g/L Agar) โดยบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้โคโลนีเดี่ยวของแบคทีเรีย หลังจากนั้นจะนำ *B. pseudofirmus* ATCC 700159 มาเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีส่วนผสมของ 20 g/L peptone, 5g/L NaCl, 20 g/L urea ที่อุณหภูมิ 30°C และที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วัน นำแบคทีเรียในอาหารเหลวมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ 7500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อนำเอาตะกอนแบคทีเรียผสมกับน้ำกลั่นให้ได้อัตราส่วนต่างๆ เพื่อนำไปทดลองในการผสมคอนกรีตต่อไป

2. การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีต

ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตจะถูกเตรียมด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ ในอัตราส่วนดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่า W/C เท่ากับ 2.5 จากนั้นนำมาอัดลงในแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7 28 และ 60 วัน เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีต

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ	แบคทีเรีย
	kg	kg	kg	kg	kg
CC*	22.8	22	40.8	9.12	0.00
BC-10	22.8	22	40.8	8.21	0.91
BC-20	22.8	22	40.8	7.30	1.82
BC-30	22.8	22	40.8	6.38	2.74
BC-40	22.8	22	40.8	5.47	3.65

* CC คือ ตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่ผสมแบคทีเรีย (Control concrete)

3. การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 500 kN ที่ความเร็วในการทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน ASTM C-39 [7] ในการทดสอบชิ้นงานจะถูกแบ่งเป็นการทดสอบ 2 วิธี ดังนี้ วิธีที่ 1 จะทำการทดสอบ

ชิ้นงานคอนกรีตในวันที่ 7 28 และ 60 วันของการบ่ม เพื่อเปรียบเทียบหาค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานคอนกรีตระหว่างชิ้นงานที่ไม่ผสมแบคทีเรียและชิ้นงานที่ผสมแบคทีเรียของช่วงเวลาการบ่มที่กล่าวมาข้างต้น และวิธีที่ 2 คือ 40% Pre-cracks หรือการกดเพื่อจำลองรอยร้าวภายในชิ้นงาน ที่ถูกบ่มที่ 28 วัน โดยการให้กำลังรับแรงอัด 40% ของค่ากำลังรับแรงสูงสุดของชิ้นงานที่ 28 วัน หลังจากนั้นบ่มชิ้นงานทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องจนครบ 60 วัน แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบกำลังรับแรงอัดอีกครั้ง โดยในครั้งนี้จะทำการให้กำลังรับแรงอัดกับชิ้นงานจนชิ้นงานวิบัติ จะเรียกว่าชิ้นงานชุดนี้ว่า Pre-load ค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับ Unpre-load ที่กดจนวิบัติที่ 60 วัน โดยที่ชิ้นงานชุด Unpre-load คือ ชิ้นงานที่บ่มปกติจนครบ 60 วัน

4. การวิเคราะห์ชิ้นงานหลังทดสอบกำลังรับแรงอัด

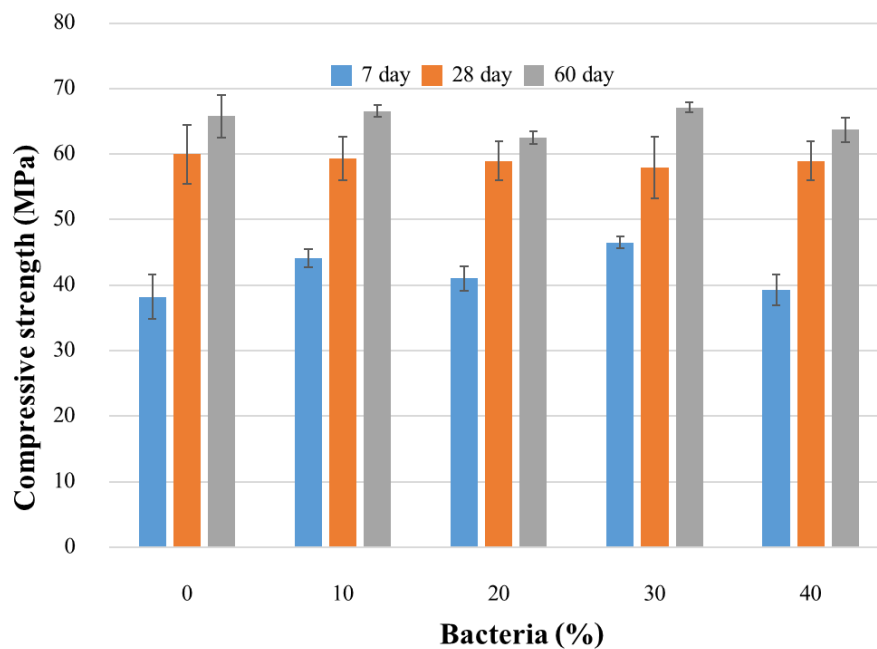
หลังจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจะนำชิ้นงานขนาดเล็กที่ผ่านการบดให้ละเอียดไปทดสอบกับเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray Diffractometer (XRD) Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ Scanning electron microscopy (SEM) เพื่อทดสอบหาธาตุ หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงาน และลักษณะสัณฐานของชิ้นงาน ก่อนนำข้อมูลวิเคราะห์ที่ได้ มาเปรียบเทียบและแสดงผลในกราฟ

ผลการวิจัย

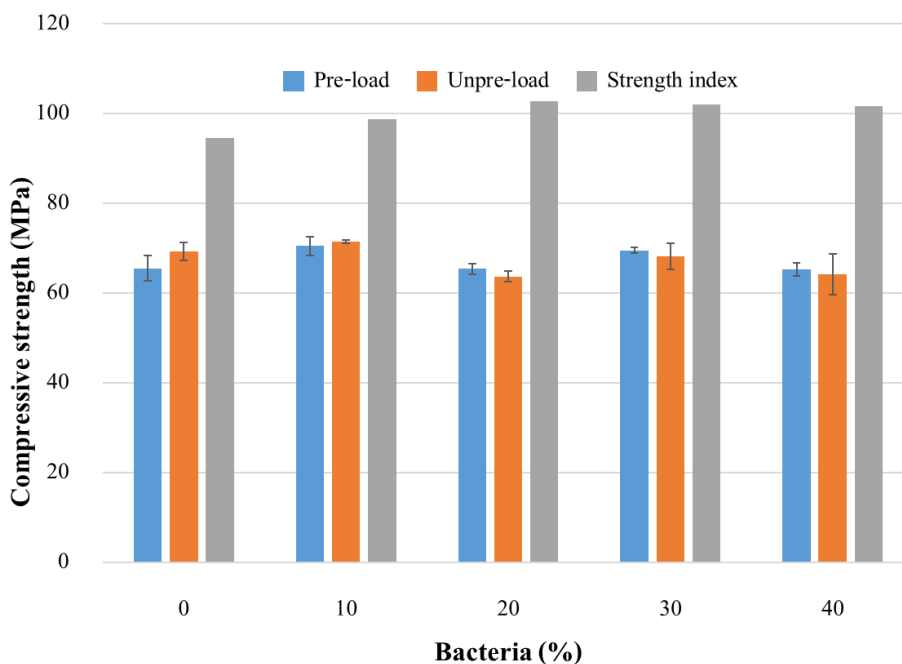
1. ผลการทดลองกำลังรับแรงอัด

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานคอนกรีตที่ถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7 28 และ 60 วันแสดงในภาพที่ 1 ผลที่ได้ของกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานที่ใส่แบคทีเรีย (BC-10, BC-20, BC-30, BC-40) และชิ้นงาน CC พบว่า มีค่าไม่ต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแบคทีเรียไม่ส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ H.M. Jonkers และ E. Schlangen [8] โดยในงานวิจัยของทั้งคู่จะใช้แบคทีเรียชนิด *Sporosarcina pasteurii* DSM 33 ผสมในชิ้นงานคอนกรีตขนาด $16 \times 4 \times 4$ เซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของทั้ง 2 งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันของค่ากำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องมาจากแบคทีเรียยังไม่สัมผัสกับอากาศและความชื้น ทำให้ยังไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด

ภาพที่ 2 แสดงค่ารับกำลังของชิ้นงาน 40% Pre-crack หลังจากบ่มในอากาศจนครบ 60 วัน หรือ Pre-load ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่บ่มปกติครบ 60 วัน หรือ (Unpre-load) ในทุกชิ้นงานที่ผสมแบคทีเรีย ส่วนชิ้นงานคอนโทรลที่ไม่มีแบคทีเรีย นั้น พบว่าชิ้นงานที่มีรอยร้าวมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่บ่มจนครบ 60 วัน ทั้งนี้ข้อแตกต่างของกำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับปริมาณแบคทีเรียที่ใส่ลงในชิ้นงาน เมื่อนำข้อมูลก่อนและหลังรับแรงอัดมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้แสดงในรูปของค่า Strength index โดยมีนิยามว่า ร้อยละของกำลังสูงสุดของชิ้นงาน Pre-load ต่อกำลังสูงสุดชิ้นงานของ Unpre-load จากผลที่ได้พบว่าค่า strength index มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราส่วนที่มากขึ้นแบคทีเรีย ทั้งนี้ เนื่องมาจากการที่แบคทีเรียสัมผัสกับอากาศและความชื้น แบคทีเรียจะมีกลไกการสร้างสารประกอบใหม่ขึ้นมาแทรกตามรอยแตกร้าวภายในชิ้นงาน ตามสมการที่ได้กล่าวถึงในบทนำ นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้ ชิ้นงานหลังกดจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD FTIR และ SEM



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาบ่มของชิ้นงานที่ 7 28 และ 60 วัน

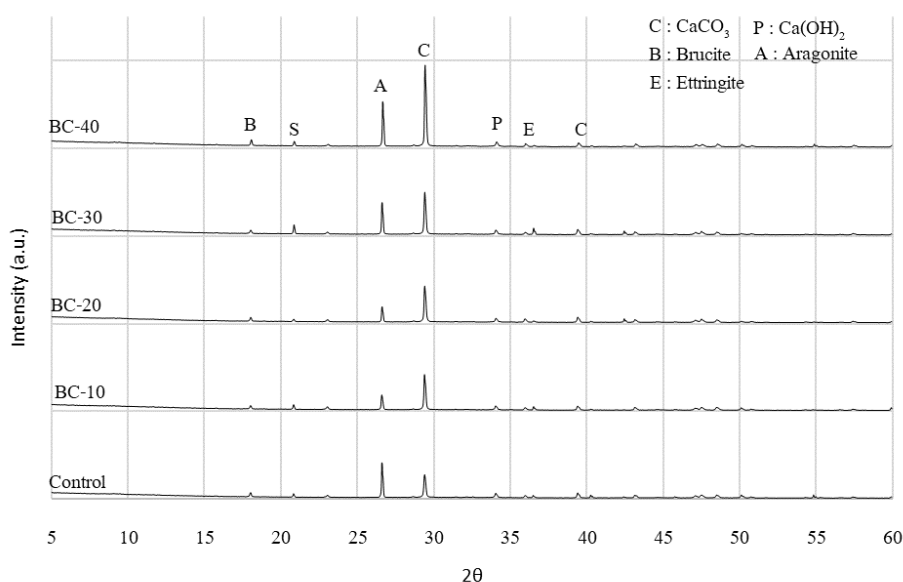


ภาพที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยวิธี 40% Pre-cracks ของชิ้นงานชุด Pre-load และ Unpre-load

2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD

ภาพที่ 3 แสดงถึง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ของชิ้นงานคอนกรีต 40 % Pre-cracks จากชุดตัวอย่าง Pre-load หลังจากทิ้งชิ้นงานให้สัมผัสอากาศและความชื้นเป็นเวลา 32 วัน จากภาพจะพบฟิสิกต่างๆ ซึ่งบ่งบอกสารประกอบที่อยู่ในชิ้นงานคอนกรีตได้แก่ Brucite หรือแร่ของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วน $(Mg(OH)_2)$ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง MgO กับน้ำ ส่วน A หรือ Aragonite เป็นแคลไซต์ชนิดหนึ่ง โดยเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมี

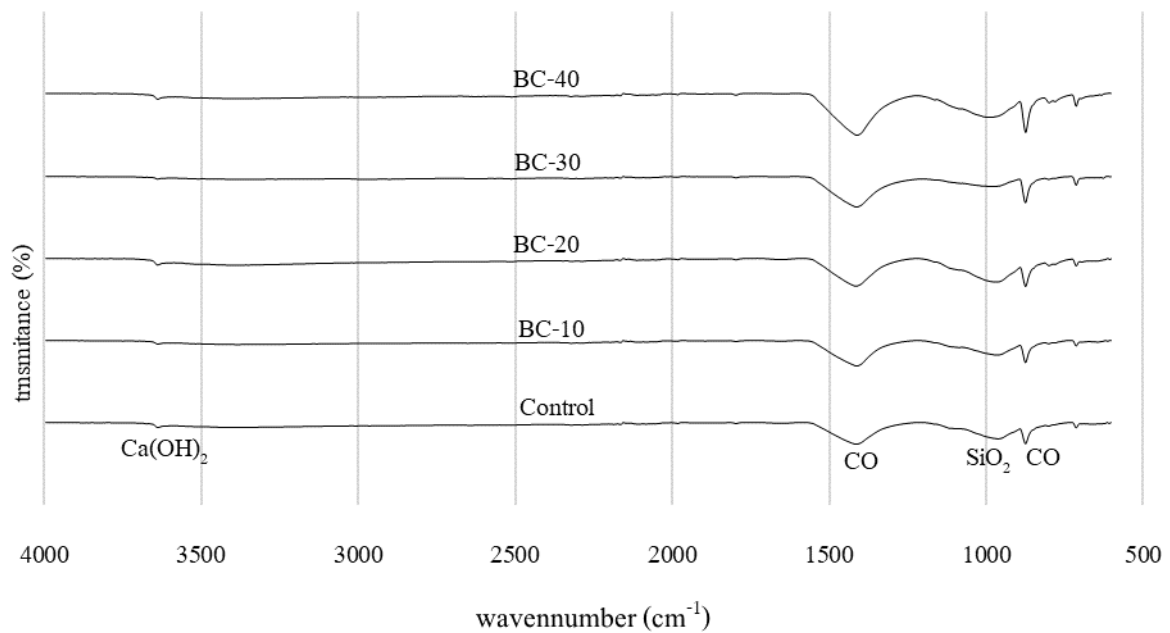
ระหว่างผงปูนกับน้ำ ส่วน C หรือ CaCO_3 เป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงเชิงกลกับชั้นงาน และ E หรือ Ettringite และ P หรือ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ถูกพบอยู่ในชั้นงานคอนกรีตโดยทั่วไป [9-10] และพิกที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ $2\theta = 29^\circ$ ซึ่งแสดงปริมาณผลึกของ CaCO_3 โดยจะเห็นว่าชั้นงานที่ผสมแบคทีเรียทุกอัตราส่วนมีปริมาณ CaCO_3 มากกว่าชั้นงานคอนโทรล และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของแบคทีเรีย โดย BC-40 มีความสูงของพิก CaCO_3 สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากชั้นงาน 40% Pre-cracks มีการจำลองการสร้างรอยร้าวภายในด้วยแรงกดเป็น 40% ของแรงสูงสุดของชั้นงานที่บ่ม 28 วัน ทำให้อากาศและความชื้นสามารถเข้าผ่านภายในของชั้นงานและกระตุ้นกลไกการสร้าง CaCO_3 ของแบคทีเรีย ตามสมการที่กล่าวไว้ข้างต้น (1)-(5) โดย CaCO_3 ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ส่งผลดีให้กับค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนตำแหน่งของพิกที่ $2\theta = 26.65^\circ$ บอถึงการเกิด Aragonite ที่มีสูตรโครงสร้างเช่นเดียวกับ CaCO_3 ซึ่ง Aragonite อาจเกิดจากการสร้างของแบคทีเรีย และจากภาพพบว่าปริมาณของ Aragonite เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของแบคทีเรียในชั้นงาน ส่งผลให้ชั้นงานแข็งแรงมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 3 ผลการทดสอบชั้นงาน 40% Pre-cracks ด้วยเครื่อง XRD ของชั้นงานชุด Pre-load หลังจากบ่มในอากาศ 32 วัน

3. ผลการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง FTIR

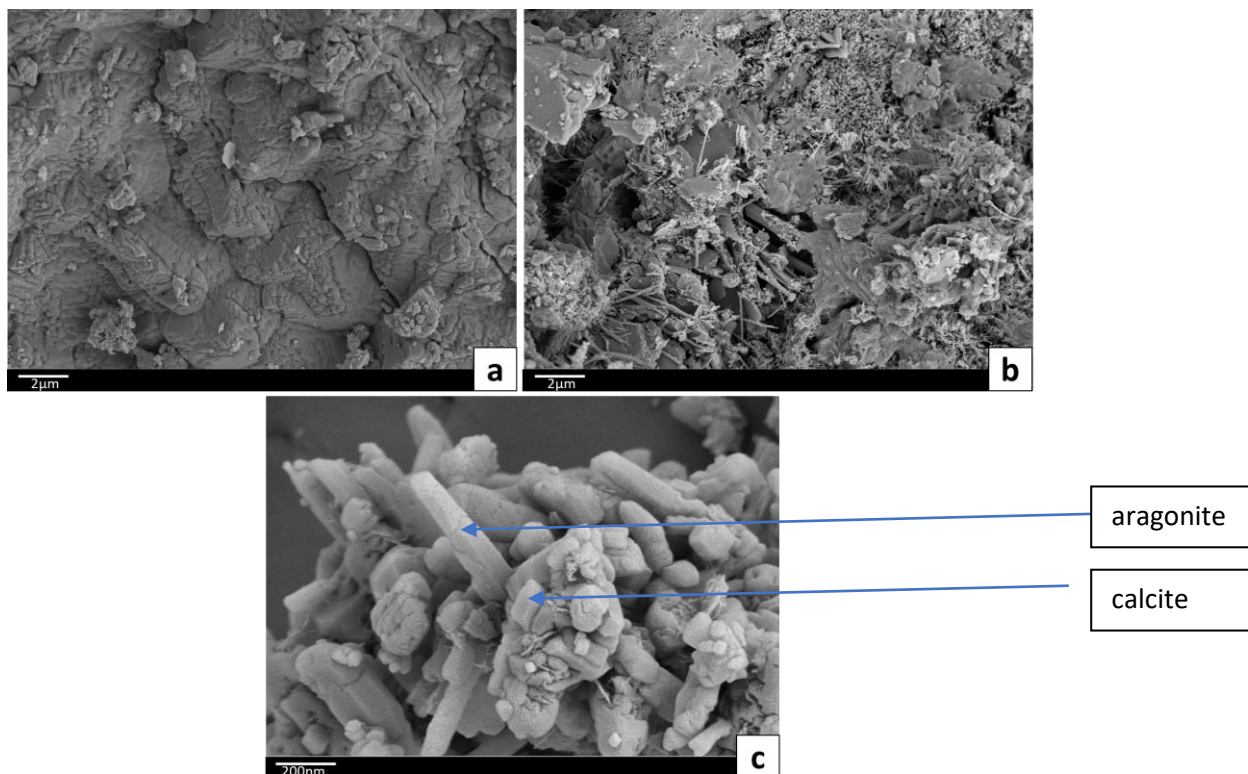
สำหรับการวิเคราะห์ชั้นงานด้วยเครื่อง FTIR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบในชั้นงานแสดงในภาพที่ 4 โดยจากการวิเคราะห์ชั้นงาน 40% Pre-cracks ทั้งหมดจะพบหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในชั้นงาน ได้แก่ O-H stretching ที่ตำแหน่ง 3644 cm^{-1} คือ หมู่ฟังก์ชันที่บ่งบอกถึง $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของผงปูนกับน้ำ ส่วนที่ตำแหน่ง 960 cm^{-1} คือ Si-O band แสดงถึงการมีอยู่ของ SiO_2 ซึ่งเกิดจากการมี C-S-H ของชั้นงานคอนกรีต [11] และ C-O stretching จะอยู่ในรูปของ $(-\text{CO}_3)$ ที่ 1409 cm^{-1} และ 874 cm^{-1} [12-13] ผล FTIR ที่ได้สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เราจึงสรุปได้ว่ามีการขึ้นของสารประกอบใหม่ขึ้นคือ CaCO_3 ซึ่งสังเกตได้จากพื้นที่ของกราฟที่ตำแหน่ง 1409 cm^{-1} และ 874 cm^{-1} มากขึ้น



ภาพที่ 4 ผลการทดสอบชิ้นงานชุด 40% Pre-cracks ด้วยเครื่อง FTIR ของชิ้นงาน Pre-load หลังจากบ่มในอากาศ 32 วัน

4. ผลการวิเคราะห์สัณฐานด้วยเครื่อง SEM

ชิ้นงานหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดถูกนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM เพื่อดูลักษณะสัณฐานของชิ้นงานคอนกรีต ที่แสดงในภาพที่ 5 โดยภาพ 5(a) และ 5(b) คือชิ้นงาน CC และ BC-40 ตามลำดับ ที่ถูกวิเคราะห์ที่กำลังขยายเดียวกัน พบว่าความแตกต่างระหว่างสองภาพนี้คือ ชิ้นงาน BC-40 มีผลึกบางชนิดแทรกอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงาน CC แสดงถึงลักษณะทั่วไปของคอนกรีต และไม่พบผลึกเหมือนชิ้นงาน BC-40 จากนั้นเมื่อให้กำลังขยาย ชิ้นงาน BC-40 ที่แสดงในภาพ 5(c) สังเกตเห็นว่าผลึกมีลักษณะเป็นรูปแท่งของ aragonite และก้อนเหลี่ยมเล็กของ calcite microcrystal ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Choi BS [14] และ Emma L. Sharp [15] ที่ระบุว่าการเกิด CaCO_3 มีได้สามรูปแบบตามธรรมชาติ นอกจากนี้ผลึกของ aragonite และ calcite สามารถเปลี่ยนรูปร่างไปมาได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน



ภาพที่ 5 รูป SEM ของ (a) ชื้นงาน 40% Pre-cracks ของ CC (b) และ (c) ชื้นงาน 40% Pre-cracks ของ BC-40

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการใส่แบคทีเรียลงในชื้นงานคอนกรีตในอัตราส่วน 10% 20% 30% และ 40% โดยการแทนที่ของน้ำ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าอัตราส่วนแบคทีเรียไม่มีผลเสียต่อกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ในการศึกษากำลังรับแรงอัดด้วยการจำลองรอยแตกช้า พบว่า กำลังรับแรงอัดของชื้นงาน BC-40 มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากความสามารถของแบคทีเรียในการสร้างสารประกอบใหม่เพื่อรักษาตัวเองของชื้นงาน สืบได้จากค่า Strength index ที่บ่งบอกถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่มากขึ้นหลังจากชื้นงานดังกล่าวถูกบ่มไว้ในอากาศ โดยสารประกอบใหม่ที่มีปริมาณมากขึ้นตรวจสอบจากเครื่อง XRD แสดงชัดเจนว่า ชื้นงานที่ผสมแบคทีเรียจะมีปริมาณของ CaCO_3 มากกว่าชื้นงานที่ไม่ผสมแบคทีเรียที่ตำแหน่ง $2\theta = 29^\circ$ และในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR พบว่า ที่ตำแหน่ง 1409 cm^{-1} และ 874 cm^{-1} ของกราฟบ่งบอกถึงปริมาณที่เพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่อยู่ในรูปของ CaCO_3 เช่นเดียวกัน ส่วนในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ยังพบ CaCO_3 ที่พื้นผิวชื้นงานอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิจัยจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Chaturvedi S, Chandra R, Rai V. Isolation and characterization of *Phragmites australis* (L.) rhizosphere bacteria from contaminated site for bioremediation of colored distillery effluent. *Ecol Eng.* 2006;27(3):202–207.
2. Gross A, Kaplan D, Baker K. Removal of chemical and microbiological contaminants from domestic greywater using a recycled vertical flow bioreactor (RVFB). *Ecol Eng.* 2007;31(2):107–114.
3. Jugnia LB, Cabral AR, Greer CW. Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. *Ecol Eng.* 2008;33(2):102–109.
4. Laemmli UK. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature.* 1970;227(5259):680–685.
5. De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecol Eng.* 2010;36(2):118–136.
6. Baxter R, Hastings N, Law A, Glass EJ. Concrete Microstructure, Properties, and Materials. Vol. 39, *Animal Genetics.* 2008. 561–563 p.
7. COGUANOR. Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens Guatemala. 2012;04(502):1–7.
8. Jonkers HM, Schlangen E. Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach. 6th Int Conf Fract Mech Concr Concr Struct. 2007;3:1821–1826.
9. Yousuf M, Mollah A, Palta P, Hess TR, Vempati RK, Cocke DL. Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of portland cement and solidification/stabilization consequences. *Cem Concr Res.* 1995;25(3):671–682.
10. Mollah MYA, Lu F, Cocke DL. An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) characterization of the speciation of arsenic (V) in Portland cement type-V. *Sci Total Environ.* 1998;224(1):57–68.
11. Kontoleontos F, Tsakiridis P, Marinos A, Katsiotis N, Kaloidas V, Katsioti M. Dry-grinded ultrafine cements hydration, physicochemical and microstructural characterization. *Mater Res.* 2013;16(2):404–416.
12. Ylmén R, Jäglid U, Steenari BM, Panas I. Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. *Cem Concr Res.* 2009;39(5):433–439.
13. Yu P, Kirkpatrick RJ, Poe B, McMillan PF, Cong X. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy. *J Am Ceram Soc.* 2004;82(3):742–748.
14. Choi BS. Transformation of CaCO₃ to single crystalline micro/nanowires. *J Ind Eng Chem.* 2014;20(1):96–96.
15. Sharp EL, Al-Shehri H, Horozov TS, Stoyanov SD, Paunov VN. Adsorption of shape-anisotropic and porous particles at the air-water and the decane-water interface studied by the gel trapping technique. *RSC Adv.* 2014;4(5):2205–2213.