



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ไฮเดียมอัลจินตห่อหุ้มแบคทีเรีย *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159

สำหรับจีโอพอลิเมอร์ซ่อมแซมตนเอง

Sodium alginate encapsulating *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159

For self-healing geopolymer cement

กนกวรรณ กันยาเลิศ¹, พิษณุสินี ธนะเพชร², วณัทปรีญา หงษ์คง²,ราชีน หล่มศรี¹ และ ดวงกนก ธนังธีรพงษ์^{1,3,*}Kanokwan Kanyalert¹, Pisinee Thanapetch², Wanatpreeya Hongkong²,Rachit Iomsri¹ and Duangkanok Tanangteerapong^{1,3,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ²โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฝ่ายมัธยมศึกษา (ศึกษาศาสตร์) จังหวัดขอนแก่น ³ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University ²Demonstration School of Khon Kaen University ³Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Khon Kaen University

Received: 11 December 2019

Revised: 30 April 2020

Accepted: 14 May 2020

Available online: 30 June 2020

บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์ซ่อมแซมตนเอง (self-healing geopolymer) ที่ผสมแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus* ได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อให้แบคทีเรียสามารถผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตมาปิดรอยร้าวของชิ้นงาน แบคทีเรียมีข้อจำกัดในการทนสภาพต่างแง่ของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่างขั้นตอนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อห่อหุ้มแบคทีเรียด้วยอัลจินตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องแบคทีเรียจากต่างแง่ในระหว่างการผลิต และเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ การทดลองมีการใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus pseudofirmus* ในระยะเอนโดสปอร์ (endospore) ผสมเข้ากับสารละลายไฮเดียมอัลจินต (sodium alginate) ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปเม็ดปิดสัด้วยกระบวนการ extrusion โดยใช้เข็มเส้นผ่านศูนย์กลาง

0.8 มม. หยดสารลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ก่อนนำเม็ดปิดที่มีแบคทีเรียภายในไปใส่ในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากชิ้นงานบ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน มีการนำชิ้นงานไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ผลการห่อหุ้มพบว่าแบคทีเรีย *Bacillus pseudofirmus* ที่ปลดปล่อยออกมาจากเม็ดอัลจิเนตจะมีจำนวนเซลล์ตาย เท่ากับ $15.35 \pm 1.9\%$, $47.28 \pm 24.5\%$ และ $92.85 \pm 3.0\%$ ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 11 และ 12 M ตามลำดับ และมีอัตราการตายมากที่สุดที่เวลา 80 นาที อย่างไรก็ตามแบคทีเรียที่ไม่ได้ผ่านการห่อหุ้มจะมีจำนวนเซลล์ที่ตายสูงสุดภายในเวลาเพียง 20 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าการห่อหุ้มด้วยอัลจิเนตสามารถลดอัตราการตายของแบคทีเรียระหว่างกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการซ่อมแซมตนเอง เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาข้อมูลเชิงสถิติตามเทคนิค Fisher's exact พบว่าสัดส่วนเม็ดอัลจิเนตที่ใส่ไปในชิ้นงานไม่มีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: โซเดียมอัลจิเนต เอนแคปซูเลต ซ่อมแซมตนเอง จีโอพอลิเมอร์ บาซิลลัส

Abstract

A self-healing geopolymer cement containing bacteria in encapsulated alginate beads was successfully performed to protect the cells from high alkalinity during the geopolymer casting. In this study, *Bacillus pseudofirmus* was incubated for 5 days in nutrient broth medium and mixed with 0.5 %w/v sodium alginate solution before dropped through the 0.8 mm diameter needle by an extrusion technique. Afterwards, the encapsulated cells in alginate beads were immersed in 10, 11 and 12 M NaOH and total released cell numbers were counted by haemocytometer to determine the number of dead cells. It was found that the dead cells were $15.35 \pm 1.9\%$, $47.28 \pm 24.5\%$ and $92.85 \pm 3.0\%$ in 10, 11 and 12 M NaOH solution respectively after being exposed for 80 minutes. However, the number of non-encapsulated dead cells reached the highest point within 20 minutes. Therefore, the encapsulation has proved to be able to protect cells resulting in higher survival rate of bacteria in sodium alginate beads. The geopolymer containing these encapsulated beads by 1% and 2% had no negative effects on the compressive strength according to Fisher's exact statistic method ($p < 0.05$).

Keywords: sodium alginate, encapsulate, self-healing, geopolymer, bacillus

1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตที่มีส่วนผสมของ SiO_2 และ Al_2O_3 เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ที่ถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่เป็นด่างสูง สามารถก่อแข็งตัวและรับกำลังอัดได้ โดยจีโอพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งขั้นตอนการผลิตซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ราวร้อยละ 5 - 8 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่มาจากภาคอุตสาหกรรม [1]

การพัฒนาคอนกรีตซ่อมแซมตนเอง (self-healing concrete) พบว่าแบคทีเรียสกุล *Bacillus* สามารถสร้างแคลเซียมคาร์บอเนตผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมเพื่อปิดรอยร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มความต้านทานทางแรงอัดให้กับคอนกรีต [2,3] แต่ยังไม่มีการใช้ในจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถทนต่อสภาพต่างกันในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้ [4] อัลจิเนต (Alginates) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ (1-4)- β -D-mannuronic acid (M) และ α -L-guluronic acid (G) ในรูปแบบต่างๆ ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานห่อหุ้มแบคทีเรียในปัจจุบันเนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่ถูกห่อหุ้ม [5] ผู้จัดทำจึงมีความสนใจห่อหุ้มแบคทีเรียด้วย อัลจิเนตและใช้วิธี Extrusion [6] เพื่อปกป้องแบคทีเรีย

สายพันธุ์ *Bacillus*

pseudofirmus จากสภาวะต่างกันในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์

2. วิธีการการวิจัย

2.1 การเตรียมแบคทีเรีย

แบคทีเรียถูกเลี้ยงในอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย NB (Nutrient Broth) ส่วนประกอบของอาหารประกอบด้วย peptone 20 g/L, NaCl 5 g/L , และ urea 20 g/L ปริมาตร 100 mL ก่อนนำไปเพาะเลี้ยงด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C การตรวจนับจำนวนแบคทีเรียและสปอร์ ทำโดยการย้อมสีแบคทีเรียและใช้เครื่อง Spectrophotometry ตรวจนับค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density, OD) ทุกๆ 1, 3, 5, 7 และ 9 วัน หลังจากการเริ่มเพาะเชื้อ

2.2 การห่อหุ้มแบคทีเรียด้วยอัลจิเนต

แบคทีเรียที่เลี้ยงเป็นเวลา 5 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่แบคทีเรียมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด ถูกนำมาห่อหุ้มด้วยอัลจิเนต ด้วยวิธี Extrusion โดยใช้ความเข้มข้นอัลจิเนต (0.25%, 0.35% และ 0.5%w/v) เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม (0.8, 0.9, 1.2 และ 1.6 มม.) และความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (0.5M, 1M และ 2M) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการห่อหุ้ม ก่อนนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2.3 การห่อหุ้ม *Bacillus pseudofirmus* และการทดสอบแบคทีเรียในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

แบคทีเรียที่ห่อหุ้มภายในเม็ดอัลจิเนตถูกนำไปแช่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10, 11 และ 12M ตามลำดับ เพื่อตรวจหาเซลล์ที่ตายทุกๆ 10 นาที และทำการทดลองเป็นเวลา 140 นาที ด้วยการย้อมเมทิลีน บลู (Methylene blue) โดยเซลล์แบคทีเรียที่ตายแล้วจะติดสีน้ำเงินของเมทิลีน บลู (Methylene blue)

2.4 การนำแบคทีเรียที่ผ่านการห่อหุ้มแล้วไปผสมในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

อัตราส่วนระหว่างเม็ดบีดส์ แก้วลอย และสารละลายต่าง แสดงในตารางที่ 1 โดยแก้วลอย เม็ดบีดส์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10M ถูกนำไปผสมเข้าด้วยกันในเครื่อง Electric cement mortar mixer เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นโซเดียมซิลิเกต (30.24%SiO₂, 12.53%Na₂O, และ 57.23%H₂O) ถูกนำไปผสมเป็นเวลา 5 นาที จีโอพอลิเมอร์ถูกเทลงในแม่พิมพ์ขนาด 1 X1 X 1 นิ้ว แล้วนำไปบ่มที่ตู้บ่มความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จึงจะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 22°C, 50%RH ชิ้นงานจะถูกนำไปวัดกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง hydraulic compression testing เมื่อครบอายุการบ่มที่ 7, 28 และ 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างเม็ดอัลจินเตตกับกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ Fisher's exact test

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมการผลิตจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	แก้ว ลอย (g)	เม็ด บีดส์ (g)	NaO H (g)	NS (g)	ของเหลว */แก้ว ลอย
contro l	500	0	100	100	0.4
B10	500	5	100	100	0.41
B20	500	10	100	100	0.42

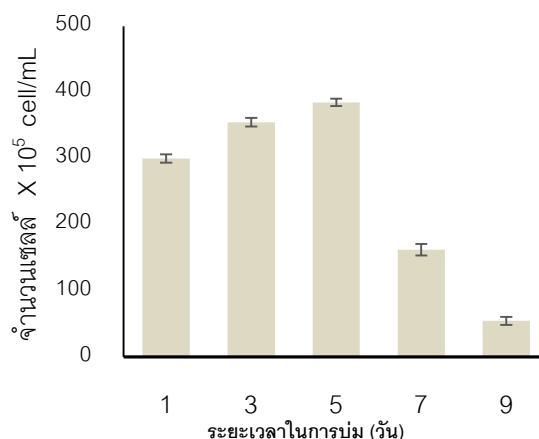
ของเหลว* คือ องค์ประกอบทั้งหมดที่เป็นของเหลวทั้งหมด ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และชุดทดลอง B10 และ B20 คือ มีการเติม

เม็ดบีดส์เข้าไป 1% และ 2% ของน้ำหนักแก้วลอยตามลำดับ

3.ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในอาหาร

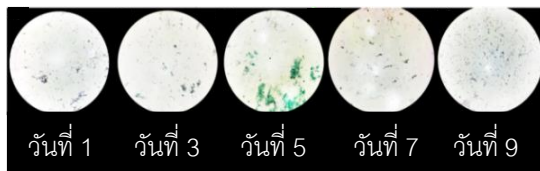
แบคทีเรียได้ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย NB(Nutrient Broth) ที่ประกอบด้วยเปปโตเน (peptone) 20 g/L, โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 5 g/L และยูเรีย (urea) 20 g/L เพื่อเร่งจำนวนเอนโดสปอร์ ผลการทดลองพบว่าจำนวนเซลล์สุทธิมากที่สุดในวันที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.85×10^7 cells/ml และหลังจากวันที่ 5 มีจำนวนเซลล์สุทธิลดลงเนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนได้ตาย ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงจำนวนเซลล์ *B. pseudofirmus* เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

การทดสอบเอนโดสปอร์ด้วยการย้อมสีด้วยซาฟรานินเรด (Safranin red) และมาลาไคต์กรีน (Malachite green) ทุกๆ 1, 3, 5, 7 และ 9 วัน พบว่าจะสังเกตเห็น Vegetative cells เป็นสีแดงหรือชมพูของซาฟรานิน ส่วนเอนโดสปอร์จะสังเกตเห็นเป็นสีเขียวของมาลาไคต์กรีน จากรูปที่ 2 จะสังเกตเห็นสี

เขียวซึ่งย้อมติดเอนโดสปอร์ได้หนาแน่นที่สุด ที่เวลาเลี้ยงเชื้อ 5 วัน



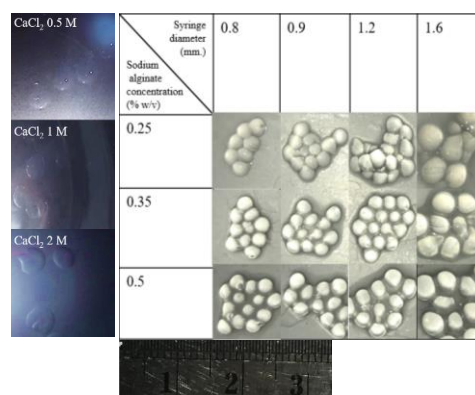
รูปที่ 2 แสดงผลของการย้อมสีเอนโดสปอร์ของ

แบคทีเรีย *B. pseudofirmus*

3.2 ลักษณะทางกายภาพหลังการห่อหุ้มแบคทีเรียแบคทีเรียที่ห่อหุ้มด้วยอัลจิเนตที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและเข้มข้นขนาดต่างๆ มีลักษณะเป็นสีขาวค่อนข้างกลม ขนาดของเม็ดปิดสัขึ้นอยู่กับขนาดของเข้มข้นที่ใช้ และความเป็นทรงกลมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่มากขึ้น แสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 0.5% โดยมวลต่อปริมาตรแคลเซียมคลอไรด์ 0.5M เข้มขนาด 0.8 มม. สามารถทำให้เกิดเม็ดปิดสัมีความเป็นทรงกลมและขนาดเล็กที่สุด คาดว่าจะไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ต่อการรับแรงกดเมื่อนำไปใส่จีโอพอลิเมอร์ โดยขนาดอนุภาคประมาณ 0.18 ซม. และเม็ดปิดสัที่ได้รับจากการทดลองค่อนข้างเป็นทรงกลมที่มีความแข็งแรง หลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างอัลจิเนตและเพคติน และคาดว่าแบคทีเรียสามารถปลดปล่อยออกมาขณะเกิดรอยร้าวได้

3.3 การตรวจสอบการมีชีวิตของ *Bacillus pseudofirmus* ในสารละลาย NaOH

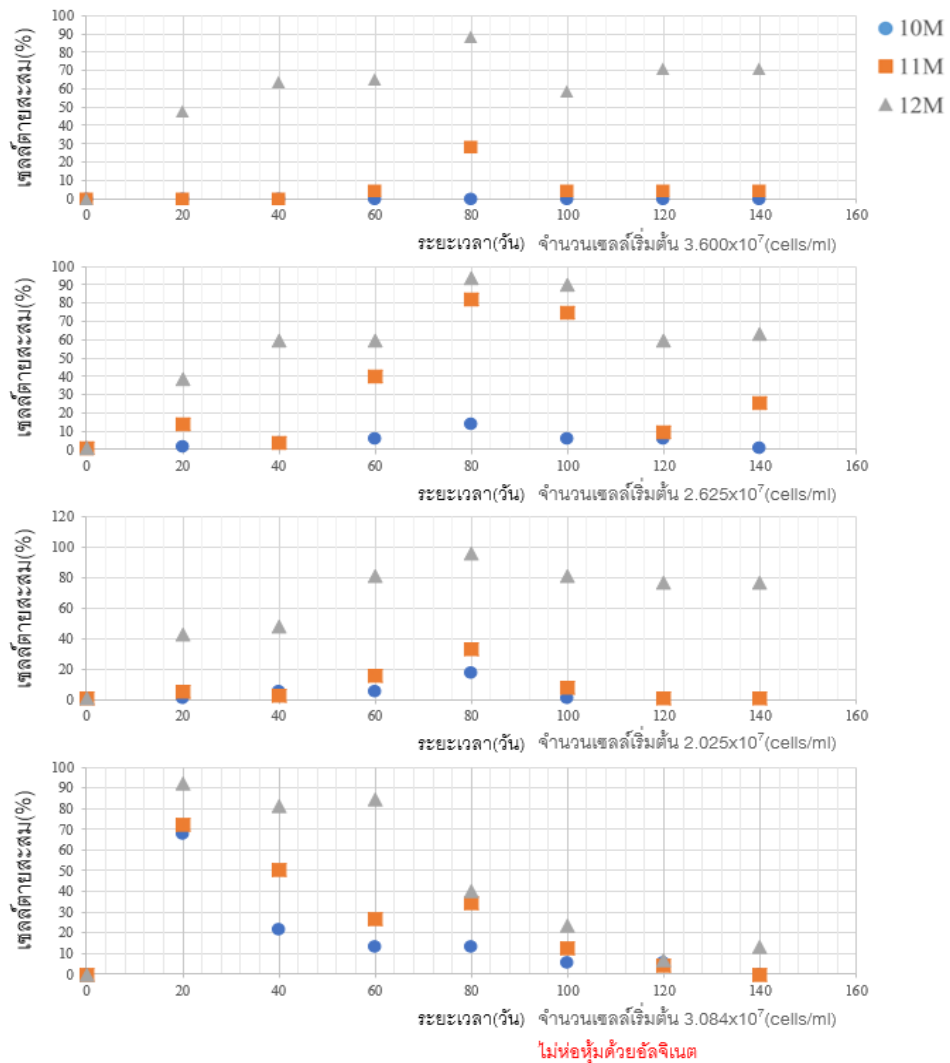
แบคทีเรีย *Bacillus pseudofirmus* ที่ถูกห่อหุ้มด้วยอัลจิเนตถูกนำไปทดสอบในละลายต่างแกก่อนนำไปย้อมสีเพื่อตรวจสอบจำนวนเซลล์ตายเนื่องจากแต่ละครั้งที่ทดลองเป็นการทดลองด้วยชุดทดลองชุดเดียว ทำให้เซลล์ที่ย้อมติดสีเป็นเซลล์ตายสะสม และการลดลงของเซลล์ที่ติดสีเกิดจากผนังเซลล์ที่เปื่อยจากต่างจนไม่สามารถคงสภาพของเหลวในเซลล์ไว้ได้ ทำให้สีย้อมไม่ติดอีกต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม ยังสามารถดูแนวโน้มของการตายได้ ผลการทดลองพบว่าที่ 80 นาที แบคทีเรียที่ถูกห่อหุ้มด้วยอัลจิเนตมีจำนวนแบคทีเรียตายสะสมมากที่สุด ซึ่งคิดเป็น $15.35 \pm 1.9\%$, $47.28 \pm 24.5\%$, $92.85 \pm 3.0\%$ ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 11 และ 12 M ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตามแบคทีเรียที่ไม่ได้ผ่านการห่อหุ้มจะมีจำนวนเซลล์ที่ตายสะสมสูงสุดภายในเวลา 20 นาที



รูปที่ 3 แสดงลักษณะเม็ดอัลจิเนตห่อหุ้มแบคทีเรีย

โดยควบคุมความเข้มข้นอัลจิเนตเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม และความเข้มข้นสารละลาย CaCl_2 โดยกล้อง

Leica D-lux7 ที่ไม่มีกำลังขยาย



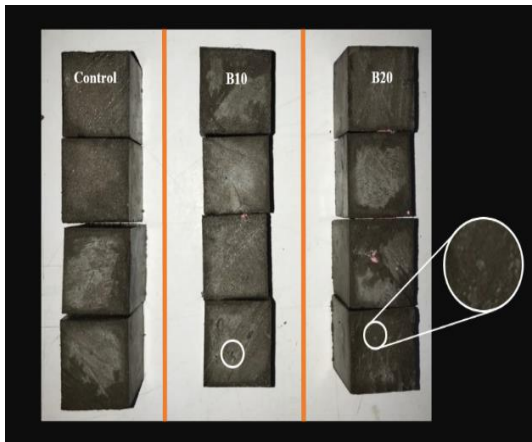
รูปที่ 4 แสดงจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่ตายสะสมที่ปลดปล่อยออกมาจากเม็ดอัลจิเนต ซึ่งแช่อยู่ใน

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M, 11 M และ 12 M

3.4 การนำแบคทีเรียที่ผ่านการห่อหุ้มได้
ขึ้นงานจีโอพอลิเมอร์

ลักษณะภายนอกของขึ้นงานควบคุม
(control), B10 และ B20 มีสีและพื้นผิวเรียบดังแสดง
ในรูปที่ 5 แต่จะสังเกตเห็นขึ้นงาน B10 และ B20

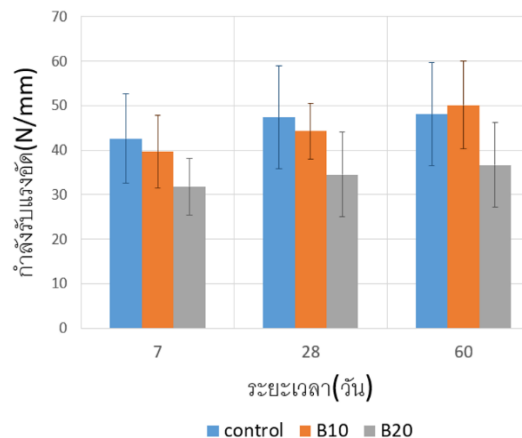
มีหลุมขนาดเล็กที่พื้นผิวเล็กน้อยจากการใส่เม็ดบีดส์
อัลจิเนตเนื่องจากเม็ดบีดส์อัลจิเนตมีความ
ถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อกระจาย
ตัวภายในขึ้นงานจีโอพอลิเมอร์เล็กน้อย



รูปที่ 5 แสดงลักษณะภายนอกของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 7 วันของชิ้นงานควบคุม, B10 และ B20 ตามลำดับ

3.5 กำลังรับแรงอัดของชิ้นงานที่ผสมเม็ดปดส์อัลจิเนต

จากทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานควบคุม, B10, B20 ที่อายุการบ่มต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อใส่เม็ดอัลจิเนตในสัดส่วน 1% และ 2 % ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเทียบกับชิ้นงานควบคุมที่ 7 วัน คิดเป็น 6.84 %, 25.23% ตามลำดับ และ ที่ 28 วัน คิดเป็น 6.57 %, 27.09% ตามลำดับ เนื่องจากเม็ดอัลจิเนตเข้าไปแทนที่ส่วนของเนื้อเถ้าลอยที่ให้ความแข็งแรงต่อจีโอพอลิเมอร์ และอาจเป็นผลมาจากขนาดที่ไม่เท่ากันระหว่างอนุภาคเถ้าลอยและเม็ดปดส์ ดังแสดงในรูปที่ 5 ขนาดที่ใหญ่กว่าของเม็ดปดส์ อาจส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์และค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง [7]



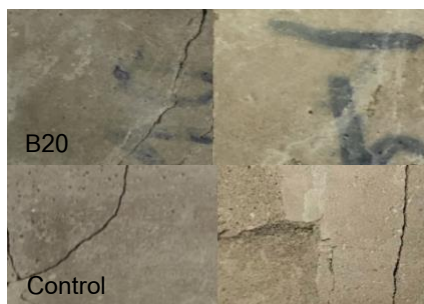
รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ในวันที่ 7,28,60 วัน

เป็นที่น่าสังเกตว่าชิ้นงาน B10 ที่อายุ 60 วัน ให้ค่ากำลังอัดมากกว่าชิ้นงานควบคุมเพียงเล็กน้อย ผลที่เกิดขึ้นนี้ อาจเพราะเมื่อทิ้งชิ้นงานไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อัลจิเนตที่ใช้ห่อหุ้มแบคทีเรียมีการสลายตัว ทำให้ขนาดเม็ดปดส์เล็กลงและกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้อชิ้นงาน หรืออาจเป็นเพราะซิลิกาในเถ้าลอยยังคงทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ในระยะยาวนาน นอกจากนี้การพิจารณาทดสอบสหสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มโดยไม่คำนึงถึงตัวแปรเวลาด้วยเทคนิคสถิติ Fisher's exact แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนเม็ดอัลจิเนตที่ใส่ไปในชิ้นงานไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความแข็งแรงด้านแรงอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ($p < 0.05$)

3.6 การซ่อมแซมตัวเองของชิ้นงาน

หลังจากทิ้งชิ้นงาน B20 ที่มีการจำลองรอยร้าวไว้ประมาณ 20 วัน พบว่ามีของแข็งสีขาวขุ่นตรงบริเวณผิวของรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งอาจแสดง

ให้เห็นว่าแบคทีเรียที่ผ่านกระบวนการ ห่อหุ้มด้วยอัลจิเนตสามารถมีชีวิตรอดจากกระบวนการผลิตซีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ต่างเข้มข้นมาก และสามารถซ่อมแซมรอยร้าวได้ผ่านกระบวนการสร้างสารประกอบใหม่ที่มีปัจจัยของอากาศและความชื้นเป็นตัวกระตุ้นผ่านรอยแตกร้าว



รูปที่ 7 แสดงของแข็งสีขาวขุ่นของชิ้นงาน
ซีโอพอลิเมอร์ที่ใส่ และไม่ใส่เม็ดบีดส์

4. สรุป

การห่อหุ้มแบคทีเรียที่ใช้ไซโตเดียมอัลจิเนต 0.5% (w/v) เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.8 มม. และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 M สามารถปกป้องเซลล์โดยการเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของ *Bacillus pseudofirmus* ATCC 700159 เมื่อเม็ดไซโตเดียมอัลจิเนตถูกผสมกับสารละลายต่างแก่ นอกจากนี้เทคนิคสถิติ Fisher's exact แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนเม็ดอัลจิเนตที่ใส่ไปในชิ้นงานไม่มีความสัมพันธ์กับความกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานซีโอพอลิเมอร์ ($p < 0.05$) และเมื่อทิ้งชิ้นงานไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง มีสารสีขาวขุ่นเกิดบริเวณรอยร้าว ซึ่งเป็นผลมาจากแบคทีเรียที่ใส่เข้าไปในชิ้นงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษากจากกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดการทำวิจัย ตลอดจนขอขอบคุณความร่วมมือระหว่างโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฝ่ายมัธยมศึกษา (ศึกษาศาสตร์) และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali M, Abu-Tair A, Kinuthia J, Ryszard B. Self - healing and strength development of geopolymer concrete made with Waste by products. International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering; 2015 Feb. 3-4; Bali, Indonesia; 2015.
- [2] Evandro M, Denis P, Ramila C. and Denis, R. Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent: applications and drawbacks. 2017; 34(8) : 5-15.
- [3] Mostafa S, Aydin B (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Applied Microbiology and Biotechnology. 2016; 100(6): 2-10.

- [4] Hana Ž, Jiří P, Zuzana R, Pavla, R. Effect of bacteria *Bacillus pseudofirmus* and fungus *Trichoderma reesei* on self-healing ability of concrete, Czech Technical University, Prague. Acta polytechnica ctu proceedings; 2019.
- [5] Petraitytė S, Šipailienė A. Enhancing encapsulation efficiency of alginate capsules containing lactic acid bacteria by using different divalent cross-linkers sources, *Lwt*. 2018; 110: 307–315.
- [6] Evandro M, Denis P, Ramila C, Denis R. Oil encapsulation techniques using alginate as encapsulating agent. *Journal of Microencapsulation Micro and Nano Carriers*. 2017; 34(8): 5-15.
- [7] Luhar S, Chaudhary S, Luhar I. Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*. 2018; 19: 420 - 428.
- [8] สกลวรรณ น่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินคำ และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ. Study physical property of fly ash geopolymer paste. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. 2556; 6(1).