ผลกระทบของไอออนแอมโมเนียมต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยผงแคลไซต์จากกระบวนการ MICP

Effect of Ammonium Ions on the Engineering Properties of Clayey Soil Improved with Calcite Powder Derived from the MICP Process

รุจิรา พลไตร[1], ธวัชชัย สัพโส[1], อมรเดช นวลมณี[1] และ ณัฐชัย โปร่งมณี[1*]

Rujira Pholtrai, Thawatchai Suppaso, Amorndech Noulmanee and Nutthachai Prongmanee

[1] คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เลขที่ 59/5 หมู่ 1 ถนน วปรอ. 366 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร รหัสไปรษณีย์ 47000 ประเทศไทย

[1] Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, 59/5, Moo1, Chiangkrua, Muang Sakon Nakhon, 47000, Sakon Nakhon, Thailand

** E-mail: Nutthachai.p@ku.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ ($CaCO_3$) ที่เหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์ (MICP) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดิน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและกำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบเชิงลบต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของไอออน NH_4^+ จากกระบวนการ MICP ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ของดินเหนียว โดยทำการเติม NH_4Cl ลงในดินเพื่อจำลองผลกระทบที่อาจเกิดจากกระบวนการ MICP ผลการศึกษาพบว่า ดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วย $CaCO_3$ อย่างเดียว มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาค $CaCO_3$ ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดินในช่วงต้นและมีการพัฒนากำลังที่อายุบ่มมากขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาว ในขณะที่ตัวอย่างดินที่มี NH_4^+ ปะปน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจาก NH_4^+ มีการกักเก็บความชื้นในมวลดินส่งผลให้กำลังรับแรงอัดไม่พัฒนาตามอายุบ่ม ส่วนค่า k ที่อัตราส่วนช่องว่าง (e) เท่ากัน พบว่าตัวอย่างดินที่มี NH_4^+ ปะปนมีค่า k ต่ำกว่าดินที่ไม่มี NH_4^+ อย่างชัดเจน เนื่องจากไอออน NH_4^+ ส่งผลให้มวลดินบวมน้ำและยากต่อการไหลผ่านของน้ำ ในทางกลับกันดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วย $CaCO_3$ มีค่า k สูงกว่าดินที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากอนุภาคของแคลไซต์มีขนาดใหญ่กว่าดินเหนียวโดยทั่วไปส่งผลให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้น ผลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการควบคุมหรือกำจัดไอออนแอมโมเนียมในกระบวนการ MICP มีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน เหมาะสำหรับงานวิศวกรรมที่ต้องการคุณสมบัติทางกลที่ดีและความสามารถในการระบายน้ำที่เหมาะสม

คำสำคัญ: แอมโมเนียม การปรับปรุงเสถียรภาพของดิน กระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ที่เหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์ ดินเหนียว

Received: May 22, 2025, Revised: June 20, 2025, Accepted: June 24, 2025

Abstract

Currently, improving the quality of clay soils to enhance their load-bearing capacity and reduce environmental impact is a widely discussed issue. Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), which facilitates the formation of calcium carbonate ($CaCO_3$), is considered one of the most promising and environmentally friendly techniques for enhancing the engineering properties of soil. However, this process often produces ammonium ions (NH_4^+) as a byproduct, which may adversely affect soil behavior. This study aims to investigate the influence of NH_4^+ on the unconfined compressive strength (q_u) and hydraulic conductivity (k) of clay soils by artificially introducing NH_4Cl to simulate the potential impact of ammonium generated in the MICP process. The results show that clay specimens treated solely with $CaCO_3$ exhibit a significant increase in q_u, as the $CaCO_3$ particles initially fill the voids between soil particles and further develop strength over the curing time due to long-term pozzolanic reactions. In contrast, specimens containing NH_4^+ showed a reduction in compressive strength, attributed to the moisture-retaining effect of NH_4^+ in the soil matrix, which inhibits strength development during curing. At the same void ratio (e), the hydraulic conductivity of NH_4^+ contaminated specimens was markedly lower than that of untreated clay. This is likely due to the swelling behavior induced by the NH_4^+ ions, which restricts the flow of water. Conversely, $CaCO_3$-treated soils exhibited higher k values than untreated clay, as the relatively large calcite particles enhance water flow pathways. These findings underscore the importance of managing or eliminating ammonium ions in MICP-related applications to enhance the performance and sustainability of clay soil treatment, particularly for engineering projects that require both mechanical strength and adequate permeability.

Keywords: Ammonium, Soil stabilization, Microbially induced calcite precipitation (MICP), Clayey soil

1. บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพดินในงานวิศวกรรมปฐพีมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับดินฐานรากที่มีปัญหาโดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียว (Prongmanee and Noulmanee, 2020) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมหลายประการ เช่น ปริมาณความชื้นในมวลดินสูง กำลังรับแรงเฉือนต่ำ และค่าการยุบตัวสูง ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างที่ก่อสร้างบนดินประเภทนี้ เช่น การทรุดตัว การแตกร้าวของโครงสร้าง หรือความเสียหายที่รุนแรงในระยะยาว (Barman & Dash, 2022; Khayat & Nasiri, 2024; Prongmanee & Noulmanee, 2020) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว มีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงดินที่มีประสิทธิภาพ เช่น การผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพของดิน อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตซีเมนต์ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมาก คิดเป็นประมาณร้อยละ 8 ของการปล่อย CO_2 ทั่วโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Prongmanee et al., 2023) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา กระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ที่เหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์ (Microbially induced calcite precipitation, MICP) ได้รับความสนใจในแวดวงวิศวกรรมปฐพี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของดินเหนียว (DeJong et al., 2010; Ismail Mostafa et al., 2002; Mujah et al., 2017; Osinubi et al., 2019; Osinubi et al., 2018; Osinubi et al., 2020; Prongmanee et al., 2023) โดย

อาศัยปฏิกิริยาทางชีวเคมีจากแบคทีเรียเฉพาะกลุ่ม เช่น Sporosarcina *pasteurii* ซึ่งสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอส เพื่อเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ยูเรีย (NH_2CONH_2) ตามสมการ (1)

$$NH_2CONH_2 + 3H_2O \longrightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} + 2OH^- \quad (1)$$

ไอออนคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่มีอยู่ในระบบ หรือเติมเข้าไปภายหลัง เพื่อเกิดการตกผลึกเป็นแคลไซต์ ($CaCO_3$) ตามสมการ (2)

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

การตกตะกอนของแคลไซต์ช่วยเสริมสร้างโครงสร้างของดิน เพิ่มความแข็งแรง ลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และลดความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดิน โดยเฉพาะดินเม็ดหยาบ ได้แก่ ทราย (Prongmanee et al., 2023) อย่างไรก็ตาม กระบวนการ MICP ก่อให้เกิดไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งอาจมีผลกระทบเชิงลบต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินโดยเฉพาะดินเม็ดละเอียดที่อ่อนไหวต่อสารเคมี เช่นดินเหนียว จากรายงานของ Prongmanee et al. (2023) และ Pholtrai (2025) พบว่า NH_4^+ มีผลทำให้ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) และขีดจำกัดพลาสติก (PL) ของดินเหนียวที่ผ่านการปรับปรุงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินที่สัมพันธ์กับการดูดซับน้ำและพฤติกรรมทางพลาสติก อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของ NH_4^+ ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น ๆ ที่สำคัญ เช่น กำลังรับแรงอัดประลัย (q_u) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) อย่างละเอียด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของ NH4+ ต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยเทคนิค MICP โดยใช้การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดและการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ เพื่อวิเคราะห์ค่าความสามารถในการซึมผ่านน้ำ (k) ซึ่งผลการวิจัยจะช่วยเพิ่มความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนแปลงทางวิศวกรรมของดิน และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาวิธีควบคุมหรือกำจัด NH_4^+ เพื่อส่งเสริมการประยุกต์ใช้เทคนิค MICP อย่างยั่งยืนในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วัสดุและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินเหนียวที่เก็บจากพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร ประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบแปรสภาพด้วยสว่านมือ จากระดับความลึกประมาณ 1–2 เมตรจากผิวดินตัวอย่างดินถูกทำให้แห้งด้วยอากาศ (air-dried) และนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) โดยผลการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ 1 ดินตัวอย่างจัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ผงแคลไซต์ที่ใช้ในการทดลองได้จากกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ที่เหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์ (Microbially induced calcite precipitation, MICP) โดยใช้แบคทีเรีย Sporosarcina *pasteurii* ซึ่งสามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอส (urease) เพื่อเร่งปฏิกิริยาระหว่างสารละลายยูเรียและแคลเซียมคลอไรด์ให้เกิดการตกตะกอนของแคลไซต์ ($CaCO_3$) ภายใต้สภาวะควบคุม โดยรายงานของ Prongmanee et al. (2023) เพื่อศึกษาผลกระทบของแอมโมเนียม (NH_4^+) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ MICP ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ได้ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นตัวแทนในการเติมแอมโมเนียมลงในดินเพื่อจำลองผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในภาคสนาม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

คุณสมบัติ	ค่า
ปริมาณกรวด (ร้อยละ)	5
ปริมาณทราย (ร้อยละ)	33
ปริมาณดินเม็ดละเอียด (ร้อยละ)	62
ขีดจำกัดเหลว, LL (ร้อยละ)	43
ขีดจำกัดพลาสติก, PL (ร้อยละ)	20
ดัชนีพลาสติก, PI (ร้อยละ)	23
ความถ่วงจำเพาะ	2.91
จำแนกดิน	CL

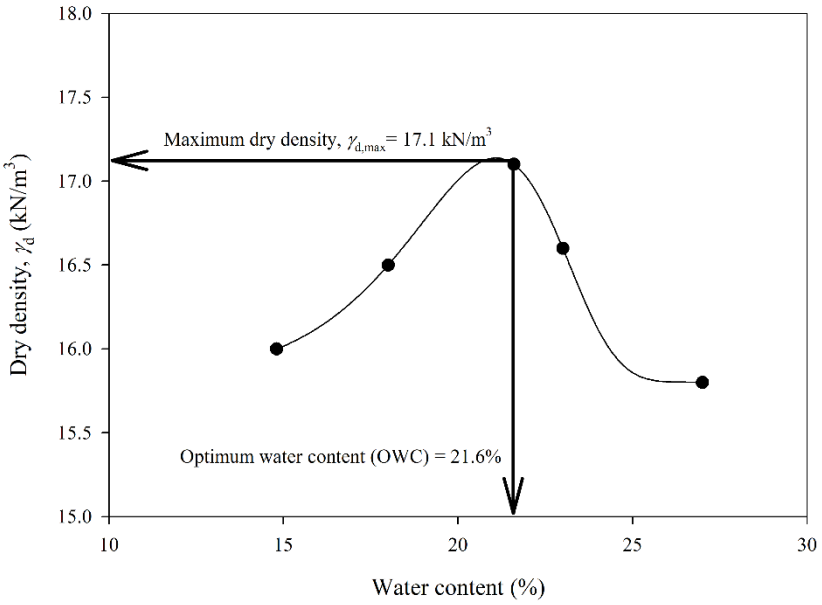
2.2 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิค MICP โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และปริมาณของแคลไซต์ ($CaCO_3$) ที่เกิดจากกระบวนการ MICP ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียว การทดสอบแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 5 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 (Control) ดินเหนียวไม่ปรับปรุง กรณีที่ 2 ดินเหนียวผสมกับผงแคลไซต์ ($CaCO_3$) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของดินแห้ง กรณีที่ 3 ดินเหนียวผสมกับผงแคลไซต์ ร้อยละ 4 กรณีที่ 4 ดินเหนียวผสมกับผงแคลไซต์ ร้อยละ 8 กรณีที่ 5 ดินเหนียวผสมกับผงแคลไซต์ ร้อยละ 4 และเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ตัวอย่างดินในแต่ละกรณีถูกเตรียมโดยอัดลงในแบบเหล็กรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และความสูง 100 มิลลิเมตร โดยควบคุมความหนาแน่นให้สอดคล้องกับ ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, $\gamma_{d,\,max}$) และความชื้นให้ตรงกับ ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) ที่ได้จากผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Compaction Test) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1 สำหรับปริมาณของแคลไซต์ ($CaCO_3$) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 2–8 โดยน้ำหนักของดินแห้ง เป็นค่าที่อ้างอิงจากขอบเขตการตกตะกอนของ $CaCO_3$ ที่สามารถเกิดขึ้นในกระบวนการ MICP จากรายงานของ Prongmanee et al. (2023) โดยเฉพาะในดินละเอียดซึ่งมีพลังยึดเหนี่ยวพื้นผิวสูง ส่วนความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่ใช้คือ 4 โมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่อาจพบได้จากการย่อยสลายยูเรียโดยแบคทีเรียในกระบวนการ MICP ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของยูเรียเริ่มต้นสูง เช่นในงานทดลองที่ควบคุมสภาวะการเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดผลของ NH_4^+ ที่ชัดเจนในการวิเคราะห์พฤติกรรมของดิน

ก่อนการอัดตัวอย่างลงในแบบเหล็ก ดินตัวอย่างในแต่ละกรณีถูกเตรียมโดยการชั่งดินแห้งตามน้ำหนักที่กำหนด แล้วผสมกับผงแคลไซต์ ($CaCO_3$) ให้เข้ากันอย่างทั่วถึงในภาชนะสะอาด จากนั้นเติมน้ำในปริมาณที่ตรงกับค่า OWC โดยค่อย ๆ เติมและคลุกเคล้าให้สม่ำเสมอจนได้เนื้อดินที่มีความชื้นกระจายตัวดี ในกรณีที่เติมสารละลาย NH_4Cl (กรณีที่ 5) ใช้น้ำที่เตรียมเป็นสารละลาย NH_4Cl ความเข้มข้น 4 โมลาร์ แทนน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ความชื้นเป้าหมายเดียวกัน จากนั้นปิดฝาภาชนะและหมักดินไว้ประมาณ 12–24 ชั่วโมงก่อนนำมาอัดลงแบบ เพื่อให้เกิดการกระจายความชื้นที่สมดุลทั่วเนื้อดิน

หลังจากอัดตัวอย่างลงแบบเหล็กแล้ว ดินจะถูกดันออกจากแบบโดยใช้พลาสติกห่อหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ แล้วนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 3 7 14 28 และ 56 วัน เพื่อศึกษาพัฒนาการของค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงเวลาแตกต่างกัน เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างดินจะถูกนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดตามมาตรฐาน ASTM D2166/D2166M-16 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแบบช้า (Strain-Controlled

Compression Machine) ที่มีอัตราการเพิ่มความเครียดคงที่ประมาณ 1% ต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติจากนั้นบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (q_u)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของดินเหนียวบดอัด

2.3 ทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำด้วยวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability, k) ของดินเหนียวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิค MICP โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการอัดคายน้ำ (Consolidation Test) ตามมาตรฐาน ASTM D2435 และวิเคราะห์ค่าดังกล่าวตามหลักสมการของ Taylor (1984) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถคำนวณ k ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, c_v) ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (m_v) และหน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w) โดยใช้สมการ

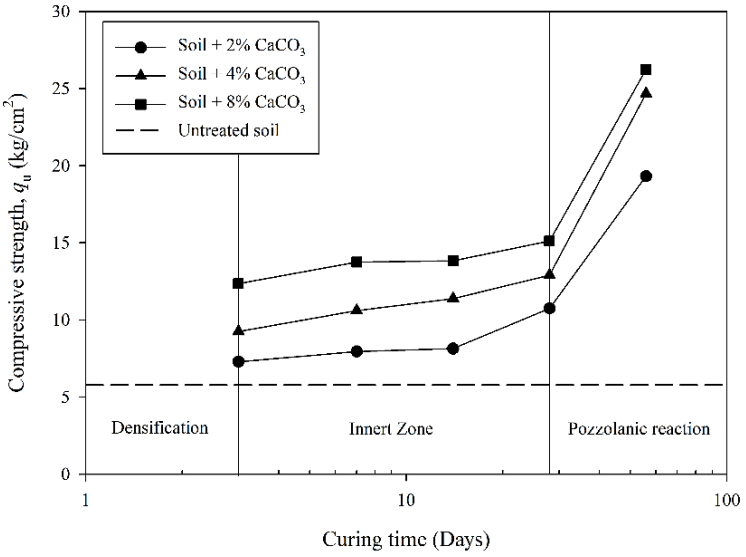
$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \tag{3}$$

วิธีการทดสอบดำเนินการตามแนวทางที่ระบุในงานวิจัยของ Prongmanee, et al. (2023) และเพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของแอมโมเนียม (NH_4^+) และแคลไซต์ ($CaCO_3$) ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดินเหนียว การทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ดังนี้ กรณีที่ 1 (Control) ดินเหนียวไม่ปรับปรุง กรณีที่ 2 ดินเหนียวผสมกับผง $CaCO_3$ ในอัตราส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของดินแห้ง กรณีที่ 3 ดินเหนียวผสมกับผง $CaCO_3$ ร้อยละ 4 และเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่ความเข้มข้น 4 M กรณีที่ 4 ดินเหนียวที่เติมเฉพาะสารละลาย NH_4Cl ที่ความเข้มข้น 4 M โดยไม่เติม $CaCO_3$ ตัวอย่างดินแต่ละกรณีถูกเตรียมให้อยู่ในสภาพแห้งและชื้นพอดี แล้วอัดลงในวงแหวนโลหะ (Consolidation Ring) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 6 เซนติเมตร และความสูงประมาณ 2 เซนติเมตร เพื่อเตรียมสำหรับการทดสอบ Consolidation โดยใช้เครื่อง Consolidation Test แบบโหลดเป็นขั้น (Incremental Loading) ในช่วง Pre-consolidation ได้ใช้แรงกดเริ่มต้น 20 กิโลปาสคาล และปล่อยให้อยู่ภายใต้แรงดังกล่าวเป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อให้เกิดการปรับสภาพเริ่มต้นของดินก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดตัวคายน้ำ ผลการทดสอบในแต่ละกรณีจะนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า k โดยตัวอย่างดินที่ใช้ผ่านตะแกรงหมายเลข 200 โดยการ

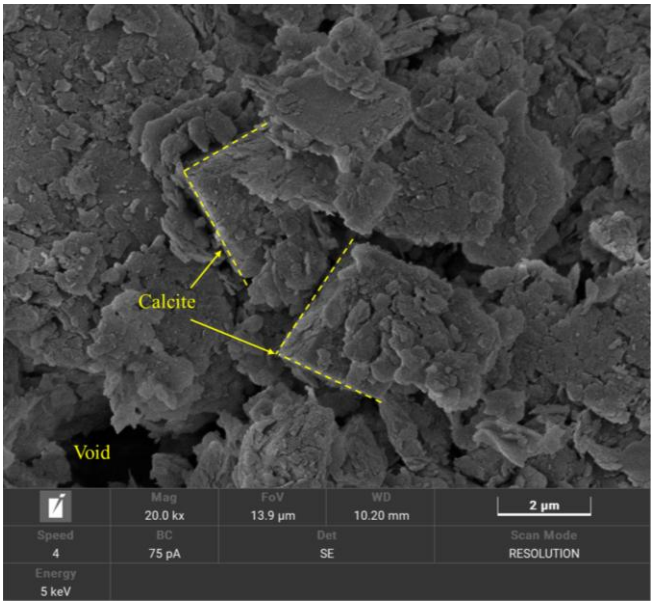
ทดสอบควบคุมปริมาณ $CaCO_3$ ที่ร้อยละ 4 ตลอดการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ได้อย่างชัดเจน โดยลดความแปรผันจากปริมาณของแคลไซต์

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ของตัวอย่างดินเหนียวที่ผสม $CaCO_3$ ในปริมาณต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 2 4 และ 8 โดยน้ำหนักของดินแห้ง เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุง (Untreated soil) พบว่าการเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกช่วงเวลาการบ่ม เนื่องจากอนุภาค $CaCO_3$ ที่เติมเข้าไปมีบทบาทในการเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้โครงสร้างของดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน (รูปที่ 3) โดยรูปถ่ายจาก SEM ดังแสดงในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นชัดว่าอนุภาค $CaCO_3$ เข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้ดินบดอัดแน่นขึ้นรับกำลังอัดได้ดีขึ้น การเติมไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินลดลง ขณะที่การเติมแคลไซต์ ($CaCO_3$) ช่วยเพิ่มความเป็นด่างของดิน ซึ่งทั้งสองปัจจัยมีผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดิน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pholtrai et al. (2025) ที่รายงานว่าการเปลี่ยนแปลง pH ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของดินที่ผ่านการปรับปรุง

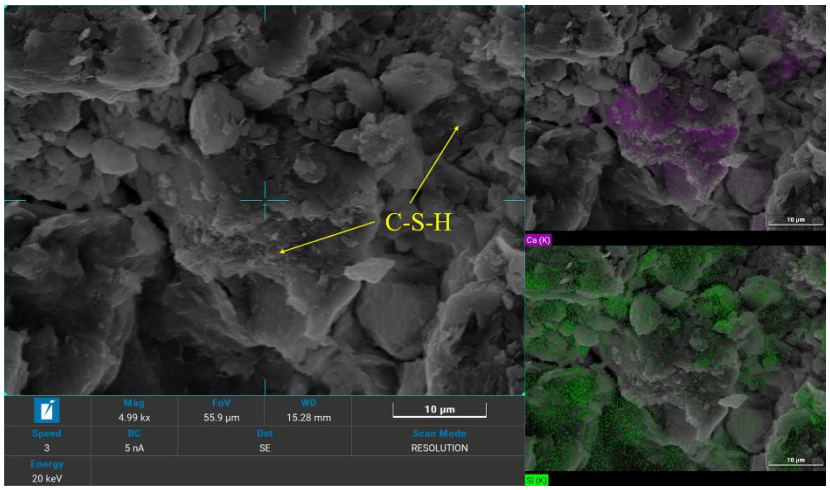


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของดินที่ผสม $CaCO_3$ ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามระยะเวลาการบ่ม

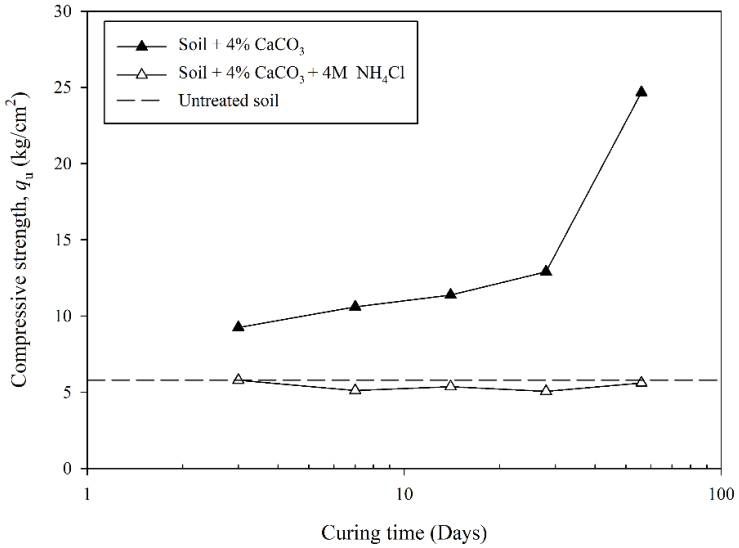


รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินผสม $CaCO_3$ ที่อายุบ่ม 3 วัน

นอกจากนี้ จากผลการศึกษายังพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาค่อนข้างช้าในช่วงระยะแรกของการบ่ม จนถึงอายุ 28 วัน หลังจากนั้นพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 28 ถึง 56 วัน สาเหตุเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ที่เกิดขึ้นในดินอย่างต่อเนื่อง โดยซิลิกา (SiO_2) ในดินเหนียวเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จากแคลไซต์ที่เติมเข้าไป ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ซึ่งมีลักษณะเป็นสารยึดเกาะที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของดินอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4) จากการวิเคราะห์ทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และ EDX mapping (รูปที่ 4) พบว่าบริเวณที่มีแคลเซียม (Ca) และซิลิกอน (Si) ทับซ้อนกัน (พื้นที่สีเขียวและม่วง) บ่งชี้ถึงตำแหน่งการเกิดสาร C-S-H ซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นจริงภายในโครงสร้างดินเหนียว ผลการศึกษานี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prongmanee et al. (2023) ที่ยืนยันว่าการเติมแคลไซต์สามารถเสริมสร้างคุณสมบัติทางกลของดินเหนียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกำลังรับแรงอัดในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ



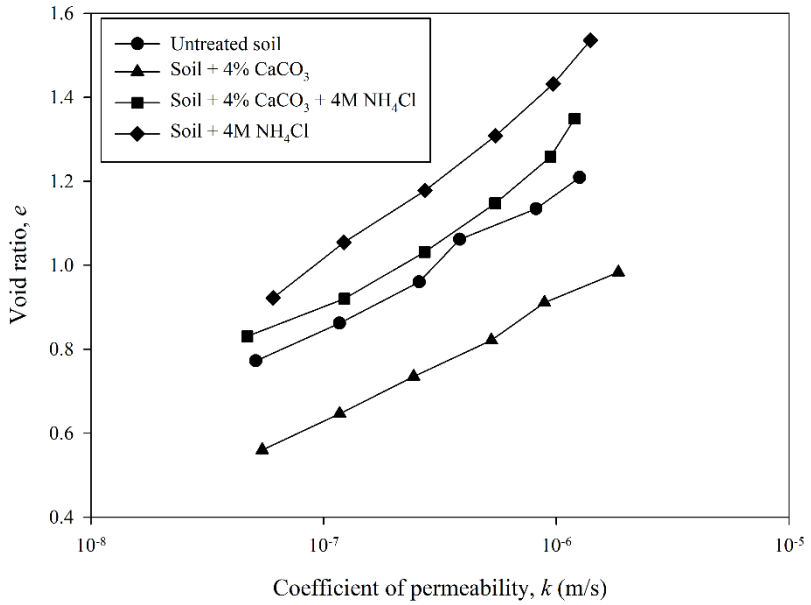
รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX Mapping ของดินผสม $CaCO_3$ หลังบ่ม 56 วัน แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน



รูปที่ 5 อิทธิพลของ NH_4^+ ต่อกำลังรับแรงอัดของดินผสม $CaCO_3$ เปรียบเทียบระหว่างดินที่ผสม $CaCO_3$ ร้อยละ 4 อย่างเดียวกับดินที่ผสม CaCO3 ร้อยละ 4 ร่วมกับสารละลาย NH_4Cl ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ตามระยะเวลาการบ่ม

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ของดินเหนียวที่ผสม $CaCO_3$ ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของดินแห้ง ระหว่างตัวอย่างที่มีและไม่มีการเติม NH_4^+ ที่ความเข้มข้น NH_4Cl 4 โมลาร์ พบว่าในทุกช่วงระยะเวลาการบ่ม ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินที่มี NH_4^+ มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มี NH_4^+ อย่างชัดเจน ผลกระทบเชิงลบนี้อาจอธิบายได้จากปรากฏการณ์การบวมตัวเนื่องจากแรงออสโมซิส (Osmotic swelling) อันเกิดจาก NH_4^+ ที่เข้าไปสะสมในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ส่งผลให้เกิดการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างดินมากขึ้น นำไปสู่การบวมตัวที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความแข็งแรงทางกลของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการจัดการหรือกำจัดไอออน NH_4^+ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ MICP เพื่อป้องกันผลกระทบเชิงลบดังกล่าวและเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวในเชิงวิศวกรรมต่อไป

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, *e*) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability, *k*) ของตัวอย่างดินเหนียวในแต่ละกรณีศึกษา จากผลการทดสอบพบว่า ณ ค่า *e* ที่เท่ากัน ดินที่ปรับปรุงด้วย $CaCO_3$ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงที่สุด เนื่องจากอนุภาคแคลไซต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคดินเหนียวทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 3 ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีช่องว่างภายในขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ง่ายมากขึ้น ในทางกลับกัน ตัวอย่างดินที่มีไอออน NH_4^+ ได้แก่ ตัวอย่างดินที่ผสมสารละลาย NH_4Cl 4 M ทั้งแบบผสมและไม่ผสม $CaCO_3$ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติของ NH_4^+ ที่มีแนวโน้มในการดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างดินผ่านแรงออสโมซิส ส่งผลให้เกิดการบวมตัวของดินที่เพิ่มมากขึ้น เกิดการอุดตันของช่องว่าง และทำให้ลดความสามารถในการระบายน้ำออกจากดิน ผลการทดลองนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านกำลังรับแรงอัดที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ (รูปที่ 5) ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมและการจัดการปริมาณ NH_4^+ ที่เกิดจากกระบวนการ MICP เพื่อให้ได้ดินที่มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม ทั้งในแง่ความแข็งแรงและประสิทธิภาพในการระบายน้ำ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เทคนิค MICP อย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสูงสุดในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (*k*) เทียบกับอัตราส่วนช่องว่าง (*e*) ของตัวอย่างดินเหนียวในแต่ละกรณีศึกษา

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการตกตะกอนแคลไซต์ที่เหนี่ยวนำโดยจุลินทรีย์ (MICP) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว โดยเน้นศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (*k*) ของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วย $CaCO_3$ สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1 การเติม $CaCO_3$ ช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดประลัยของดินเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้นชัดเจนตามปริมาณ $CaCO_3$ ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคแคลไซต์ทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน นอกจากนี้ ในระยะยาว (หลัง 28 วัน) ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมไอออนจาก $CaCO_3$ กับซิลิกาที่อยู่ในดินเหนียว

4.2 ตัวอย่างดินเหนียวที่มีไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) ปะปนอยู่ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่มี NH_4^+ อย่างชัดเจน เนื่องจาก NH_4^+ มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างดินผ่านแรงออสโมซิส (osmotic swelling) ทำให้เกิดการบวมตัว ส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงทางกลลดลงและไม่มีการพัฒนากำลังที่ชัดเจนแม้เพิ่มระยะเวลาการบ่ม

4.3 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (*k*) พบว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วย $CaCO_3$ มีค่า *k* สูงกว่าดินที่ไม่ได้ปรับปรุงเล็กน้อย เนื่องจากขนาดของอนุภาคแคลไซต์ที่ใหญ่กว่าดินเหนียวทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ ซึ่งช่วยให้น้ำไหลผ่านได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ดินที่มี NH_4^+ ปะปนอยู่กลับมีค่า *k* ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก NH_4^+ ส่งผลให้ดินบวมและกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างดิน ลดพื้นที่ช่องทางการไหลของน้ำ ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.4 ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการควบคุมหรือกำจัดไอออนแอมโมเนียมที่เกิดขึ้นในกระบวนการ MICP เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้งานปรับปรุงคุณภาพดิน โดยเฉพาะดินเหนียว

และในงานที่ต้องการคุณสมบัติทางกลที่ดีและมีประสิทธิภาพในการระบายน้ำที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้การประยุกต์ใช้เทคนิค MICP ในงานวิศวกรรมมีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14**(4), 1319-1342. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. **Ecological Engineering, 36**(2), 197-210. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029

Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., & Randolph, M. F. (2002). Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128**(6), 520–529. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(520)

Khayat, N., & Nasiri, H. (2024). Study of Strength Characteristics and Micro-structure Analysis of Soil Stabilized with Wastewater and Polymer. **International Journal of Pavement Research and Technology, 17**(5), 1213-1224. https://doi.org/10.1007/s42947-023-00296-w

Mujah, D., Shahin, M. A., & Cheng, L. (2016). State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. **Geomicrobiology Journal, 34**(6), 524–537. https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1225866

Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., Gadzama, E. W., & Ijimdiya, T. S. (2019). Plasticity characteristics of lateritic soil treated with Sporosarcina pasteurii in microbial-induced calcite precipitation application. **SN Applied Sciences, 1**(8), Article 829. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0868-7

Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., Ijimdiya, T. S., Sani, J. E., & Yakubu, S. E. (2018). Volumetric shrinkage of compacted lateritic soil treated with Bacillus pumilus. In A. Farid & H. Chen (Eds.), **Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Geoenvironment and Geohazard** (pp. 315–324). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0128-5_36

Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., Ijimdiya, T. S., Yakubu, S. E., Gadzama, E. W., Sani, J. E., & Yohanna, P. (2020). Review of the use of microorganisms in geotechnical engineering applications. **SN Applied Sciences, 2**(2), 207. https://doi.org/10.1007/s42452-020-1974-2

Prongmanee, N., Horpibulsuk, S., Dulyasucharit, R., Noulmanee, A., Boueroy, P., & Chancharoonpong, C. (2023). Novel and simplified method of producing microbial calcite powder for clayey soil stabilization. **Geomechanics for Energy and the Environment, 35**, Article 100480. https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100480

Prongmanee, N., & Noulmanee, A. (2020). Properties of Chiang Khruea Lateritic Soil and Their Applications for Civil Engineering. **Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal), 13**(3), 14-30. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/239930

Pholtrai, R., Prongmanee, N., Noulmanee, A., & Suppaso, T. (2025). Evaluating the impact of ammonium by-products from microbial-induced calcite precipitation on Atterberg limits of stabilized clayey soil. **International Journal of GEOMATE, 29**(131). [In press, July 2025].