

## ผลกระทบของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการเกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน Influence of local microorganisms on microbiologically induced calcite precipitation in soil

พงศกร ศิริสิงห์อำไพ<sup>1\*</sup> พรเกษม จงประดิษฐ์<sup>1</sup> ดุจดเดือน วราโห<sup>2</sup> พิรดา พรหมมีเนตร<sup>3</sup> สุภาภรณ์ ชีวะธนรัช<sup>4</sup> และ สุรพงษ์ รัตนกุล<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมและการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>2</sup> หลักสูตรวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>3</sup> กลุ่มวิจัยวิศวกรรมชีวเคมีและชีววิทยาระบบ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>4</sup> คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>5</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\*Corresponding author; E-mail address: Pongsakorn.siri@mail.kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการเกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดินโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการผลิตเอนไซม์ยูเรียเอส และเชื่อมประสานกันระหว่างอนุภาคของเม็ดดินทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น สำหรับวิธีการในการทดสอบจะนำดินตัวอย่าง 2 ชนิด ได้แก่ 1. ดินท้องถิ่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยวิธีการใช้ไอน้ำร้อนและแรงดันสูงในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (ออโตคลีฟ) 2. ดินท้องถิ่น โดยนำตัวอย่างทั้งหมดมาผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงอิทธิพลในการทำงานร่วมกันระหว่างจุลินทรีย์ท้องถิ่นกับจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ยูเรียเอสต่อกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน โดยใช้จุลินทรีย์ *Lysinibacillus sphaericus* เปรียบเทียบ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ EW-S2 และ LMG22257 มาซึ่งในตัวอย่างดิน และทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงในแต่ละรอบ เป็นระยะเวลา 18 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินมาตรวจสอบปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Energy Dispersive X-ray (EDS) พร้อมกับกำลังและความสามารถในการซึมผ่าน ผลการทดสอบพบว่าจุลินทรีย์ท้องถิ่นส่งผลให้กระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดินมีประสิทธิภาพที่ลดลง

คำสำคัญ: การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์, การปรับปรุงคุณภาพดิน, จุลินทรีย์ท้องถิ่น, ทราย, ไลซินิบาซิลลัสเฟียริคัส

### Abstract

This research investigated the influence of local microorganisms on microbiologically induced calcite precipitation (MICP) in soils. Two microorganisms that have the potential to produce urease and the interconnection between the particles of the soil granules, including *Lysinibacillus*

*sphaericus* (*L. sphaericus*) strains EW-S2 and LMG 22257. Two types of soils including: 1. soil sterilized by an autoclave and 2. natural soil were used in the study to compare the influence of or the collaboration between local microorganisms and *L. sphaericus* on the process of precipitating calcium carbonate in the soil. For the treatment, the mixture of bacterial culture and chemical solution containing microorganisms was retained in the soil samples for 12 hours per cycle with the total period of 18 days. Together with the strength and permeability, the microstructure and amount of calcium carbonate induced in the treated soil samples were then examined by Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS). From the tests, it was found that the local microorganisms decreased the efficiency microbiologically induced calcite precipitation in the soil.

Keywords: Ground Improvement, Local Microorganisms, *Lysinibacillus Sphaericus*, MICP, Sand

### 1. บทนำ

ในบรรดาวัสดุก่อสร้างในงานวิศวกรรมโยธา ดินเป็นวัสดุเพียงชนิดเดียวที่เป็นวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งแปรปรวนไปตามแหล่งท้องถิ่นกำเนิด บางชนิดมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีสามารถนำมาใช้งานได้ทันที แต่ดินบางชนิดจำเป็นต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นก่อนนำมาใช้งาน ดินแต่ละประเภทต่างมีวิธีการปรับปรุงด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานทั้งทางกล และทางเคมี โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการทางเคมีนั้น ส่วนมากนิยมนำดินไปทำการผสมกับปูนขาว ซึ่งวิธีการเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทรัพยากรในสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อันเป็นผลทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา

สำหรับบางโครงสร้างที่มีข้อจำกัดในการปรับปรุงคุณภาพดิน ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากของโบราณสถานที่มีไม่ได้รับการอนุญาตให้มีการปรับปรุงด้วยวิธีการทางกล และทางเคมีในการก่อสร้าง เนื่องจากมีการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จำเป็นต้องหาทางเลือกอื่นๆ ในการปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก

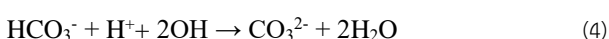
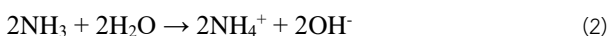
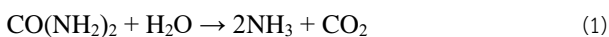
การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์ หรือที่เรียกว่า กระบวนการ MICP เป็นทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ประกอบกับ วิธีการนี้ มีกระบวนการทำงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างโบราณสถานอีกด้วย เนื่องจากไม่มีการใช้เครื่องมือขุดเจาะที่มีการสั่นสะเทือนต่อโครงสร้าง ซึ่งกระบวนการนี้ก่อให้เกิดการพัฒนาคุณสมบัติวิศวกรรมของดินที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษา MICP ที่ผ่านมายังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ และการศึกษาเกี่ยวกับทั้งหมดจะควบคุมสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวอย่างดินจะถูกอบแห้งก่อนทำการทดลองซึ่งไม่สามารถสะท้อนสภาพจริงในสนามหากเกิดการประยุกต์ใช้จริงที่ดินในสภาพธรรมชาติอันประกอบไปด้วยความชื้นในธรรมชาติและมีจุลินทรีย์ท้องถิ่นร่วมด้วย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลกระทบของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการเกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน โดยจะนำดินตัวอย่าง 2 ชนิด ได้แก่ 1..ดินท้องถิ่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยวิธีอ้อได้เคลฟ 2.ดินท้องถิ่น เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงอิทธิพลในการทำงานร่วมกันระหว่างจุลินทรีย์ท้องถิ่นกับจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์ยูเรียเอสต่อกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน โดยเลือกใช้ *L. sphaericus* เป็นแบคทีเรียในกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากโบราณสถาน ซึ่ง *L. sphaericus* เป็นแบคทีเรียที่มีระดับความปลอดภัยทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ในสิ่งแวดล้อมได้จริง ไม่ต้องมีการควบคุมทางชีวภาพที่เข้มงวด และทำการเปรียบเทียบ 2 สายพันธุ์ คือ LMG22257 (สายพันธุ์ที่ใช้กันแพร่หลายในงานวิจัยด้าน MICP) และ EW-S2 (สายพันธุ์ที่คัดแยกได้ในกรุงเทพฯ ประเทศไทย โดยทำการคัดแยกจากมูลไส้เดือนดิน)

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน

การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดินโดยจุลินทรีย์ เกิดจากกระบวนการย่อยสลายยูเรียของแบคทีเรีย และก่อให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียม ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมประสานของอนุภาคเม็ดดิน โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังสมการดังนี้



จากสมการการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตข้างต้น จะเห็นว่าจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์ยูเรียเอสจะย่อยสลายยูเรียไปเป็นแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อแอมโมเนียถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการชักนำในการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน โดยการเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดการพัฒนากำลังของดิน

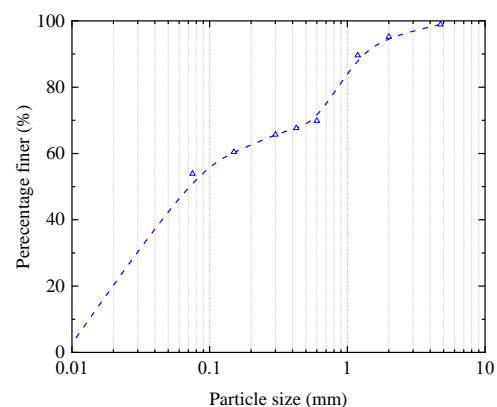
### 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน

1. ชนิดของแบคทีเรีย แบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์ยูเรียเอสแต่ละชนิดจะมีการผลิตยูเรียเอสในปริมาณที่ต่างกัน การผลิตยูเรียเอสได้ปริมาณที่สูงจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น [1]
2. ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรีย ปริมาณความเข้มข้นแบคทีเรียที่มาก จะส่งผลทำให้ปริมาณยูเรียเอสในระบบการกระบวนการ MICP มีปริมาณสูงขึ้น
3. รูปร่างของแบคทีเรีย แบคทีเรียโดยทั่วไปมีขนาด 0.5-3 ไมโครเมตร แบคทีเรียที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคดิน จะสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระในดิน
4. ขนาดคละของดิน หากขนาดคละของดินมีขนาดเล็ก จะส่งผลต่อการไหลเวียนของสารละลายเคมี และแบคทีเรีย
5. ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเคมี ความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่สูง จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น
6. ค่า PH ค่า pH อยู่ระหว่าง 7- 8 จะส่งผลต่อการเกิดกระบวนการ MICP ในอัตราที่สูง
7. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม มักอยู่ช่วง 20-30 องศาเซลเซียส ที่เป็นปัจจัยที่สำคัญในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมนั้นจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การผลิตเอนไซม์ของแบคทีเรียแล้ว ยังส่งผลต่อเกิดปฏิกิริยาเคมีในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย
8. วิธีการที่ใช้ในการทดสอบ สามารถแยกวิธีการทดสอบเป็นหลักๆ 4 วิธีคือ วิธีการไหลผ่านสารละลาย MICP ในตัวอย่างดิน [2], การใช้แรงดันในการอัดสารละลาย MICP ในตัวอย่างดิน [3], วิธีที่ปล่อยให้สารละลายซึมผ่านตัวอย่างดิน และทำการชั่งสารละลายไว้ในตัวอย่างดิน [4] และการสเปรย์ปริมาณสารละลายที่ผิวหน้าของตัวอย่างดิน [5]

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

### 3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

#### 3.1.1 ดินท้องถิ่น



รูปที่ 1 ขนาดคละของดินท้องถิ่น

เป็นดินที่เก็บมาจากบริเวณใกล้กำแพงโบราณสถานจังหวัดลพบุรี ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด 14.79505 ลองจิจูด 100.61466 โดยมีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1

### 3.1.3 ดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

เป็นการนำดินท้องถิ่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องอบไคเคลฟที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 2 รอบ ซึ่งมีขนาดคละเท่ากับดินท้องถิ่น

### 3.2 การเตรียมสารละลายแบคทีเรีย

การเตรียมสารละลายแบคทีเรียเป็นการนำแบคทีเรียที่จะใช้ในการศึกษามาทำการเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อภายในตู้ปั่นเหวี่ยงที่ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามช่วงอายุที่ต้องการ แล้วนำมาผสมกับในสารละลายเคมีในอัตราส่วนปริมาตร 1 ต่อ 1 ก่อนนำไปไหลผ่านตัวอย่างดิน

#### 3.2.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของ *L. sphaericus*

การศึกษาค่าใช้เชื้อ 2 สายพันธุ์ คือ EW-S2 และ LMG22257 [6] จึงทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมของอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งทำการใช้อาหาร 2 รูปแบบคือ NB broth 13 กรัมต่อลิตรอย่างเดียว และ NB broth 13 กรัมต่อลิตร ที่ผสมกับยูเรีย 20 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาหารที่ใช้จะผ่านการฆ่าเชื้อแล้วก่อนนำมาทำการเลี้ยง *L. sphaericus*

#### 3.2.2 การศึกษาช่วงอายุที่เหมาะสมสำหรับเตรียมสารละลายแบคทีเรีย

ในกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินนั้นจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในเกิดแคลไซต์ ซึ่งขึ้นกับปริมาณเอนไซม์ยูเรียเอสที่ *L. sphaericus* ผลิตออกมา ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบ Urease test เพื่อหาช่วงอายุที่แบคทีเรียสามารถผลิตเอนไซม์ยูเรียเอสออกมาสูงสุด โดยควบคุมความเข้มข้นของเชื้อที่ OD<sub>600</sub> เท่ากับ 0.5 ทั้ง 2 สายพันธุ์แล้วนำช่วงเวลาดังกล่าวสำหรับกำหนดช่วงเวลาในการเลี้ยงเชื้อ

### 3.3 การเตรียมสารละลายเคมี

การเตรียมสารละลายทางเคมีนั้น เป็นการผสมสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินให้เข้ากันก่อนนำไปผสมกับสารละลายแบคทีเรีย ซึ่งประกอบไปด้วย NB broth 3 กรัม, โซเดียมโบคาร์บอเนต 2.12 กรัม, แอมโมเนียมคลอไรด์ 10 กรัม ผสมลงในน้ำ 1 ลิตร และยูเรีย กับ แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรตอย่างละ 0.5 โมลาร์ [7]

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างดิน

เป็นการบรรจุดินลงในโมลด์ทรงกระบอกซึ่งทำจาก PVC สูง และเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.2 และ 4.8 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทาวาสลินให้ทั่วภายในโมลด์ PVC และตัดแผ่นพลาสติกใสขนาดพอดีใส่ภายในเพื่อให้ง่ายในการถอดตัวอย่าง

2. บดอัดดินลงในตัวอย่างโมลด์ ดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ (ร้อยละของปริมาณน้ำในดินเท่ากับ 12.1) บดอัดด้วยความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3. ปิดหัว-ท้ายโมลด์ด้วยกระดาษกรอง และพอร์สสโตน โดยพันด้วยเทปพันสายไฟ เพื่อให้สารละลายไหลทั่วหน้าตัดทรงกระบอก

4. ปิดหัว-ท้ายด้วยฝาปิด PVC ที่ทำการต่อสายสำหรับไหลผ่านสารละลาย แล้วทาด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารละลาย

### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

1. ผสมสารละลายแบคทีเรีย กับสารละลายเคมีอัตราส่วนปริมาตร 1 ต่อ 1

2. ไหลผ่านสารละลาย และซังสารละลายทิ้งไว้ในตัวอย่างดินเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และจะทำการเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 12 ชั่วโมง ต่อเนื่อง 18 วัน

3. หลังจากครบ 18 วัน ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การทดสอบที่ 18 วันได้ผลลัพธ์ที่คุ้มค่าที่สุด นำตัวอย่างดินทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability), การทดสอบคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic Pulse Velocity), การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test), การส่องอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุ (EDX)

### ตารางที่ 1 โปรแกรมการทดสอบ

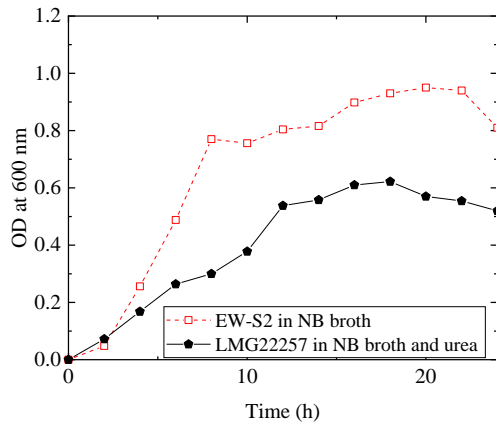
การทดสอบ	ตารางแสดงโปรแกรมการทดสอบ				
	Before MICP	CL_S2	LS_S2	CL_GT	LS_GT
การซึมผ่านของน้ำ	0 day	18 days	18 days	18 days	18 days
คลื่นอัลตราโซนิค	0 day	18 days	18 days	18 days	18 days
กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว	0 day	18 days	18 days	18 days	18 days
ส่องอนุภาค SEM	0 day	18 days	18 days	18 days	18 days
การวิเคราะห์ธาตุ	0 day	18 days	18 days	18 days	18 days

4. วิเคราะห์ผลจากการทดสอบเพื่อหาอิทธิพลของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดิน และอิทธิพลของสายพันธุ์สายพันธุ์แบคทีเรียที่เลือกใช้

## 4. วิเคราะห์ผลวิจัย

### 4.1 ผลการเจริญเติบโตของ *Lysinibacillus sphaericus*

การศึกษาค่าใช้เชื้อ 2 สายพันธุ์ คือ EW-S2 และ LMG22257 จึงทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมของอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า LMG22257 สามารถเจริญเติบโตได้ดีใน NB broth 13 กรัมต่อลิตร และ ยูเรีย 20 กรัมต่อลิตร และ EW-S2 สามารถเจริญเติบโตได้ดีใน NB broth 13 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาหารที่ใช้จะผ่านการฆ่าเชื้อแล้วก่อนทำการเลี้ยงเชื้อ นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์แล้วได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเจริญเติบโตของ *L. sphaericus* ในแต่ละช่วงอายุ

#### 4.2 ผลจากการศึกษาช่วงอายุที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารละลายแบคทีเรีย

จากผลการทดสอบหาปริมาณยิวรีเอสสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา พบว่าความเข้มข้นของฟีนอลเรดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการผลิตยิวรีเอสของแบคทีเรียที่สูงขึ้น สำหรับสายพันธุ์ LMG22257 พบว่าการผลิตยิวรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12-20 ชั่วโมง แต่ในสายพันธุ์ EW-S2 พบว่าการผลิตยิวรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากการทำการวิเคราะห์จึงเลือกใช้ช่วงเวลาที่ 12 ชั่วโมงในการเลี้ยงแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ในตู้ปั่นเหวี่ยง เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเตรียมสารละลายแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ได้ในเวลาเดียวกัน และกำหนดช่วงเวลาในกระบวนการทดสอบทั้งหมดได้ในเวลาเดียวกัน การปรับปรุงจึงเป็นวงรอบละ 12 ชั่วโมงเป็นเวลาทั้งสิ้น 18 วันดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายการตัวอย่างดินท้องถิ่นและชนิดจุลินทรีย์ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	ชนิดดิน	สายพันธุ์	จำนวนวันทดสอบ
CL_S2_18d	Autoclaved local soil	EW-S2	18
LS_S2_18d	Local soil	EW-S2	18
CL_GT_18d	Autoclaved local soil	LMG22257	18
LS_GT_18d	Local soil	LMG22257	18

#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

##### 4.3.1 การทดสอบการซึมน้ำของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

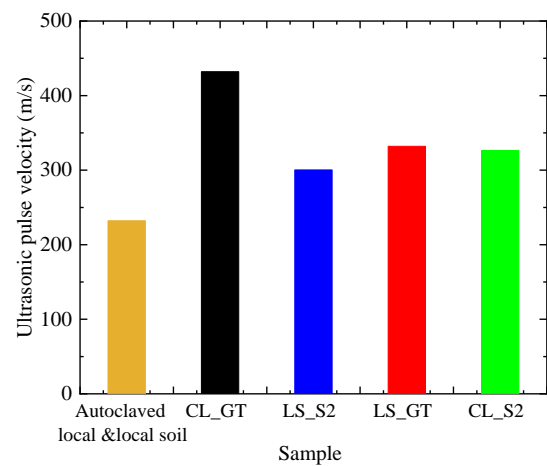
จากตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่การทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า ค่าการซึมน้ำของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อลดลงมากกว่าดินท้องถิ่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินที่ฆ่าเชื้อเป็นตัวอย่างมีที่มากกว่าดินท้องถิ่น นอกจากนี้แล้วเมื่อสังเกตที่ดินตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่าการซึมน้ำลดลงกว่า EW-S2 ซึ่งบ่งชี้ถึง

ประสิทธิภาพของการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของสายพันธุ์ LMG22257 ที่สูงกว่า EW-S2

ตารางที่ 3 ค่าการซึมน้ำของตัวอย่างทรายก่อนและหลังปรับปรุง

ตัวอย่าง	ค่าการซึมน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)	
	Autoclaved local soil	Local soil
Before MICP	2.612x10 <sup>-4</sup>	
EW-S2	3.111x10 <sup>-5</sup>	6.249x10 <sup>-5</sup>
LMG22257	8.502x10 <sup>-6</sup>	2.720x10 <sup>-5</sup>

##### 4.3.2 การทดสอบคลื่นอัลตราซาวด์ของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นตลก่อน และหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

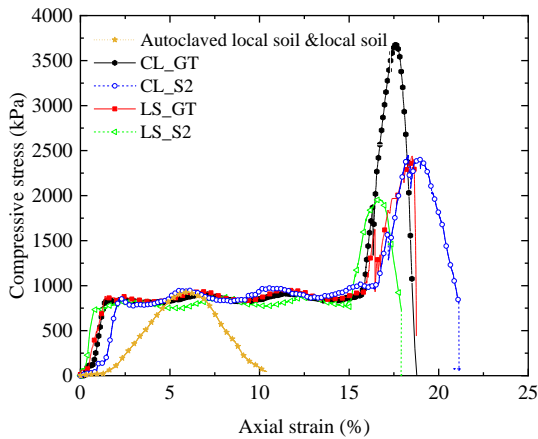
จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่การทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า ค่าความเร็วคลื่นตลผ่านดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่ปรับปรุงมีค่าสูงกว่าดินท้องถิ่นปรับปรุง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากการทดสอบกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ดินที่ฆ่าเชื้อเป็นตัวอย่างที่มีความแข็งแรงของตัวอย่างที่สูงกว่าดินท้องถิ่น นอกจากนั้นแล้วเมื่อสังเกตที่ดินตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่าความเร็วคลื่นตลสูงกว่า EW-S2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของสายพันธุ์ LMG22257 มีสูงกว่า EW-S2

##### 4.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

จากตารางที่ 4 พบว่าการทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุดของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อมีค่าสูงกว่าดินท้องถิ่น และที่ดิน

ตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุดมีค่าสูงกว่า EW-S2

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างทดสอบระหว่างการรับแรงในแนวแกน เมื่อเทียบกับตัวอย่างไม่ปรับปรุง จะเห็นได้ว่า การรับแรงของดินหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์นั้นจะเพิ่มขึ้นที่ค่าความเครียดน้อยกว่าของดินที่ไม่ปรับปรุงแสดงว่าตัวอย่างดินปรับปรุงมีความแกร่งกว่า เมื่อรับความเค้นเท่ากับค่าสูงสุดของดินที่ไม่ปรับปรุง ตัวอย่างดินปรับปรุงมีค่าความเค้นคงที่ในขณะที่ความเครียดดำเนินต่อไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของการปรับปรุงในตัวอย่างดินหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ จึงทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของตัวอย่างมีลักษณะดังกล่าว จนค่าความเครียดในแนวแกนมีค่าอยู่ในช่วง 18-21 % ค่าความเค้นจึงเพิ่มอีกครั้งไปสู่ค่าสูงสุดด้วยการเพิ่มขึ้นของความเครียดอีกเพียงเล็กน้อย ก่อนตกลงอย่างรวดเร็ว



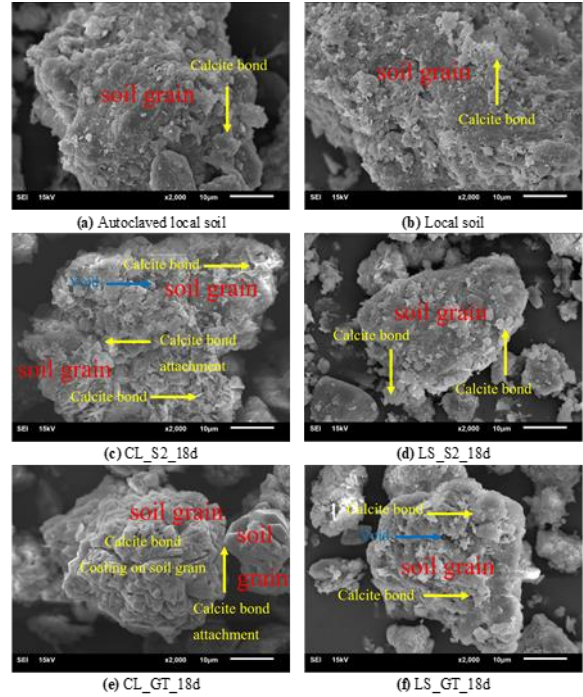
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของตัวอย่างทรายควบคุมหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

ตารางที่ 4 กำลังการรับน้ำหนักสูงสุดก่อน และหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

ตัวอย่าง	ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุด (กิโลปาสกาล)	
	Autoclaved local soil	Local soil
Before MICP	928.117	
EW-S2	2446.642	1962.509
LMG22257	3678.764	2440.201

#### 4.3.4 การทดสอบการส่องอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

จากรูปที่ 5 จะสังเกตเห็นว่าดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อเริ่มต้นมีอนุภาคแคลไซต์เริ่มต้นอยู่แล้วเล็กน้อย แต่หลังจากกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์พบว่า มีอนุภาคแคลไซต์เพิ่มมากขึ้น

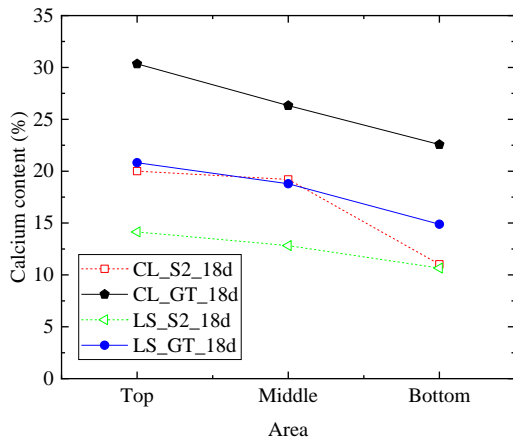


รูปที่ 5 ผลการส่องอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อนและหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ธาตุ (EDX)

ตารางที่ 5 ปริมาณแคลไซต์แต่ละส่วนของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นควบคุมก่อนและหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

ชื่อตัวอย่าง	ร้อยละปริมาณแคลไซต์		
	ส่วนบน	ส่วนกลาง	ส่วนล่าง
Autoclaved local soil	8.00		
Local soil	8.56		
CL_S2_18d	20.01	19.20	11.02
CL_GT_18d	30.35	26.32	22.57
LS_S2_18d	14.14	12.83	10.655
LS_GT_18d	20.815	18.79	14.89



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมแต่ละส่วนของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นควบคุม หลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่าปริมาณแคลเซียมเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณ ส่วนบนของตัวอย่าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 สายพันธุ์จะพบว่า LMG2257 มีแนวโน้มทำให้ปริมาณแคลไซต์เกิดขึ้นสูงกว่า EW-S2 และที่สายพันธุ์ที่ใช้ในการ ทดสอบเดียวกัน พบว่าตัวอย่างดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อมีปริมาณแคลเซียมที่สูงกว่าดิน ท้องถิ่น

## 5. สรุปผล

### 5.1 สรุป

ผลจากอิทธิพลของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ ในดินมีการตรวจสอบในการศึกษานี้ ดินสำหรับการรักษา MICP ในการศึกษาถูกนำมาจากท้องถิ่นและเตรียมในสองเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1) ดินถูกฆ่าเชื้อโดยเครื่องนี้ฆ่าเชื้อและ 2) ดินธรรมชาติที่มีจุลินทรีย์ ท้องถิ่นในดิน ถูกทดสอบด้วย *Lysinibacillus sphaericus* 2 สายพันธุ์คือ EW-S2 และ LMG2257 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ MICP การศึกษาเริ่มต้นด้วยการประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบ เบื้องต้นโดยใช้ทราย หลังจากนั้นทดสอบการซึมผ่านน้ำ และกำลังรับ แรงอัด เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม หลังจากนั้นการทดสอบ SEM และ EDS ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการเกิดขึ้นของผลึกแคลไซต์และ ปริมาณแคลไซต์หลังจากกระบวนการ MICP ต่อไปนี้เป็นข้อสรุปของ การศึกษา :

1. LMG2257 มีประสิทธิภาพในการผลิตแคลไซต์มากกว่า EW-S2 ซึ่ง ปริมาณแคลไซต์สูงสุดคือ 30% อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาที่ 18 วัน EW-S2 มี ผลผลิตภาพที่มีนัยยะสำคัญที่จะใช้งานได้ และสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ค่า กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นและค่าความซึมผ่านลดลงอย่างสอดคล้องกับปริมาณ แคลไซต์เป็นอย่างดี

2. ประสิทธิภาพในการเกิดแคลไซต์และสมบัติของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อสูง กว่าของดินท้องถิ่น

โดยสรุปแล้วการศึกษานี้บ่งชี้ว่าการมีอยู่ของจุลินทรีย์ในท้องถิ่นมีผลทำให้ ประสิทธิภาพ MICP ลดลง การดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ในท้องถิ่นจำเป็นต้อง

พิจารณาในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในสภาพจริง นอกจากนี้สายพันธุ์ของ แบคทีเรียมีผลต่อการผลิตยูเรียเอส และการตกตะกอนแคลไซต์ อย่างไรก็ตาม ตาม ควรมีตัวอย่างดินในท้องถิ่นจากหลากหลายพื้นที่ เพื่อหาความ สอดคล้องของอิทธิพลของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการศึกษาต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัย แห่งชาติ (วช.) ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2565 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูง สำหรับ Thailand 4.0)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Phuntupan, N., Vardhanabhuti, B., Suthirawut, S. and Anurat, P.,2015. "Sandy Soil Improvement Using Biogenic Carbonate". 53. Kasetsart University Annual Conference, Bangkok (Thailand), 3-6 Feb 2015.
- [2] Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A. and Harkes, M.P., 2007, "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", *Geomicrobiology Journal*, Vol. 24, No. 5, pp. 417-423.
- [3] Sharma, M. and Satyam, N., 2021, "Strength and Durability of Biocemented Sands: Wetting-Drying Cycles, Ageing Effects, and Liquefaction Resistance", *Geoderma*, Vol. 402, p. 115359.
- [4] Do, J., Montoya, B.M. and Gabr, M.A.,2020. "Microbially Induced Carbonate Precipitation Process for Soil Improvement Adjacent to Model Pile by Innovative Delivery System". *Geo-Congress 2020: Biogeotechnics*, pp. 188-195.
- [5] Ghasemi, P. and Montoya, B.M.,2020. "Field Application of the Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation on a Coastal Sandy Slope". *Geo-Congress 2020: Biogeotechnics*, pp. 141-149.
- [6] Yan, W., Xiao, X. and Zhang, Y., 2017, "Complete Genome Sequence of *Lysinibacillus Sphaericus* Lmg 22257, a Strain with Ureolytic Activity Inducing Calcium Carbonate Precipitation", *Journal of biotechnology*, Vol. 246, pp. 33-35.
- [7] Sharma, M., Satyam, N. and Reddy, K.R., 2021, "Rock-Like Behavior of Biocemented Sand Treated under Non-Sterile Environment and Various Treatment Conditions", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 705-716.