

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) **Meningkatkan Stabilitas Lereng Tanah Lempung** **Plastisitas Rendah**

Mahardi Kamalika Khusna Ali¹⁾, Rina Rebut Rayhansah²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kadiri, Jalan Selomangleng No. 01,
Kelurahan Pojok, Kecamatan Mojojoto, Kota Kediri, Jawa Timur.

Email: mahardi@unik-kediri.ac.id

²⁾ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kadiri, Jalan Selomangleng No. 01,
Kelurahan Pojok, Kecamatan Mojojoto, Kota Kediri, Jawa Timur.

Email: rinarebutrayhansah@unik-kediri.ac.id

ABSTRAK

Indonesia sebagai wilayah tropis memiliki curah hujan tinggi. Kondisi ini membuat tanah lempung berplastisitas rendah (CL), yang dominan mengandung mineral kaolinit mudah kehilangan kekuatan saat kadar air meningkat. Kondisi ini meningkatkan risiko keruntuhan lereng. Metode stabilisasi konvensional mahal dan berdampak lingkungan. *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) menjadi alternatif ramah lingkungan karena menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat mengikat partikel tanah. Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh MICP biostimulasi terhadap perilaku lereng tanah lempung melalui model skala kecil. Model lereng dibuat dari tanah CL dalam box kaca berukuran $60 \times 14 \times 25$ cm dengan sudut 60° . Dua kondisi diuji, yaitu normal (air) dan MICP (larutan sementasi) dengan inkubasi 7 hari pada suhu ruangan. Dilakukan pengujian pembebanan serta uji geser langsung pada tiga tegangan normal. Parameter yang dianalisis meliputi *load-deformation*, modulus elastisitas (E_0 , E_{50} , E_t), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), serta validasi statistik dengan ANOVA. Hasil menunjukkan MICP mampu meningkatkan respon beban sebesar 105,4 % dengan p-value 0,000. Nilai E_{50} meningkat 24,5%, dan E_t meningkat sebesar 35%. Kohesi meningkat sebesar 96,9%, sedangkan sudut geser meningkat sebesar 11% dengan p-value 0,001. Temuan ini menunjukkan MICP mampu meningkatkan kapasitas respon beban lereng, kekakuan, dan kuat geser tanah serta berpotensi sebagai teknologi stabilisasi lereng tanah lempung yang efektif berkelanjutan.

Kata kunci: MICP, Stabilisasi Lereng, Modulus Elastisitas, Kuat Geser, Tanah lempung CL

ABSTRACT

Indonesia, as a tropical region, experiences high rainfall. This condition causes low-plasticity clay (CL) soil, which predominantly contains kaolinite minerals, to easily lose strength when water content increases. This condition increases the risk of slope failure. Conventional stabilization methods are expensive and have environmental impacts. Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) is an environmentally friendly alternative because it produces calcium carbonate (CaCO_3) that can bind soil particles. The study aimed to evaluate the effect of biostimulated MICP on the behavior of clay slopes through a small-scale model. The slope model was made from CL soil in a glass box measuring $60 \times 14 \times 25$ cm with a 60° angle. Two conditions were tested: normal (water) and MICP (cementation solution) with a 7-day incubation at room temperature. Loading tests and direct shear tests were conducted at three normal stresses. The parameters analyzed include load-deformation, modulus of elasticity (E_0 , E_{50} , E_t), cohesion (c), internal friction angle (ϕ), and statistical validation with ANOVA. The results show that MICP is able to increase the load response by 105.4% with a p-value of 0.000. The E_{50} value increased by 24.5%, and E_t increased by 35%. Cohesion increased by 96.9%, while the friction angle increased by 11% with a p-value of 0.001. These findings indicate that MICP is capable of increasing the slope load response capacity, stiffness, and shear strength of the soil and has the potential to be an effective and sustainable clay slope stabilization technology.

Keywords: MICP, Slope Stabilization, Modulus of Elasticity, Shear Strength, CL clay soil

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai wilayah tropis umumnya memiliki curah hujan tinggi, yaitu sekitar 1500 - 4500 mm pada tahun 2024 (Bidang Klimatologi Badan Meteorologi & Geofisika Jakarta, 2024).

Pada wilayah ini, mineral lempung yang paling dominan adalah kaolinit yang umumnya tergolong dalam jenis tanah CL berdasarkan sistem klasifikasi USCS (Lehmann et al., 2021; Nkalih Mefire et al., 2015). Jenis tanah tersebut rentan kehilangan kekuatan saat kadar air meningkat

(Kurnia, Sarie, & Gandi, 2021), kondisi ini mengakibatkan berkurangnya kapasitas dukung tanah, meningkatnya deformasi, sehingga dapat memicu kegagalan lereng. Berbagai metode stabilisasi konvensional, seperti penggunaan semen, kapur, dan fly ash telah banyak dikembangkan (Anburuvel, 2024), namun sebagian besar masih terkendala biaya tinggi dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan (Mohamed et al., 2022; Santhikala, Chandramouli, & Pannirselvam, 2022; J. Zhang et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan metode stabilisasi tanah yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) hadir sebagai alternatif ramah lingkungan dengan memanfaatkan aktivitas bakteri untuk menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) yang berfungsi mengikat butir tanah, memperbaiki struktur pori dan mengurangi permeabilitas tanah (Chittoori, Rahman, & Burbank, 2021; Liu et al., 2020; Wang et al., 2024). MICP umumnya diaplikasikan melalui dua pendekatan, yaitu bioaugmentasi dan biostimulasi (Tiwari, Satyam, & Sharma, 2021). Bioaugmentasi menggunakan penambahan bakteri eksternal, seperti *Sporosarcina pasteurii*, yang diinokulasikan bersama larutan sementasi (Pakbaz, Ghezelbash, & Afzal, 2020; Wang et al., 2024). Metode ini efektif pada tanah berpasir dengan permeabilitas tinggi, tetapi terbatas pada tanah lempung karena distribusi bakteri terhambat oleh pori yang kecil. Sebaliknya, biostimulasi memanfaatkan bakteri *indigenous* yang sudah ada di tanah dengan penambahan nutrisi seperti urea, CaCl_2 , dan sumber karbon seperti molase tebu untuk merangsang aktivitasnya (Wang et al., 2024). (Islam, Chittoori, & Burbank, 2020) dan (Tiwari et al., 2021) melaporkan bahwa biostimulasi lebih sesuai karena menghasilkan distribusi endapan CaCO_3 yang lebih merata, sekaligus lebih ekonomis dan berkelanjutan dibanding bioaugmentasi.

MICP terbukti efektif dalam meningkatkan parameter kuat geser tanah. Studi yang dilakukan Pakbaz et al., (2020), menyatakan bahwa perlakuan MICP memberikan peningkatan kohesi sebesar 153% pada jenis tanah lempung berpasir dan peningkatan sebesar 234% pada jenis tanah pasir berlanau. Selain itu, studi dari Tian et al., (2022), juga menyatakan bahwa MICP biostimulasi dapat meningkatkan sudut geser pada tanah lempung ekspansif, dengan peningkatan sebesar 46,9% dari 20.13° hingga 29.58° . Beberapa studi juga telah membuktikan efektivitas MICP pada lereng. Z. Zhang et al., (2024), melakukan studi lapangan pada lereng gravelly clay dan menunjukkan bahwa MICP mampu meningkatkan *surface strength* serta mengurangi

erosi akibat hujan, meskipun durabilitas menurun setelah akumulasi curah hujan tinggi. Gowthaman et al., (2023) dalam studinya, melaporkan bahwa aplikasi bio-cementation pada permukaan lereng menghasilkan lapisan keras setebal 5–10 cm dengan *surface strength* mencapai 1,02 MPa, yang efektif dalam menahan degradasi permukaan. Li et al., (2022), menemukan bahwa lereng yang diperlakukan MICP mengalami peningkatan *penetration resistance* hingga 2,04 MPa, meskipun distribusi kalsit tidak seragam pada seluruh bidang lereng. MICP telah menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan kekuatan geser serta parameter pada lereng, namun efektivitas MICP biostimulasi pada lereng tanah lempung berplastisitas rendah di bawah kondisi pembebanan masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh MICP biostimulasi terhadap perilaku lereng tanah lempung berplastisitas rendah melalui pengujian model skala kecil. Analisis dilakukan dengan uji pembebanan untuk memperoleh *load-deformation* dan modulus elastisitas serta uji geser langsung untuk menentukan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman baru mengenai mekanisme peningkatan sifat mekanik lereng tanah CL melalui MICP biostimulasi, serta dapat menjadi alternatif stabilisasi lereng tanah lempung yang berkelanjutan dan relevan untuk kondisi tropis.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Material

Tanah diambil dari area Kampus Universitas Kadiri pada kedalaman ± 80 cm untuk memperoleh kondisi undisturbed soil. Tanah dikeringkan selama 2 minggu pada suhu ruang terlindung dari sinar matahari langsung hingga kadar air mencapai $\pm 10\%$ untuk menjaga bakteri dalam tanah tetap dalam kondisi optimal (Wang et al., 2024). Tanah dihancurkan menggunakan mesin ayakan dengan bukaan 0,3 mm. Berdasarkan klasifikasi USCS, tanah tergolong lempung berplastisitas rendah (CL) dengan karakteristik fraksi pasir 31.45%, lanau 52.39%, lempung 16.17%, coefficient of uniformity (C_u) 11.22, coefficient of curvature (C_c) 3.56, liquid limit (LL) 24.99%, plastic limit (PL) 10.93%, and plasticity index (PI) 14.06%.

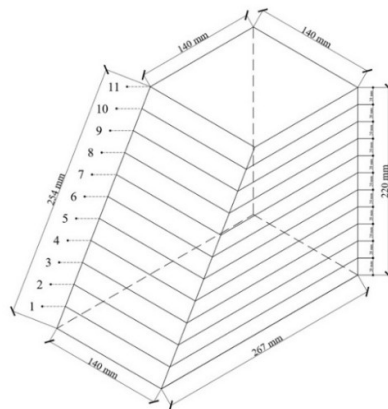
2.2 Larutan MICP

Larutan MICP disiapkan dari campuran urea 0,333 mol/L (Tiwari et al., 2021), CaCl_2 0,3 mol/L, CH_3COONa 0,1 mol/L, NaOH 0,001 mol/L (Islam et al., 2020), dan molase tebu 3 g/L (Pakbaz et al., 2020). Komponen ditimbang, dilarutkan ke dalam

air destilasi, dan diaduk hingga homogen. Larutan digunakan segera untuk menghindari degradasi komponen aktif.

2.3 Sampel

Penelitian ini menggunakan dua jenis model lereng, yaitu lereng dengan air biasa dan lereng yang diberi perlakuan dengan larutan MICP. Model dibuat dalam box kaca ($60 \times 14 \times 25$ cm) dengan sudut 60° , tinggi 22 cm, alas 26,7 cm, terdiri dari 11 layer berjarak 2 cm (**Gambar 1**). Setiap layer diisi dengan metode air pluviation untuk menjamin distribusi homogen (Hariprasad, Rajashekhar, & Umashankar, 2016). Berat volume tanah basah dijaga $1,61 \text{ g/cm}^3$, dengan penambahan air/larutan MICP sebesar 40% dari berat tanah. Larutan didiamkan ± 2 menit untuk meresap sebelum menambahkan layer berikutnya. Untuk membuat sudut kemiringan lereng digunakan bekisting kayu yang dilapisi plastik dan bekisting dilepas setelah 24 jam. Sampel diinkubasi 7 hari pada suhu ruang (tanpa sinar matahari langsung). Pemilihan 7 hari inkubasi karena presipitasi CaCO_3 signifikan mulai terjadi (Pakbaz et al., 2020).

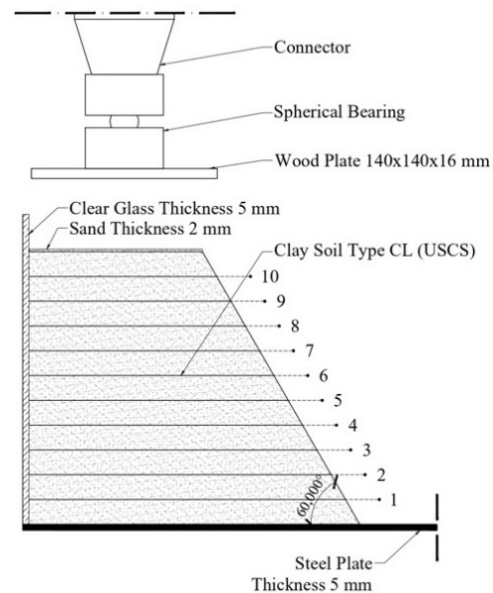


Gambar 1. Dimensi Sampel Lereng

2.4 Pengujian Pembebanan

Pengujian dilakukan menggunakan perangkat uji skala kecil yang dikembangkan oleh AIC Innovation. Beban diberikan dari atas secara bertahap dengan distribusi merata melalui plat kayu 16 mm yang dihubungkan dengan spherical bearing untuk menghindari eksentrisitas. Permukaan tanah dilapisi pasir tipis (2 mm) untuk meratakan distribusi beban. Skema detail pengujian ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pengujian dihentikan apabila lereng mengalami keruntuhan atau ketika peningkatan respon beban tanah tidak lagi signifikan. Data beban (kg) dicatat dengan loadcell terkalibrasi, sedangkan data deformasi vertical (mm) dicatat menggunakan linear

potentiometer. Seluruh data terekam otomatis melalui Excel Data Streamer.



Gambar 2. Skema Pengujian Pembebanan

Hasil pengujian dianalisis dalam bentuk kurva *load-deformation* untuk membandingkan kinerja lereng normal dengan lereng MICP. Data juga dikonversi menjadi kurva tegangan-regangan untuk menghitung parameter kekakuan tanah (Urmi, Saeidi, Yerro, & Chavali, 2023). Modulus elastisitas dihitung dengan membagi tegangan dan regangan pada titik tertentu. Nilai *initial tangent elastic modulus* (E_0) diperoleh dari gradien awal kurva (Huang, Huang, & Ding, 2018), *Secant Modulus at 50% Peak Strength* (E_{50}) dihitung pada 50% tegangan maksimum (Małkowski, Ostrowski, & Brodny, 2018), dan *tangent elastic modulus* (E_t) dari saat tanah mulai memasuki fase plastis (Huang et al., 2018).

2.5 Pengujian Geser Langsung

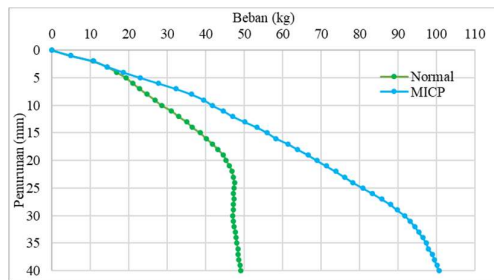
Sampel uji geser dibuat dengan prosedur dan kondisi inkubasi yang sama dengan sampel lereng. Pengujian dilakukan sesuai (ASTM D 3080-03, 2003) pada tiga tingkat tegangan normal yaitu 2.587 kPa, 7.698 kPa, dan 9.443 kPa, dengan laju geser konstan 1 mm/menit. Data tegangan geser puncak dianalisis untuk memperoleh nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

2.6 ANOVA

Analisis statistik dilakukan menggunakan One-Way ANOVA untuk membandingkan rata-rata kohesi dan beban antara kelompok Normal dan MICP. Keputusan signifikansi ditentukan berdasarkan nilai p dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

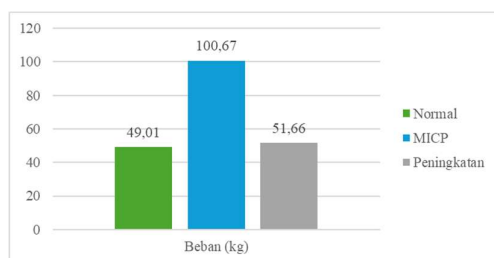
3.1 Load-Deformation



Gambar 3. Kurva Load-Deformation

Hubungan beban dan penurunan pada lereng normal dan MICP ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pada penurunan 5,00 mm, beban yang diterima lereng normal adalah 19.18 kg, sedangkan lereng MICP sebesar 22.9 kg. Pada penurunan 10,00 mm, beban lereng normal tercatat 28.5 kg, sedangkan lereng MICP mencapai 41.67 kg. Pada penurunan 20,00 mm, lereng normal menahan beban 45.3 kg, sedangkan lereng MICP menahan beban 68,88 kg. Memasuki penurunan penurunan 30,00 mm, beban pada lereng normal sebesar 47,03 kg, sedangkan pada lereng MICP tercatat 91,78 kg. Lereng normal mulai memasuki fase plastis pada penurunan sekitar 22,40 mm, dengan beban 49,01 kg hingga penurunan akhir 40,00 mm. Lereng MICP mulai menunjukkan fase plastis pada penurunan sekitar 38,20 mm, dengan beban maksimum 100,67 kg, kemudian menurun hingga penurunan akhir 40,00 mm.

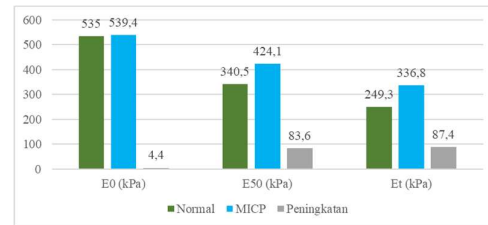
3.2 Kapasitas Respon Beban Maksimum



Gambar 4. Kapasitas Respon Beban Maksimum

Perbandingan antara normal dan MICP ditunjukkan pada **Gambar 4**. Lereng normal mencapai beban puncak sebesar 49,01 kg, sedangkan lereng MICP mampu menahan beban puncak 100,67 kg. Hasil menunjukkan bahwa lereng MICP meningkatkan beban maksimum sebesar 51,66 kg.

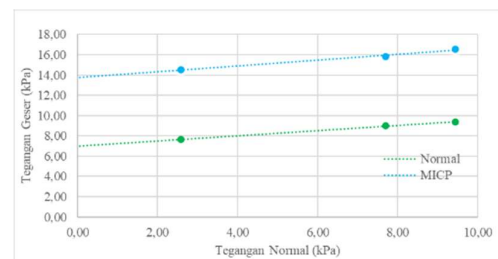
3.3 Modulus Elastisitas



Gambar 5. Modulus Elastisitas

Hasil nilai modulus elastisitas ditunjukkan pada **Gambar 5**. MICP menunjukkan peningkatan pada semua nilai modulus. Pada kondisi normal, E_0 sebesar 535,0 kPa, E_{50} sebesar 340,5 kPa, dan E_t sebesar 249,3 kPa. Sedangkan MICP didapatkan nilai E_0 adalah 539,4 kPa, E_{50} sebesar 424,1 kPa, dan E_t sebesar 336,8 kPa. Peningkatan nilai modulus elastisitas MICP tercatat sebesar 4,4 kPa untuk E_0 , 83,6 kPa untuk E_{50} , dan 87,5 kPa untuk E_t .

3.4 Kekuatan Geser Tanah



Gambar 6. Kekuatan Geser Tanah

Hasil pengujian geser langsung ditunjukkan pada **Gambar 6**. Pada kondisi normal, tegangan geser puncak tercatat sebesar 7.635 kPa, 8.983 kPa, dan 9.369 kPa dengan nilai kohesi (c) sebesar 6,983 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) sebesar 14,329°. MICP menunjukkan peningkatan dengan tegangan geser tercatat sebesar 14.518 kPa, 15.843 kPa, dan 16.525 kPa dengan nilai c sebesar 13.754 kPa, dan ϕ 15,917°.

3.5 Anova

Hasil analisis statistik menggunakan ANOVA ditunjukkan pada **Tabel 1**. Nilai p-value untuk parameter kohesi adalah 0,001, sedangkan nilai p-value untuk parameter beban adalah 0,000. Kedua nilai lebih kecil dari tingkat signifikansi 0,05, sehingga perbedaan antara kondisi normal dan MICP pada kedua parameter dinyatakan signifikan secara statistik.

Tabel 1. Hasil ANOVA

Parameter	P-value
Kohesi	0.001
Beban	0.000

3.6 Pembahasan

Hasil pengujian beban menunjukkan bahwa MICP mampu meningkatkan respon beban lereng sebesar 105,4% dari kondisi normal. Nilai p-value sebesar 0,000 memperkuat bahwa perbedaan beban ini signifikan secara statistik. Temuan ini konsisten dengan penelitian Tiwari et al. (2021) yang melaporkan bahwa MICP mampu meningkatkan kekuatan tanah hingga 134% pada tanah lempung. Selain itu penelitian Gowthaman et al., (2023) mencatat peningkatan surface strength lereng lapangan hingga 1,02 MPa melalui biocementation.

Kurva load–deformation menunjukkan bahwa lereng normal memasuki fase plastis yang dimulai pada deformasi 22,40 mm. Sebaliknya, lereng MICP masih mampu meningkatkan beban hingga memasuki fase plastis pada deformasi 38,20 mm. Hasil modulus elastisitas mengonfirmasi perbedaan ini dengan E_0 yang relatif sama pada kedua kondisi, namun E_{50} meningkat sebesar 24,5%, dan E_t meningkat 35% setelah perlakuan MICP. Hasil ini selaras dengan temuan Su et al., (2022), yang menjelaskan bahwa endapan CaCO_3 memperbaiki struktur pori tanah lempung dan meningkatkan modulus elastisitas. Peningkatan modulus elastisitas ini mampu menjelaskan alasan kemampuan lereng MICP untuk merespons beban yang lebih besar.

Uji geser langsung menunjukkan bahwa MICP meningkatkan kohesi sebesar 96,9%, serta sudut geser 11%. Nilai p-value 0,001 menegaskan bahwa peningkatan tegangan geser maksimum signifikan secara statistik. Peningkatan parameter kuat geser ini berimplikasi langsung terhadap kapasitas lereng dalam menahan beban serta kekakuan lereng. Hal ini konsisten dengan penelitian Z. Zhang et al., (2024), yang menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan geser berkontribusi secara langsung dalam peningkatan kekuatan lereng. Selain itu Islam et al., (2020), melaporkan bahwa MICP biostimulasi efektif meningkatkan kekuatan geser tanah.

Peningkatan respon beban lereng, modulus elastisitas, dan parameter geser dapat dijelaskan melalui mekanisme mikro. Maston et al., (2025) dan Su et al., (2022) melaporkan bahwa presipitasi CaCO_3 mengisi rongga pori, menurunkan porositas efektif, dan membentuk jembatan antarbutir tanah. Mekanisme ini meningkatkan kekuatan matriks dan memperbaiki distribusi tegangan. Pada skala makro, hal ini menjelaskan

mengapa lereng MICP mampu menahan beban lebih tinggi dan deformasi lebih kecil pada beban yang sama. Konsep ini juga sejalan dengan (Hou, Wang, Deng, Zhu, & Xiao, 2020), yang menyatakan bahwa distribusi tegangan pada lereng tanah lempung sangat dipengaruhi oleh kondisi material, dan penambahan material pengikat dapat meningkatkan efisiensi transfer tegangan di bawah pembebanan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa MICP pada tanah lempung berplastisitas rendah mampu meningkatkan respon beban lereng, memperbesar nilai modulus elastisitas (E_{50} dan E_t), serta meningkatkan parameter kuat geser berupa kohesi dan sudut geser dalam. Dengan meningkatnya sifat mekanik tanah tersebut, hal ini berdampak langsung pada meningkatnya faktor keamanan lereng. Sehingga lereng alami dengan sudut yang curam dapat tetap stabil dengan mengaplikasikan MICP tanpa kekuatan tambahan seperti semen atau geotekstil yang lebih mahal dan berpotensi merusak lingkungan. Temuan penelitian ini menunjukkan potensi penerapan MICP sebagai teknologi stabilisasi lereng tanah kohesif yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yaitu proses inkubasi dilakukan selama 7 hari pada suhu ruangan, tanpa mempertimbangkan siklus basah–kering atau curah hujan yang memengaruhi durabilitas jangka panjang. Penelitian juga tidak melakukan analisis mikrostruktur, sehingga distribusi dan morfologi presipitasi CaCO_3 berdasarkan literatur terdahulu. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk menguji variasi waktu inkubasi, pengujian pada kondisi lapangan serta analisis mikrostruktur.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa MICP berbasis biostimulasi efektif meningkatkan stabilitas lereng tanah lempung berplastisitas rendah. MICP biostimulasi mampu meningkatkan respon beban maksimum lereng sebesar 105,4 % yang didukung oleh peningkatan parameter mekanik E_{50} sebesar 24,5%, E_t sebesar 35%, kohesi 96,9%, serta sudut geser sebesar 11%. Temuan ini menjelaskan bahwa MICP dapat meningkatkan kapasitas respon beban lereng, kekakuan, dan kuat geser melalui mekanisme presipitasi CaCO_3 yang berperan memperbaiki struktur pori dan memperkuat interaksi antarpartikel. Sehingga MICP dapat berpotensi sebagai teknologi stabilisasi lereng tanah lempung yang efektif dan berkelanjutan.

Pengakuan

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan

Teknologi (Kemendiknasaintek) atas dukungan pendanaan melalui skema PDP (Penelitian Dosen Pemula) dengan nomor DIPA: SP DIPA-139.04.1.693320/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Anburuvel, A. (2024). The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review. In *Geotechnical and Geological Engineering* (Vol. 42). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02554-x>
- ASTM D 3080-03. (2003). Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International West Conshohocken, PA, 04*, 1–7.
- Bidang Klimatologi Badan Meteorologi, D., & Geofisika Jakarta, D. (2024). *Catatan Iklim Dan Kualitas Udara Indonesia 2024*. 1–104.
- Chittoori, B. C. S., Rahman, T., & Burbank, M. (2021). Microbial-Facilitated Calcium Carbonate Precipitation as a Shallow Stabilization Alternative for Expansive Soil Treatment. *Geotechnics*, 1(2), 558–572. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1020025>
- Gowthaman, S., Koizumi, H., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2023). Field experimentation of bio-cementation using low-cost cementation media for preservation of slope surface. *Case Studies in Construction Materials*, 18(January). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02086>
- Hariprasad, C., Rajashekhar, M., & Umashankar, B. (2016). Preparation of Uniform Sand Specimens Using Stationary Pluviation and Vibratory Methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1909–1922. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0064-0>
- Hou, H. J., Wang, B., Deng, Q. X., Zhu, Z. W., & Xiao, F. (2020). Model Experimental Study on Stress Transfer and Redistribution in a Clay Landslide under Surcharge Load. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4269043>
- Huang, H., Huang, M., & Ding, J. (2018). Calculation of Tangent Modulus of Soils under Different Stress Paths. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1916761>
- Islam, M. T., Chittoori, B. C. S., & Burbank, M. (2020). Evaluating the Applicability of Biostimulated Calcium Carbonate Precipitation to Stabilize Clayey Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003036](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003036)
- Kurnia, D., Sarie, F., & Gandi, S. (2021). Pengaruh Penambahan Air Terhadap Kuat Geser. *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 4(2), 202–212. <https://doi.org/10.31602/jk.v4i2.6427>
- Lehmann, P., Leshchinsky, B., Gupta, S., Mirus, B. B., Bickel, S., Lu, N., & Or, D. (2021). Clays Are Not Created Equal: How Clay Mineral Type Affects Soil Parameterization. *Geophysical Research Letters*, 48(20). <https://doi.org/10.1029/2021GL095311>
- Li, Y., Xu, Q., Li, Y., Li, Y., & Liu, C. (2022). Application of Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation in Wave Erosion Protection of the Sandy Slope: An Experimental Study. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142012965>
- Liu, B., Zhu, C., Tang, C. S., Xie, Y. H., Yin, L. Y., Cheng, Q., & Shi, B. (2020). Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). *Engineering Geology*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105389>
- Małkowski, P., Ostrowski, Ł., & Brodny, J. (2018). Analysis of Young's modulus for Carboniferous sedimentary rocks and its relationship with uniaxial compressive strength using different methods of modulus determination. *Journal of Sustainable Mining*, 17(3), 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.07.002>
- Maston, O., Ouahbi, T., Taibi, S., Hajjar, A. El, Sapin, L., Esnault-Filet, A., ... Fleureau, J. M. (2025). Effect of MICP treatment on the mechanical properties of clay soils. *Transportation Geotechnics*, 50(December 2024), 101483. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101483>
- Mohamed, A. A. M. S., Al-Ajamee, M., Kobbail, A., Dahab, H., Abdo, M. M., & Alhassan, H. E. (2022). A study on soil stabilization for some tropical soils. *Materials Today: Proceedings*, 60, 87–92.

- <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.260>
- Nkalih Mefire, A., Njoya, A., Yongue Fouateu, R., Mache, J. R., Tapon, N. A., Nzeukou Nzeugang, A., ... Fagel, N. (2015). Occurrences of kaolin in Koutaba (west Cameroon): Mineralogical and physicochemical characterization for use in ceramic products. *Clay Minerals*, 50(5), 593–606. <https://doi.org/10.1180/claymin.2015.050.5.04>
- Pakbaz, M. S., Ghezelbash, G. R., & Afzal, A. (2020). Sugarcane Molasses: A Cheap Carbon Source for Calcite Production in Different Class of Soils using Stimulation of Indigenous Urease-producing Bacteria. *Geomicrobiology Journal*, 37(3), 213–229. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1691684>
- Santhikala, R., Chandramouli, K., & Pannirselvam, N. (2022). Stabilization of expansive soil using flyash based geopolymer. *Materials Today: Proceedings*, 68, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.006>
- Su, H., Xiao, H., Li, Z., Tian, X., Luo, S., Yu, X., & Ouyang, Q. (2022). Experimental Study on Microstructure Evolution and Fractal Features of Expansive Soil Improved by MICP Method. *Frontiers in Materials*, 9(March), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.842887>
- Tian, X., Xiao, H., Li, Z., Li, Z., Su, H., & Ouyang, Q. (2022). Experimental Study on the Strength Characteristics of Expansive Soils Improved by the MICP Method. *Geofluids*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/3089820>
- Tiwari, N., Satyam, N., & Sharma, M. (2021). Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89687-2>
- Urmi, Z. A., Saeidi, A., Yerro, A., & Chavali, R. V. P. (2023). Prediction of post-peak stress-strain behavior for sensitive clays. *Engineering Geology*, 323(June), 107221. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107221>
- Wang, Z., Yang, T., Liu, Y., Jiang, Q., Shang, H., & Zheng, C. (2024). Montmorillonite combined with microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of bare surface soil in arid mining area. *Process Safety and Environmental Protection*, 187(February), 926–939. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.015>
- Zhang, J., Meng, Z., Jiang, T., Wang, S., Zhao, J., & Zhao, X. (2022). Experimental Study on the Shear Strength of Silt Treated by Xanthan Gum during the Wetting Process. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/app12126053>
- Zhang, Z., Lu, H., Tang, X., Liu, K., Ye, L., & Ma, G. (2024). Field investigation of the feasibility of MICP for Mitigating Natural Rainfall-Induced erosion in gravelly clay slope. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(10). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03909-1>