



## Pengaruh Durasi Inkubasi pada Perlakuan MICP Biostimulasi Terhadap Kohesi dan Sudut Geser Tanah Lempung

Fahrul Rizaldi<sup>1</sup>, Mahardi Kamalika Khusna Ali<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kadiri, Indonesia  
Jl. Selomangleng No. 1, Pojok, Mojojoto, Kota Kediri, Jawa Timur

E-Mail \*: [mahardi@unik-kediri.ac.id](mailto:mahardi@unik-kediri.ac.id)

### ABSTRACT

Clay soils exhibit mechanical characteristics that are highly influenced by variations in water content, making them susceptible to reductions in shear strength parameters under saturated conditions or during wetting–drying cycles. This study aims to analyze the influence of incubation duration on the development of effective shear strength parameters of low-plasticity clay (CL) stabilized using the Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) method through a biostimulation approach. Soil samples were prepared under two conditions, namely untreated soil and MICP-treated soil, and subsequently incubated for 0, 7, and 14 days. The cohesion ( $c'$ ) and internal friction angle ( $\phi'$ ) were obtained through direct shear testing and analyzed using the Mohr–Coulomb failure criterion. The results indicate that increasing incubation duration significantly contributes to the improvement of shear strength parameters in MICP-treated samples. At an incubation period of 14 days, the cohesion reached 10.794 kPa, representing an increase of approximately 167% compared to untreated soil, while the internal friction angle increased to 27.889°, about 63% higher than that of the untreated samples. The maximum shear stress also increased by approximately 140% compared to the untreated soil. Statistical analysis using ANOVA at a 95% confidence level confirmed that the differences in shear parameters between treatments were statistically significant ( $p < 0.05$ ) across all incubation durations. The improvement in shear strength parameters indicates that  $\text{CaCO}_3$  precipitation developed during the incubation period plays a significant role in strengthening interparticle bonding within the soil matrix. These findings demonstrate that MICP based on biostimulation is an effective soil stabilization method for improving the mechanical performance of clay soils, particularly through the enhancement of cohesion and internal friction angle with increasing incubation duration.

**Keywords:** MICP, Cohesion, Internal Friction Angle, Clay Soil

### ABSTRAK

Tanah lempung menunjukkan karakteristik mekanik yang sangat dipengaruhi oleh perubahan kadar air, sehingga rentan mengalami penurunan parameter kuat geser pada kondisi jenuh maupun selama siklus pembasahan–pengeringan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh durasi inkubasi terhadap perkembangan parameter kuat geser efektif tanah lempung berplastisitas rendah (CL) yang distabilisasi menggunakan metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) melalui pendekatan biostimulasi. Sampel tanah disiapkan dalam dua kondisi, yaitu tanpa perlakuan dan dengan perlakuan MICP, kemudian diinkubasi selama 0, 7, dan 14 hari. Parameter kohesi ( $c'$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi'$ ) diperoleh melalui pengujian *direct shear test* dan dianalisis berdasarkan kriteria kegagalan Mohr–Coulomb. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan durasi inkubasi berkontribusi signifikan terhadap kenaikan parameter kuat geser pada sampel MICP. Pada masa inkubasi 14 hari, nilai kohesi mencapai 10,794 kPa, meningkat sekitar 167% dibandingkan tanah tanpa perlakuan, sedangkan sudut geser meningkat hingga 27,889° atau sekitar 63% lebih tinggi dibandingkan sampel *untreated*. Tegangan geser maksimum juga tercatat meningkat hingga sebesar 140% dibandingkan tanah tanpa perlakuan. Analisis statistik menggunakan uji ANOVA pada tingkat kepercayaan 95% menunjukkan bahwa perbedaan parameter geser antarperlakuan signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ) pada seluruh variasi durasi inkubasi. Peningkatan parameter kuat geser tersebut mengindikasikan bahwa presipitasi  $\text{CaCO}_3$  yang berkembang selama masa inkubasi berperan dalam memperkuat ikatan antarpartikel tanah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa MICP berbasis biostimulasi merupakan metode stabilisasi yang efektif dalam meningkatkan performa mekanik tanah lempung, melalui peningkatan kohesi dan sudut geser seiring bertambahnya durasi inkubasi.

**Kata Kunci :** MICP, Kohesi, Sudut Geser, Tanah Lempung



## 1. PENDAHULUAN

Tanah lempung merupakan salah satu jenis tanah yang banyak dijumpai di Indonesia dan memiliki sifat yang sensitif terhadap perubahan kadar air (Fatkhuroyan, Wati, & Kurniawan, 2021; Lehmann et al., 2021). Kondisi ini menyebabkan tanah jenis mudah mengalami penurunan kuat geser ketika mengalami peningkatan kadar air (I. Amalia, Hidayah, & Nurtjahjaningtyas, 2025; Kurnia, Sarie, & Gandi, 2021), sehingga dapat memicu bencana seperti tanah longsor (G. Amalia, Minaka, & Apriandi, 2025). Kondisi ini diperparah oleh curah hujan pada wilayah tropis yang umumnya cukup tinggi (Deputi Bidang Klimatologi, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2024), data dari BNPB sendiri menyatakan bahwa pada tahun 2024 sendiri telah terjadi 207 kasus tanah longsor dengan total 213 korban jiwa (Pusdatinkom BNPB, 2024). Penerapan metode stabilisasi konvensional dengan menggunakan semen, kapur dan fly ash memang terbukti efektif dalam meningkatkan kohesi dan sudut geser tanah sebesar 677%, 213% dan 18%, 14% (Ghadakpour, Choobasti, & Kutanaei, 2020; B. Hu, Hu, Liu, & Tao, 2024), namun penerapan metode tersebut memiliki kelemahan berupa tingginya jejak karbon (Sarmiento, Figueredo, Cobo, & Proa, 2020), perubahan mineralogi tanah, biaya tinggi, dan potensi dampak ekologis yang signifikan (Hauashdh, Radin Mohamed, Nagapan, Rahman, & Gamil, 2024). Tantangan ini mendorong berkembangnya teknologi stabilisasi tanah yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan yang dianggap menjanjikan adalah *Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP)*, yaitu metode stabilisasi tanah berbasis biosementasi yang menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional (Jia Qin, Huan Cao, Yang Xu, Fei He, 2025; Payan et al., 2024). MICP bekerja melalui proses hidrolisis urea yang menghasilkan ion karbonat untuk bereaksi dengan ion kalsium sehingga membentuk presipitasi kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dalam matriks tanah (Valencia-Galindo, Sáez, Ovalle, & Obreque, 2025). Endapan  $\text{CaCO}_3$  yang dihasilkan kemudian berfungsi sebagai pengikat antar-partikel tanah, sehingga mampu meningkatkan kohesi, memperbesar sudut geser dalam, serta mengurangi permeabilitas tanah (Amini Kiasari, Pakbaz, & Ghezelbash, 2018; Tian et al., 2022; Wang et al., 2024). Dalam penerapannya, MICP dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu *biostimulasi* dan *bioaugmentasi*. *Bioaugmentasi* dilakukan dengan menambahkan kultur bakteri eksternal ke dalam tanah, namun pendekatan ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti kebutuhan kontrol laboratorium yang ketat dan biaya yang tinggi, sehingga kurang efisien untuk diterapkan pada skala lapangan (Liu et al., 2020; Pakbaz, Ghezelbash, & Afzal, 2020; Wang et al., 2024). Sebaliknya, pendekatan biostimulasi dipandang lebih efektif karena hanya memerlukan suplai larutan nutrisi untuk mengaktifkan bakteri *indigenous* dalam tanah, sehingga menghasilkan proses yang lebih sederhana,

lebih ekonomis, dan cocok untuk aplikasi lapangan (Chittoori, Rahman, & Burbank, 2021).

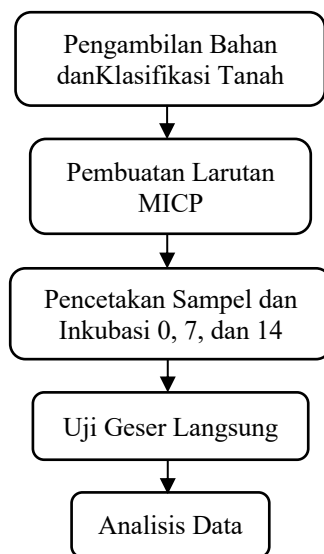
Sejumlah studi sebelumnya melaporkan bahwa penerapan MICP berbasis biostimulasi mampu meningkatkan kekuatan tanah lempung pada berbagai variasi durasi inkubasi. Temuan (Tiwari, Satyam, & Sharma, 2021a) menunjukkan bahwa perlakuan MICP Biostimulasi mampu meningkatkan nilai UCS sebesar 134% pada tanah lempung dengan masa inkubasi 4 hari. Sementara itu, penelitian oleh (Chittoori et al., 2021) mencatat bahwa perlakuan MICP berbasis biostimulasi dengan durasi inkubasi 7 hari mampu meningkatkan nilai UCS pada lempung hingga sebesar 287%. Kajian lain oleh (Islam, Chittoori, & Burbank, 2020), melaporkan bahwa pada durasi inkubasi 14 hari, perlakuan MICP Biostimulasi mampu meningkatkan nilai UCS pada tanah lempung hingga sebesar 300%. Selain itu, perlakuan MICP Biostimulasi pada tanah lempung juga terbukti dalam meningkatkan nilai *undrained shear strength* hingga sebesar 147,7% setelah masa inkubasi 25 hari (Kannan, Bindu, & Vinod, 2020). Berbagai penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas MICP berbasis Biostimulasi dalam meningkatkan nilai UCS dan *undrained shear strength* dengan rentang masa inkubasi yang berbeda, namun studi terdahulu masih belum meninjau efektivitas MICP berbasis Biostimulasi dalam meningkatkan sudut geser dan kohesi tanah lempung pada berbagai rentang durasi inkubasi.

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi durasi inkubasi pada perlakuan MICP biostimulasi terhadap parameter kuat geser tanah lempung, yaitu kohesi ( $c'$ ), sudut geser ( $\phi'$ ) dan tegangan geser, yang diperoleh melalui pengujian geser langsung. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam memberikan bukti eksperimental mengenai peran durasi inkubasi pada perlakuan MICP Biostimulasi dalam peningkatan kuat geser tanah lempung.

## 2. METODE

Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan bukti eksperimental mengenai pengaruh durasi inkubasi pada MICP biostimulasi terhadap kohesi ( $c'$ ) dan sudut geser ( $\phi'$ ) pada tanah lempung. Uji geser langsung dilakukan untuk memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dari perlakuan MICP. Adapun bagan alir pada penelitian berikut dapat dilihat pada Gambar 1. Alur penelitian ini dimulai dari tahap pengambilan bahan dan klasifikasi tanah sebagai dasar penentuan karakteristik material yang akan digunakan. Selanjutnya dilakukan pembuatan larutan MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) yang berperan dalam proses stabilisasi tanah. Sampel kemudian dicetak dan diinkubasi selama periode tertentu, yaitu 0, 7, dan 14 hari, untuk mengamati perkembangan proses pengikatan. Setelah itu, dilakukan uji geser langsung guna mengetahui kekuatan mekanik tanah hasil perlakuan. Tahap akhir adalah analisis data untuk mengevaluasi pengaruh

perlakuan MICP terhadap sifat fisik dan mekanik tanah secara menyeluruh.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

### 2.1 Bahan dan Klasifikasi Tanah

Sampel tanah diambil dari area belakang Kampus Universitas Kadiri pada kedalaman sekitar 80 cm untuk memperoleh kondisi tanah yang tidak terganggu. Setelah pengambilan, sampel dikeringkan secara alami selama 14 hari di tempat teduh tanpa paparan langsung sinar matahari hingga kadar airnya menurun mencapai  $\pm 10\%$ . Tanah yang telah kering kemudian dihaluskan menggunakan mesin penghalus dan disaring dengan ayakan berukuran 0,3 mm. Pengujian gradasi butiran dilakukan sesuai standar (ASTM (C136/C136M), 2019), sedangkan indeks plastisitas diuji berdasarkan (ASTM D 4318 –00, 2018). Berdasarkan klasifikasi USCS, tanah tersebut termasuk kelompok lempung berplastisitas rendah (CL) dengan komposisi fraksi pasir 31,45%, lanau 52,39%, dan lempung 16,17%. Hasil uji plastisitas menunjukkan nilai batas cair (LL) 24,99%, batas plastis (PL) 10,93%, dan indeks plastisitas (PI) 14,06%.

### 2.2 Larutan MICP Biostimulasi

Larutan MICP berbasis biostimulasi disiapkan dengan melarutkan beberapa komponen kimia ke dalam 1 liter air destilasi. Komposisi larutan meliputi urea 0,333 mol/L (Tiwari, Satyam, & Sharma, 2021b),  $\text{CaCl}_2$  0,3 mol/L,  $\text{CH}_3\text{COONa}$  0,1 mol/L,  $\text{NaOH}$  0,001 mol/L (Islam et al., 2020), serta tambahan molase tebu sebanyak 3 g/L (Pakbaz et al., 2020). Seluruh bahan tersebut diaduk hingga tercampur secara homogen sebelum diaplikasikan pada sampel tanah. Penggunaan molase tebu dipilih karena ketersediaannya yang melimpah, ekonomis, serta kemampuannya sebagai sumber karbon yang efektif dalam menstimulasi aktivitas bakteri indigenous penghasil enzim urease (Pakbaz et al., 2020).

### 2.3 Sampel

Sampel untuk pengujian kali ini dibuat dengan dua jenis perlakuan, yaitu menggunakan air biasa dan larutan MICP biostimulasi. Sampel dicetak sesuai dengan ukuran mold direct shear test, yakni dengan tinggi 2 cm dan diameter 6,3 cm. Penambahan air atau larutan MICP pada sampel dilakukan dengan proporsi sebesar 40% dari berat volume kering tanah, sehingga dihasilkan berat volume basah sebesar  $1,61 \text{ g/cm}^3$ . Sebelum dilakukan pencetakan sampel, dilakukan pelapisan dinding bagian dalam mold menggunakan kertas minyak untuk memudahkan proses pengeluaran sampel setelah dicetak dan menghindari terjadinya lengket antara tanah dengan dinding mold.

Pembuatan sampel dilakukan menggunakan metode *air pluviation*, yaitu dengan menjatuhkan tanah secara perlahan ke dalam cetakan untuk memperoleh kepadatan yang seragam (Hariprasad, Rajashekhar, & Umashankar, 2016), metode ini dilakukan untuk mendapatkan sampel tanah dengan kepadatan yang homogen. Setelah penuangan tanah selesai, permukaan sampel diratakan menggunakan kuas halus tanpa adanya penekanan dan selanjutnya dilakukan penuangan air atau larutan MICP sebanyak 40% dari berat volume tanah. Setelah itu, sampel dikeluarkan secara perlahan dari cetakan dan dibungkus menggunakan plastic wrap untuk menjaga kelembapan tanah selama masa inkubasi. Setiap variasi sampel dibuat sebanyak tiga replikasi untuk menjamin akurasi hasil pengujian. Proses inkubasi dilakukan selama 0, 7, dan 14 hari pada suhu ruang tanpa paparan sinar matahari langsung. Pemilihan rentang waktu inkubasi dilakukan untuk melihat pengaruh durasi inkubasi terhadap kohesi dan sudut geser tanah lempung dengan perlakuan MICP Biostimulasi.

### 2.4 Uji Geser Langsung

Pengujian geser dilakukan menggunakan perangkat direct shear test yang mengacu pada ASTM D3080-03 (ASTM D 3080-03, 2003), menggunakan tiga tingkat tegangan normal, 1,097 kPa, 3,132 kPa, dan 4,035 kPa, dengan kecepatan konstan 1 mm/menit. Selama pengujian, nilai tegangan geser dicatat melalui load cell, sedangkan deformasi lateral direkam menggunakan linear potentiometer. Seluruh data hasil pengujian kemudian terdokumentasi secara otomatis melalui Excel Data Streamer. Data beban geser yang kemudian dibagi dengan luas penampang sampel untuk memperoleh nilai tegangan geser ( $\tau$ ).

$$\tau = \frac{\text{Beban geser}}{\text{Luas Penampang}} \quad (1)$$

Selain itu dilakukan perhitungan tegangan normal ( $\sigma$ ) dengan membagi beban yang telah ditentukan dengan luas penampang sampel.

$$\sigma = \frac{\text{Beban Normal}}{\text{Luas Penampang}} \quad (2)$$

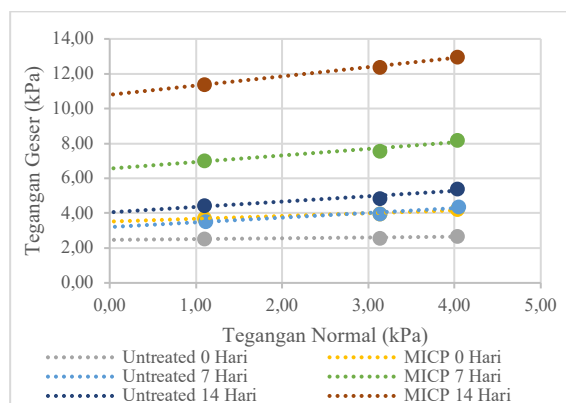
Selanjutnya tegangan geser maksimum dari setiap tingkat tegangan normal diplot kedalam grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser untuk memperoleh nilai kohesi ( $c'$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi'$ ), berdasarkan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb (Braja M. Das and Khaled Sobhan, 2018).

## 2.5 ANOVA

Peningkatan kohesi dan sudut geser pada setiap masa inkubasi dianalisis untuk membandingkan sampel kontrol dan sampel MICP, sementara uji ANOVA digunakan untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antar kelompok pada tingkat kepercayaan 95%.

## 3. PEMBAHASAN

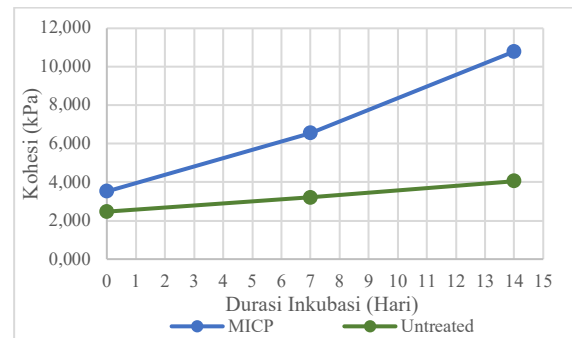
### 3.1 Hasil Uji Geser



**Gambar 2.** Grafik Hubungan Tegangan Normal dan Tegangan Geser

Gambar 2. Menunjukkan hubungan antara kurva tegangan geser dan tegangan normal yang dihasilkan dari pengujian geser langsung sampel MICP dan untreated pada setiap durasi inkubasi. Grafik diatas menunjukkan bahwa pada seluruh tingkat tegangan normal, sampel tanah dengan perlakuan MICP menghasilkan tegangan geser yang lebih tinggi dibandingkan tanah tanpa perlakuan. Pada masa inkubasi 0 hari, nilai tegangan geser MICP berada pada kisaran yang lebih tinggi dibandingkan sampel untreated, yakni sebesar 3,714, 3,955, 4,207 kPa, sedangkan sampel untreated berada pada rentang 2,527, 2,581, 2,671 kPa. Peningkatan yang lebih signifikan terlihat pada masa inkubasi 7 hari, di mana tegangan geser MICP meningkat menjadi 7,029, 7,554, 8,205 kPa, sementara sampel untreated hanya mencapai 3,536, 3,955, 4,365 kPa. Pada masa inkubasi 14 hari, tegangan geser MICP mencapai nilai tertinggi, yaitu 11,394, 12,391, 12,968 kPa, sedangkan tanah tanpa perlakuan berada pada kisaran 4,438, 4,847, 5,403 kPa. Secara umum, grafik menunjukkan tren peningkatan tegangan geser seiring bertambahnya durasi inkubasi, dengan nilai tegangan geser pada sampel MICP konsisten berada di atas nilai tegangan geser sampel untreated pada variasi durasi inkubasi.

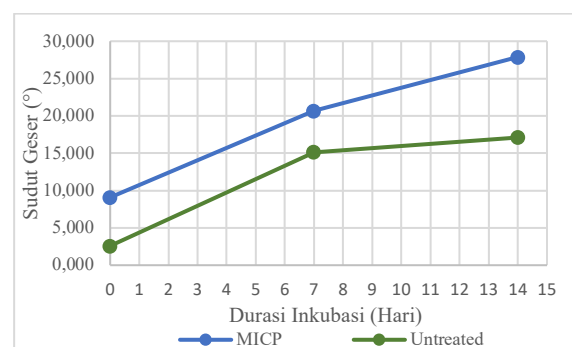
### 3.2 Hubungan Kohesi dan Durasi Inkubasi



**Gambar 4.** Grafik Hubungan Kohesi dan Durasi Inkubasi

Gambar 4. menampilkan perubahan nilai kohesi tanah terhadap durasi inkubasi untuk sampel untreated dan sampel dengan perlakuan MICP. Secara umum, kedua jenis sampel menunjukkan peningkatan kohesi seiring bertambahnya waktu inkubasi. Pada hari ke-0, kohesi awal tanah untreated berada pada 2,469 kPa, sedangkan sampel MICP memiliki nilai lebih tinggi yaitu 3,519 kPa. Setelah memasuki inkubasi 7 hari, kohesi tanah untreated meningkat menjadi 3,205 kPa, sementara nilai kohesi pada sampel MICP naik signifikan hingga mencapai 6,559 kPa. Pada inkubasi 14 hari, kenaikan kohesi terus berlanjut, dengan tanah untreated mencapai 4,049 kPa dan sampel MICP menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 10,794 kPa. Tren pada grafik menunjukkan bahwa sampel dengan perlakuan MICP konsisten menunjukkan nilai yang lebih besar daripada sampel untreated pada setiap tahap inkubasi.

### 3.3 Hubungan Sudut Geser dan Durasi Inkubasi



**Gambar 5.** Grafik Hubungan Kadar Air dan Sudut Geser

Gambar 5. di atas menunjukkan perubahan nilai sudut geser ( $\phi$ ) selama masa inkubasi untuk sampel untreated dan sampel dengan perlakuan MICP. Pada masa inkubasi 0 hari, sudut geser tanah untreated tercatat sebesar 2,588°, sedangkan sampel MICP memiliki nilai awal yang lebih tinggi, yaitu 9,084°. Pada masa inkubasi 7 hari, terjadi peningkatan yang cukup signifikan dengan sudut geser tanah untreated mencapai 15,143° dan sampel MICP meningkat

hingga 20,647°. Peningkatan nilai terus berlanjut pada masa inkubasi 14 hari, di mana sudut geser tanah untreated bertambah menjadi 17,103°, sementara sampel MICP mencapai nilai tertinggi sebesar 27,889°. Secara keseluruhan, grafik menunjukkan tren kenaikan sudut geser yang konsisten pada seluruh masa inkubasi, dengan sampel MICP tetap berada pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan sampel untreated pada setiap tahapan inkubasi.

### 3.4 ANOVA

Bagian ini menyajikan hasil analisis varians (ANOVA) yang digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh perlakuan terhadap parameter yang diamati dalam penelitian. ANOVA dipilih sebagai metode statistik untuk membandingkan perbedaan rata-rata antar kelompok, khususnya pada variasi waktu inkubasi dan perlakuan MICP terhadap karakteristik tanah. Melalui analisis ini, dapat diketahui apakah perbedaan yang terjadi bersifat signifikan secara statistik atau hanya disebabkan oleh variasi acak. Hasil pengujian ini selanjutnya menjadi dasar dalam menarik kesimpulan mengenai efektivitas perlakuan yang diberikan terhadap peningkatan sifat mekanik tanah.

**Tabel 1.** Hasil Analisis ANOVA pada Kohesi dan Sudut Geser

Durasi Inkubasi	<i>P-value</i>	
	$\phi$	<i>c</i>
0 Hari	0.00003941	0.000144709
7 Hari	0.000001683	0.00001194
14 Hari	0.00000055	0.00002778

Hasil analisis ANOVA pada Tabel 1. menunjukkan bahwa nilai *p-value* untuk parameter sudut geser ( $\phi$ ) dan kohesi (*c*) pada seluruh durasi inkubasi berada jauh di bawah batas signifikansi 0,05. Pada masa inkubasi 0 hari, *p-value* sudut geser sebesar 0,00003941 dan *p-value* kohesi sebesar 0,000144709. Nilai ini kembali menurun pada masa inkubasi 7 hari, yaitu 0,000001683 untuk sudut geser dan 0,00001194 untuk kohesi. Pada masa inkubasi 14 hari, *p-value* sudut geser mencapai 0,00000055 dan kohesi sebesar 0,00002778. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan nilai sudut geser dan kohesi antar kelompok perlakuan pada setiap durasi inkubasi secara statistik dinyatakan signifikan, ditunjukkan oleh *p-value* yang sangat kecil pada seluruh titik pengamatan.

### 3.5 Pembahasan

Grafik tegangan normal dan teggangan geser menunjukkan bahwa sampel MICP selalu menghasilkan tegangan geser puncak lebih tinggi dibandingkan sampel untreated pada seluruh tingkat tegangan normal. Pada inkubasi 0 hari, tegamngan geser MICP meningkat sekitar 50% dibandingkan untreated, menandakan adanya efek penguatan awal meskipun presipitasi CaCO<sub>3</sub> belum optimal. Pada

inkubasi 7 hari, peningkatan ini bertambah hingga 92%, sejalan dengan mulai efektifnya pembentukan kalsit yang memperkuat kontak antarpartikel. Pada inkubasi 14 hari, perbedaan menjadi paling dominan, dengan peningkatan tegangan geser mencapai 150% akibat sementasi CaCO<sub>3</sub> yang telah berkembang lebih stabil. Hasil tersebut lebih tinggi jika dibandingkan dengan temuan (Kannan et al., 2020), yang menyatakan peningkatan tegangan geser akibat perlakuan MICP Biostimulasi sebesar 147% setelah masa inkubasi 25 hari.

Nilai kohesi menunjukkan peningkatan pada seluruh durasi inkubasi untuk kedua kelompok sampel, namun peningkatan pada tanah MICP jauh lebih dominan dibandingkan tanah untreated. Pada inkubasi 0 hari, kohesi MICP tercatat 42% lebih tinggi dari nilai kohesi untreated, menunjukkan perbedaan awal yang sudah signifikan. Pada inkubasi 7 hari, kohesi tanah untreated meningkat 30% dari nilai awal, sedangkan kohesi tanah MICP meningkat 86%. Pada tahap ini, nilai kohesi MICP tercatat 145% lebih besar dibandingkan tanah untreated.

Pada inkubasi 14 hari, kohesi tanah untreated meningkat hingga 64% dari kondisi awal, sementara kohesi tanah MICP mengalami peningkatan yang jauh lebih besar, yaitu 207% dari nilai awalnya. Pada titik ini, kohesi MICP tercatat 167% lebih tinggi dibandingkan tanah untreated. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa durasi inkubasi berpengaruh langsung terhadap peningkatan kohesi tanah, dan sampel MICP menunjukkan peningkatan yang jauh lebih besar dibandingkan tanah tanpa perlakuan yang hanya bergantung pada penurunan kadar air selama masa inkubasi. Perbandingan dengan berbagai penelitian terdahulu mengonfirmasi bahwa tren peningkatan kohesi pada penelitian ini sesuai dengan karakteristik presipitasi CaCO<sub>3</sub> yang semakin efektif seiring lamanya waktu inkubasi (Chittoori et al., 2021; Tiwari et al., 2021b).

Durasi inkubasi menunjukkan pengaruh yang jelas terhadap peningkatan sudut geser pada kedua jenis sampel, dengan respons yang lebih dominan pada tanah MICP. Pada inkubasi 0 hari, sudut geser MICP memiliki nilai 251% lebih tinggi dibandingkan tanah untreated, menunjukkan perbedaan awal yang signifikan meskipun presipitasi CaCO<sub>3</sub> belum berkembang optimal.

Memasuki inkubasi 7 hari, peningkatan sudut geser tanah MICP mencapai 127% dari kondisi awalnya, sementara tanah untreated meningkat lebih besar secara persentase akibat perubahan struktur alami tanah selama inkubasi. Namun demikian, nilai sudut geser MICP pada hari ke-7 tetap 36% lebih tinggi dibandingkan nilai sudut geser tanah untreated. Tren ini sejalan dengan studi (Behzadipour, Ghezlbash, & Pakbaz, 2020), yang menyatakan bahwa presipitasi CaCO<sub>3</sub> memerlukan waktu inkubasi untuk berkembang sehingga parameter geser meningkat secara bertahap.

Pada inkubasi 14 hari, peningkatan sudut geser MICP mencapai 207% dari kondisi awal, sedangkan

tanah untreated tidak mengalami peningkatan berarti. Pada tahap ini, nilai sudut geser MICP tercatat 63% lebih tinggi dibandingkan tanah untreated. Peningkatan ini selaras dengan pola peningkatan kohesi yang telah dibahas sebelumnya, di mana perkembangan presipitasi  $\text{CaCO}_3$  selama masa inkubasi secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan parameter geser tanah, sebagaimana dilaporkan oleh (Tiwari et al., 2021b) dan (Chittoori et al., 2021). Secara keseluruhan, peningkatan sudut geser pada sampel MICP mengikuti pola yang sama dengan peningkatan kohesi, yaitu semakin tinggi durasi inkubasi semakin besar kontribusi proses biosementasi terhadap peningkatan parameter geser tanah dibandingkan tanah tanpa perlakuan.

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa durasi inkubasi memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kohesi dan sudut geser pada kedua kelompok sampel. Nilai *p-value* pada seluruh durasi inkubasi berada jauh di bawah batas signifikansi 0,05, yang berarti perbedaan nilai parameter geser antar-variasi perlakuan bersifat signifikan secara statistik. Pada inkubasi 0 hari, nilai *p-value* yang sangat kecil mengindikasikan bahwa perbedaan awal antara sampel untreated dan MICP sudah tercatat secara signifikan, sejalan dengan selisih nilai parameter geser yang terlihat pada grafik.

Nilai *p-value* yang semakin kecil pada inkubasi 7 dan 14 hari menunjukkan bahwa perbedaan antara kedua jenis sampel semakin menguat seiring bertambahnya durasi inkubasi. Pola ini konsisten dengan peningkatan persentase kohesi dan sudut geser yang jauh lebih besar pada sampel MICP dibandingkan sampel tanpa perlakuan. Temuan ini juga mendukung penjelasan sebelumnya bahwa proses biosementasi membutuhkan waktu untuk berkembang, sehingga perbedaan parameter geser antara kedua sampel semakin jelas pada periode inkubasi yang lebih panjang.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa perlakuan Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) secara konsisten meningkatkan parameter kuat geser tanah lempung. Presipitasi  $\text{CaCO}_3$  yang terbentuk selama proses inkubasi efektif memperkuat kontak antarpartikel, sehingga kohesi dan sudut geser meningkat signifikan pada seluruh durasi pengujian. Peningkatan kapasitas geser selama masa inkubasi pada sampel MICP juga lebih signifikan, sedangkan sampel untreated hanya mengalami peningkatan terbatas.

Hasil ANOVA menegaskan bahwa durasi inkubasi memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter geser, dengan nilai *p* yang berada jauh di bawah ambang 0,05 pada seluruh tahapan. Secara keseluruhan, MICP terbukti efektif sebagai metode stabilisasi tanah, memberikan peningkatan kuat geser yang substansial, serta menghasilkan kinerja yang lebih stabil terhadap perubahan kadar air dibandingkan tanah tanpa perlakuan.

Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi dalam memberikan bukti eksperimental mengenai pengaruh MICP biostimulasi terhadap peningkatan kohesi dan sudut geser pada lempung dengan variasi durasi inkubasi. Meskipun demikian, kajian ini masih terbatas pada analisis makroskopik tanpa verifikasi mikrostruktur  $\text{CaCO}_3$  dan belum mempertimbangkan parameter penting lain seperti plastisitas, permeabilitas, maupun variasi kondisi lapangan. Penelitian selanjutnya perlu memasukkan karakterisasi mikrostruktur (SEM-EDS/XRD), menambah parameter fisik-mekanik pendukung, dan melakukan uji dalam kondisi lingkungan yang lebih representatif untuk memastikan konsistensi kinerja MICP.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, G., Minaka, U. S., & Aprilianda, A. (2025). Karakteristik Parameter Kuat Geser Tanah pada Lereng Akibat Perubahan Kadar Air Tanah. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1), 174–188. <https://doi.org/10.28932/jts.v21i1.7509>
- Amalia, I., Hidayah, E., & Nurtjahjaningtyas, I. (2025). Analisis Stabilitas Lereng Wilayah Rawan Longsor di Gumintir Banyuwangi. *Jurnal Teknika*, 17(2), 119–124. <https://doi.org/10.30736/jt.v17i2.1286>
- Amini Kiasari, M., Pakbaz, M. S., & Ghezelbash, G. R. (2018). Increasing of Soil Urease Activity by Stimulation of Indigenous Bacteria and Investigation of Their Role on Shear Strength. *Geomicrobiology Journal*, 35(10), 821–828. <https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1476627>
- ASTM (C136/C136M). (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM International*, 3–7. Retrieved from [doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19)
- ASTM D 3080-03. (2003). Direct Shear Test of Soils Di Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International West Conshohocken, PA*, 04, 1–7.
- ASTM D 4318 –00. (2018). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 04, 1–14.
- Behzadipour, H., Ghezelbash, G. R., & Pakbaz, M. S. (2020). Effects of biocementation on strength parameters of silty and clayey sands. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 9(1), 24–32. <https://doi.org/10.1680/jbibr.19.00002>
- Braja M. Das and Khaled Sobhan. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, Ninth Edition. In *Cengage Learning* (ninth edit). Boston: Cengage Learning.
- 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>
- Deputi Bidang Klimatologi, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2024). *Catatan Iklim Dan Kualitas Udara Indonesia 2024*. Jakarta. Retrieved from [https://iklim.bmkg.go.id/bmkgadmin/storage/buletin/Catatan Iklim dan Kualitas Udara 2024 BMKG.pdf](https://iklim.bmkg.go.id/bmkgadmin/storage/buletin/Catatan%20Iklim%20dan%20Kualitas%20Udara%202024%20BMKG.pdf)
- Fatkhuroyan, Wati, T., & Kurniawan, R. (2021). Characteristic of Soil Moisture in Indonesia Using ESA CCI Satellites Products. *Indonesian Journal of Geography*, 53(1), 54–60. <https://doi.org/10.22146/IJG.43905>
- Ghadakpour, M., Choobasti, A. J., & Kutanaei, S. S. (2020). Experimental study of impact of cement treatment on the shear behavior of loess and clay. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5181-7>
- 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>
- Hauashdh, A., Radin Mohamed, R. M. S., Nagapan, S., Rahman, J. A., & Gamil, Y. (2024). Assessment of the environmental impacts of utilizing coal ashes and OPC for soil stabilization applications: Leachate analysis in response to rainfall interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 21(August), e03672. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03672>
- Hu, B., Hu, Q., Liu, Y., & Tao, G. (2024). Research on the Improvement of Granite Residual Soil Caused by Fly Ash and Its Slope Stability under Rainfall Conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/app14093734>
- 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), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003036](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003036)
- Jia Qin, Huan Cao, Yang Xu, Fei He, F. Z. and W. W. (2025). Efficient removal of Cr ( III ) by microbially induced calcium carbonate precipitation. *RSC Advances*, 2025(15), 2840–2849. <https://doi.org/10.1039/d4ra05829a>
- Kannan, K., Bindu, J., & Vinod, P. (2020). Engineering behaviour of MICP treated marine clays. *Marine Georesources and Geotechnology*, 38(7), 761–769. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1728791>
- Kurnia, D., Sarie, F., & Gandi, S. (2021). Pengaruh Penambahan Air Terhadap Kuat Geser. *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 4(2), 202–212.
- 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>
- 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(April 2019), 105389. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105389>
- 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>
- Payan, M., Sangdeh, M. K., Salimi, M., Ranjbar, P. Z., Arabani, M., & Hosseinpour, I. (2024). A comprehensive review on the application of microbially induced calcite precipitation ( MICP ) technique in soil erosion mitigation as a sustainable and environmentally friendly approach. *Results in Engineering*, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103235>
- Pusdatinkom BNPB. (2024). Buku Data Bencana Indonesia Tahun 2024. *PPDSI Pusdatinkom BNPB*, 1–166.
- Sarmiento, A. T., Figueredo, M., Cobo, M., & Proa, L. (2020). Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO 2 emissions capture in cement industry: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121457>
- 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. <https://doi.org/10.1155/2022/3089820>
- Tiwari, N., Satyam, N., & Sharma, M. (2021a). Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89687-2>
- Tiwari, N., Satyam, N., & Sharma, M. (2021b). Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89687-2>
- Valencia-Galindo, M., Sáez, E., Ovalle, C., & Obreque, J. (2025). Small strain stiffness degradation of MICP-treated sand and silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 199, 109606.

- <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109606>  
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>  
Wardani, M. K., Sari, P. T. K., & Refionasari, M. (2022). The Performance of Ca(OH)<sub>2</sub> to Reduce the Plasticity Index and Increase the Shear Strength Parameter for Expansive Soil. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 8(September), 237–244.  
<https://doi.org/10.22146/jcef.3455>