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

**พงศกร ศิริสิงห์อำไพ[1,*] พรเกษม จงประดิษฐ์[1] ดุจเดือน วราโห[2] พีรดา พรหมมีเนตร[3] สุภาภรณ์ ชีวะธนรักษ์[4] และ สุรพงษ์ รัตนกุล[5]**

*[1] ศูนย์วิจัยด้านนวัตกรรมการก่อสร้างและระบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับอนาคต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
*[2] หลักสูตรวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
*[3] กลุ่มวิจัยวิศวกรรมชีวเคมีและชีววิทยาระบบ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
*[4]คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
*[5] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
**Corresponding author; E-mail address: Pongsakorn.siri@mail.kmutt.ac.th*

## บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์, การปรับปรุงคุณภาพดิน, จุลินทรีย์ท้องถิ่น, ทราย, ไลซินิบาซิลลัสสเฟียริคัส

## 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 และทรัพยากรในละแวกใกล้เคียงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อันเป็นผลทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา

สำหรับบางโครงสร้างที่มีข้อจำกัดในการปรับปรุงคุณภาพดิน ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากของโบราณสถานที่มักไม่ได้รับการอนุญาติให้มีการปรับปรุงด้วยวิธีการทางกล และทางเคมีในการก่อสร้าง เนื่องจากมีการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จำเป็นต้องหาทางเลือกอื่นๆ ในการปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก

การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยจุลินทรีย์ หรือที่เรียกว่ากระบวนการ MICP เป็นทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ประกอบกับวิธีการนี้ มีกระบวนการทำงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างโบราณสถานอีกด้วย เนื่องจากไม่มีการใช้เครื่องมือขุดเจาะที่มีการสั่นสะเทือนต่อโครงสร้าง ซึ่งกระบวนการนี้ก่อให้เกิดการพัฒนาคุณสมบัติวิศวกรรมของดินที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษา MICP ที่ผ่านมายังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ และการศึกษาเกือบทั้งหมดจะควบคุมสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างดินจะถูกอบแห้งก่อนทำการทดลองซึ่งไม่สามารถสะท้อนสภาพจริงในสนามหากเกิดการประยุกต์ใช้จริงที่ดินในสภาพธรรมชาติอันประกอบไปด้วยความชื้นในธรรมชาติและมีจุลินทรีย์ท้องถิ่นร่วมด้วย

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

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### *2.1 กระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดิน*

การตกตะกอนแคลไซต์ในดินโดยจุลินทรีย์ เกิดจากกระบวนการย่อยสลายยูเรียของแบคทีเรีย และก่อให้เกิดการตกตะกอนแคลไซต์ ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมผสานของอนุภาคเม็ดดิน โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังสมการดังนี้

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2 \quad (1)$$

$$2NH_3 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (2)$$

$$CO_2 + H_2O \rightarrow HCO^{3-} + H^+ \quad (3)$$

$$HCO_3^- + H^+ + 2OH \rightarrow CO_3^{2-} + 2H_2O \quad (4)$$

$$Ca_2^+ + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (5)$$

จากสมการการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตข้างต้น จะเห็นว่าจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอสจะย่อยสลายยูเรียไปเป็นแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อแอมโมเนียถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ซึ่งส่งผลในเกิดการชักนำในการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในดิน โดยการเชื่อมผสานระหว่างเม็ดดิน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการพัฒนากำลังของดิน

### *2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดิน*

1. ชนิดของแบคทีเรีย แบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์ยูรีเอส แต่ละชนิดจะมีการผลิตยูรีเอสในปริมาณที่ต่างกัน การผลิตยูรีเอสได้ปริมาณที่สูงจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในการเกิดตะกอนแคลไซต์ที่มากขึ้น [1]

2.ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรีย ปริมาณความเข้มข้นแบคทีเรียที่มาก จะส่งผลทำให้ปริมาณยูรีเอสในระบบการกระบวนการ MICP มีปริมาณสูงขึ้น

3. รูปร่างของแบคทีเรีย แบคทีเรียโดยทั่วไปมีขนาด 0.5-3 ไมโครเมตร แบคทีเรียที่มีขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคดิน 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 สามารถแยกวิธีในการทดสอบเป็นหลักๆ 4 วิธีคือ วิธีการไหลผ่านสารละลาย MICP ในตัวอย่างดิน [2], การใช้แรงดันในการอัดสารละลาย MICP ในตัวอย่างดิน [3], วิธีที่ปล่อยให้สารละลายซึมผ่านตัวอย่างดิน และทำการขังสารละลายไว้ในตัวอย่างดิน [4] และการสเปรย์ปริมาณสารละลายที่ผิวหน้าของตัวอย่างดิน [5]

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

### *3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน*

#### *3.1.1 ดินท้องถิ่น*



**รูปที่ 1** ขนาดคละของดินท้องถิ่น

เป็นดินที่เก็บมาจากบริเวณใกล้กำแพงโบราณสถานจังหวัดลพบุรี ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด 14.79505 ลองติจูด 100.61466 โดยมีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1

*3.1.3 ดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ*

เป็นการนำดินท้องถิ่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องออโต้เคลฟที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดันไอ 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*

การศึกษาจะใช้เชื้อ 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*

ในกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในเกิดแคลไซต์ ซึ่งขึ้นกับปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่ *L. sphaericus* ผลิตออกมา ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบ Urease test เพื่อหาช่วงอายุที่แบคทีเรียสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอสออกมาสูงสุด โดยควบคุมความเข้มข้นของเชื้อที่ $OD_{600}$ เท่ากับ 0.5 ทั้ง 2 สายพันธุ์แล้วนำช่วงเวลาดังกล่าวสำหรับกำหนดช่วงเวลาในการเลี้ยงเชื้อ

*3.3 การเตรียมสารละลายเคมี*

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

*3.4 การเตรียมตัวอย่างดิน*

เป็นการบรรจุดินลงในโมลด์ทรงกระบอกซึ่งทำจาก PVC สูง และเส้นผ่านสูงกลางเท่ากับ 10.2 และ 4.8 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทาวาสลีนให้ทั่วภายในโมลด์ PVC และตัดแผ่นพลาสติกใสขนาดพอดีใสภายในเพื่อให้ง่ายในการถอดตัวอย่าง

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

3. ปิดหัว-ท้ายโมลด์ด้วยกระดาษกรอง และพอรัสสโตน โดยพันด้วยเทปพันสายไฟ เพื่อให้สารละลายไหลทั่วหน้าตัดทรงกระบอก

4. ปิดหัว-ท้ายด้วยฝาปิด PVC ที่ทำการต่อสายยางสำหรับไหลผ่านสารละลาย แล้วทาด้วยซิลิโคนเพื่อป้องการการรั่วซึมของสารละลาย

*3.5 ขั้นตอนการทดสอบกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ*

1. ผสมสารละลายแบคทีเรีย กับสารละลายเคมีอัตราส่วนปริมาตร 1 ต่อ 1

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

3. หลังจากครบ 18 วัน ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าการทดสอบที่ 18 วันได้ผลลัพธ์ที่คุ้มค่าที่สุด นำตัวอย่างดินทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability), การทดสอบคลื่นดลอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic Pulse Velocity), การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test), การส่องอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุ (EDX)

**ตารางที่ 1** โปรแกรมการทอสอบ

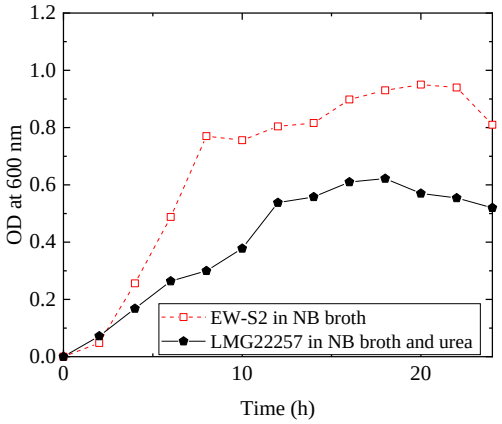
| การทดสอบ | ตารางแสดงโปรแกรมการทดสอบ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Before MICP | CL_S2 | LS_S2 | CL_GT | LS_GT |
| การซึมผ่านของน้ำ | 0 day | 18 days | 18 days | 18 days | 18 days |
| คลื่นดลอัลตร้าโซนิค | 0 day | 18 days | 18 days | 18 days | 18 days |
| กำลังรับแรงอัดแกนเดียว | 0 day | 18 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. วิเคราะห์ผลจากการทดสอบเพื่อหาอิทธิของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดิน และอิทธิพลของสายพันธุ์สายพันธุ์แบคทีเรียที่เลือกใช้

## 4. วิเคราะห์ผลวิจัย

*4.1 ผลการเจริญเติบโตของ Lysinibacillus sphaericus*

การศึกษาจะใช้เชื้อ 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 นอกจากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์แล้วได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2




**รูปที่ 2** การเจริญเติบโตของ *L. sphaericus* ในแต่ละช่วงอายุ

*4.2 ผลจากการศึกษาช่วงอายุที่เหมาะสมสำหรับในการเตรียมสารละลายแบคทีเรีย*

จากผลการทดสอบหาปริมาณยูรีเอสสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา พบว่าความเข้มของฟีนอลเรดที่เข้มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการผลิตยูรีเอสของแบคทีเรียที่สูงขึ้น สำหรับสายพันธุ์ LMG22257 พบว่าการผลิตยูรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12-20 ชั่วโมง แต่ในสายพันธุ์ EW-S2 พบว่าการผลิตยูรีเอสสูงสุดจะอยู่ในช่วงอายุ 12 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากการทำการวิเคราะห์จึงเลือกใช้ช่วงเวลาที่ 12 ชั่วโมงในการเลี้ยงแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ในตู้ปั่นเหวี่ยง เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเตรียมสารละลายแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ได้ในช่วงเวลาเดียวกัน และกำหนดช่วงเวลาในกระบวนการทดสอบทั้งหมดได้ในเวลาเดียวกัน การปรับปรุงจึงเป็นวงรอบละ 12 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งสิ้น 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*

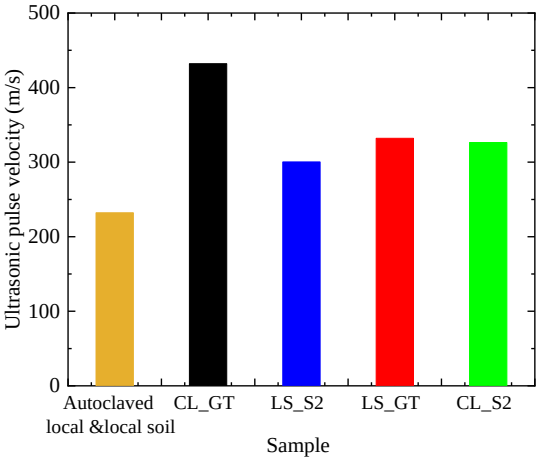
*4.3.1 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ*

จากตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่การทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า ค่าการซึมผ่านน้ำของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อลดลงมากกว่าดินท้องถิ่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินที่ฆ่าเชื้อเป็นตัวอย่างมีที่มากกว่าดินท้องถิ่น นอกจากนั้นแล้วเมื่อสังเกตที่ดินตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดลงกว่า EW-S2 ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของสายพันธุ์ LMG22257 ที่สูงกว่า EW-S2

**ตารางที่ 3** ค่าการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างทรายก่อนและหลังปรับปรุง

| ตัวอย่าง | ค่าการซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที) | |
|---|---|---|
| | Autoclaved local soil | Local soil |
| Before MICP | 2.612x10-4 | |
| EW-S2 | 3.111x10-5 | 6.249x10-5 |
| LMG22257 | 8.502x10-6 | 2.720x10-5 |

*4.3.2 การทดสอบคลื่นคลอัลตร้าโซนิคของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ*




**รูปที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นคลก่อน และหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

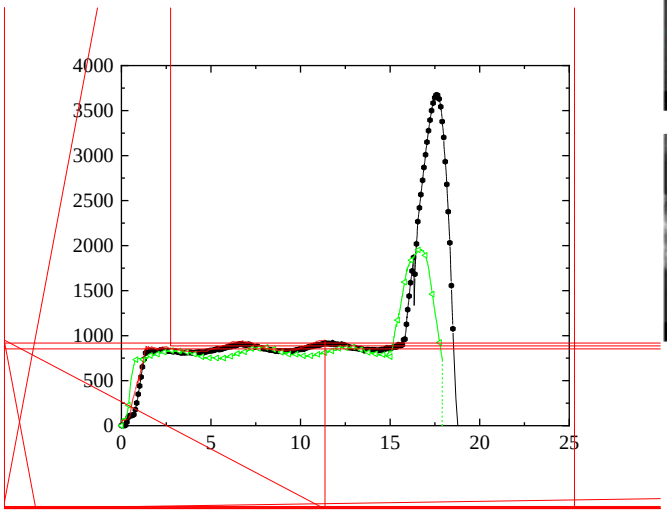
จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่การทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า ค่าความเร็วคลื่นคลผ่านดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อที่ปรับปรุงมีค่าสูงกว่าดินท้องถิ่นปรับปรุง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากการทดสอบกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ดินที่ฆ่าเชื้อเป็นตัวอย่างที่มีความแข็งแรงของตัวอย่างที่สูงกว่าดินท้องถิ่น นอกจากนั้นแล้วเมื่อสังเกตที่ดินตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่าความเร็วคลื่นคลสูงกว่า EW-S2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของสายพันธุ์ LMG22257 มีสูงกว่า EW-S2

*4.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินท้องถิ่นและดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ*

จากตารางที่ 4 พบว่าการทดสอบสายพันธุ์เดียวกัน ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุดของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อมีค่าสูงกว่าดินท้องถิ่น และที่ดิน

ตัวอย่างเดียวกัน พบว่า การทดสอบด้วย LMG22257 ให้ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุดมีค่าสูงกว่า EW-S2

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างทดสอบระหว่างการรับแรงในแนวแกน เมื่อเทียบกับตัวอย่างไม่ปรับปรุง จะเห็นได้ว่าการรับแรงของดินหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์นั้นจะเพิ่มขึ้นที่ค่าความเครียดน้อยกว่าของดินที่ไม่ปรับปรุงแสดงว่าตัวอย่างดินปรับปรุงมีความแกร่งกว่า เมื่อรับความเค้นเท่ากับค่าสูงสุดของดินที่ไม่ปรับปรุงตัวอย่างดินปรับปรุงมีค่าความเค้นคงที่ในขณะที่ความเครียดดำเนินต่อไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของการปรับปรุงในตัวอย่างดินหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ จึงทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของตัวอย่างมีลักษณะดังกล่าว จนค่าความเครียดในแนวแกนมีค่าอยู่ในช่วง 18-21 % ค่าความเค้นจึงเพิ่มอีกครั้งไปสู่ค่าสูงสุดด้วยการเพิ่มขึ้นของความเครียดอีกเพียงเล็กน้อย ก่อนตกลงอย่างรวดเร็ว



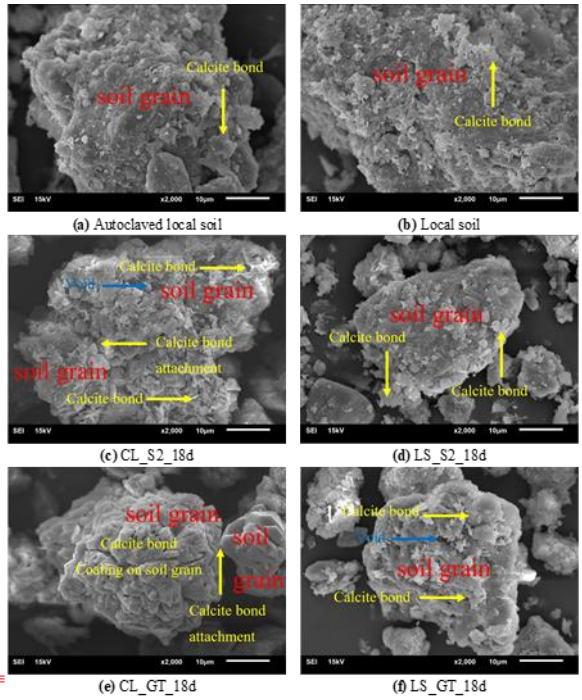

**รูปที่ 4** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของตัวอย่างทรายควบคุมหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

**ตารางที่ 4** กำลังการรับน้ำหนักสูงสุดก่อน และหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ของตัวอย่างดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อ

| ตัวอย่าง | ค่ากำลังการรับน้ำหนักสูงสุด (กิโลปาสคาล) | |
|---|---|---|
| | 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 จะสังเกตได้ว่าดินท้องถิ่น และดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อเริ่มต้นมีอนุภาคแคลไซต์เริ่มต้นอยู่แล้วเล็กน้อย แต่หลังจากกระบวนตกตะกอนแคลไซต์พบว่ามีอนุภาคแคลไซต์เพิ่มมากขึ้น

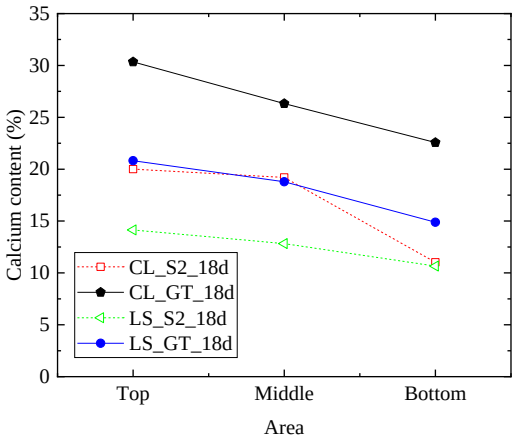



**รูปที่ 5** ผลการส่องอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อนและหลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

*4.4.5 การวิเคราะห์ธาตุ (EDX)*

**ตารางที่ 5** ปริมาณแคลไซต์แต่ส่วนของตัวอย่างดินท้องถิ่น 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** ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมแต่ส่วนของตัวอย่างดินท้องถิ่นและดินท้องถิ่นควบคุม หลังกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่าปริมาณแคลเซียมเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณส่วนบนของตัวอย่าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 สายพันธุ์จะพบว่า LMG22257 มีแนวโน้มทำให้ปริมาณแคลไซต์เกิดขึ้นสูงกว่า EW-S2 และที่สายพันธุ์ที่ใช้ในการทดสอบเดียวกัน พบว่าตัวอย่างดินท้องดินฆ่าเชื้อมีปริมาณแคลเซียมที่สูงกว่าดินท้องถิ่น

## 5. สรุปผล

*5.1 สรุป*

ผลจากอิทธิพลของจุลินทรีย์ท้องถิ่นต่อกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ในดินมีการตรวจสอบในการศึกษานี้ ดินสำหรับการรักษา MICP ในการศึกษาถูกนำมาจากท้องถิ่นและเตรียมในสองเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1) ดินถูกฆ่าเชื้อโดยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อและ 2) ดินธรรมชาติที่มีจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดิน ถูกทดสอบด้วย Lysinibacillus sphaericus 2 สายพันธุ์คือ EW-S2 และ LMG22257 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ MICP การศึกษาเริ่มต้นด้วยการประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบเบื้องต้นโดยใช้ทราย หลังจากนั้นทดสอบการซึมผ่านน้ำ และกำลังรับแรงอัด เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม หลังจากนั้นการทดสอบ SEM และ EDS ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการเกิดขึ้นของผลึกแคลไซต์และปริมาณแคลไซต์หลังจากกระบวนการ MICP ต่อไปนี้เป็นข้อสรุปของการศึกษา :

1. LMG2257 มีประสิทธิภาพในการผลิตแคลไซต์มากกว่า EW-S2 ซึ่งปริมาณแคลไซต์สูงสุดคือ 30% อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาที่ 18 วัน EW-S2 มีผลิตภาพที่มีนัยยะสำคัญที่จะใช้งานได้ และสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ค่ากำลังรับแรงเพิ่มขึ้นและค่าความซึมผ่านลดลงอย่างสอดคล้องกับปริมาณแคลไซต์เป็นอย่างดี

2. ประสิทธิภาพในการเกิดแคลไซต์และสมบัติของดินท้องถิ่นฆ่าเชื้อสูงกว่าของดินท้องถิ่น

โดยสรุปแล้วการศึกษานี้บ่งชี้ว่าการมีอยู่ของจุลินทรีย์ในท้องถิ่นมีผลทำให้ประสิทธิภาพ MICP ลดลง การดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ในท้องถิ่นจำเป็นต้องพิจารณาในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในสภาพจริง นอกจากนี้สายพันธุ์ของแบคทีเรียมีผลต่อการผลิตยูเรียเอส และการตกตะกอนแคลไซต์ อย่างไรก็ตาม ควรมีตัวอย่างดินในท้องถิ่นจากหลากหลายพื้นที่ เพื่อหาความสอดคล้องของอิทธิพลของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการศึกษาต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้ทุนวิจัยพื้นฐานปี 2565 (โครงการ การก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ 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