PENELITIAN MICROBIALLY INDUCE CALCITE PRECIPITATION PADA TANAH LEMPUNG BERLANAU SERTA PENGARUHNYA TERHADAP NILAI KUAT GESER

Wildan Bayu Saputra[1], Eding Iskak Imananto[2], dan Eri Andrian Yudianto[3]

[1]Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang
Email: wildanbayusaputra@gmail.com
[2] Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang
Email: edingiskak@yahoo.com
[3]Jurusan Teknik Sipill, ITN Malang
Email: eriandrianto@ftsp.itn.ac.id

ABSTRACT

This research was conducted to address the problem of low shear strength in silty clay soil, which often reduces construction stability. The main objective was to examine how Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) with different mixture variations could enhance the soil's physical and mechanical properties. The study specifically analyzed the influence of mixture percentages (4%, 6%, 8%, and 10%) and curing periods (3, 7, 14, and 28 days) on shear strength, cohesion, and plasticity index. Laboratory tests included the Plasticity Index (PI), Direct Shear Test, Triaxial Compression Test, and Unconfined Compressive Strength (UCS). Data analysis used the Two-Way ANOVA with Replications method, supported by soil mechanics theory and the concept of bioconsolidation through bacterial calcite precipitation. Findings revealed that MICP effectively improved soil properties, with the best performance achieved at 6%–8% mixtures combined with 28 days of curing. Under these conditions, the UCS reached 0.720 kgf/cm², Direct Shear 0.946 kgf/cm², and Triaxial cohesion 0.860 kgf/cm². However, higher dosage (10%) caused strength reduction due to saturation and uneven calcite distribution. Overall, MICP proved to be an effective technique for enhancing silty clay soil stability, provided the mixture composition and curing period are carefully controlled.

Keywords: Cohesion, Microbially Induce Calcite Precipitation, Silty Clay Soil, Soil Shear Strength, and Unconfined Compressive Strength.

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan rendahnya kuat geser tanah lempung berlanau yang dapat menurunkan kestabilan konstruksi. Tujuan utamanya adalah menganalisis bagaimana penerapan *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) dengan variasi campuran tertentu dapat meningkatkan sifat fisik dan mekanik tanah. Penelitian ini menguji pengaruh persentase campuran (4%, 6%, 8%, dan 10%) serta lama perawatan (3, 7, 14, dan 28 hari) terhadap nilai kuat geser, kohesi, dan indeks plastisitas. Uji laboratorium yang dilakukan meliputi *Plasticity Index* (PI), *Direct Shear Test*, *Triaxial Compression Test*, dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS). Analisis data menggunakan metode *Two-Way ANOVA with Replications*, dengan dasar teori mekanika tanah dan konsep biokonsolidasi melalui presipitasi kalsit oleh bakteri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MICP mampu memperbaiki sifat mekanik tanah secara signifikan, dengan hasil optimal pada campuran 6%–8% dan perawatan 28 hari. Pada kondisi tersebut, nilai UCS mencapai 0,720 kgf/cm², *Direct Shear* 0,946 kgf/cm², dan kohesi Triaxial 0,860 kgf/cm². Namun, dosis 10% justru menurunkan kekuatan akibat kejenuhan material dan distribusi kalsit yang tidak merata. Dengan demikian, MICP terbukti efektif meningkatkan kestabilan tanah lempung berlanau, meskipun komposisi campuran dan waktu perawatan harus diatur secara tepat.

Kata kunci: Kohesi, Kuat Geser Tanah, Microbially Induce Calcite Precipitation, Tanah Lempung Berlanau, dan Unconfined Compressive Strength.

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung berlanau memiliki daya dukung rendah, plastisitas tinggi, dan kepekaan terhadap perubahan kadar air, sehingga sering menimbulkan permasalahan pada kestabilan konstruksi seperti pondasi, timbunan, dan dinding penahan tanah. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan kekuatan geser dan kohesi yang berujung pada kerusakan struktur. Salah satu teknologi perbaikan tanah yang berkembang adalah *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), yaitu metode biokonsolidasi

yang memanfaatkan bakteri *Bacillus Subtilis* untuk mengendapkan kalsium karbonat ($CaCO_3$) di dalam pori tanah. Endapan ini mengisi celah antarpartikel, meningkatkan kepadatan, serta memperkuat ikatan butiran tanah. Penelitian terdahulu menunjukkan MICP dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan geser pada berbagai jenis tanah, namun efektivitasnya sangat bergantung pada variasi komposisi campuran dan lama pemeraman.

Berdasarkan hal tersebut, diperlukan kajian lanjutan pada tanah lempung berlanau untuk menentukan kombinasi dosis MICP dan waktu pemeraman yang paling optimal. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana pengaruh variasi persentase campuran MICP terhadap sifat fisik dan mekanik tanah lempung berlanau, dan (2) bagaimana pengaruh lama pemeraman terhadap peningkatan nilai kuat geser, kohesi, dan indeks plastisitas tanah. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh variasi campuran dan waktu pemeraman terhadap peningkatan sifat mekanik tanah serta menentukan kondisi optimal untuk meningkatkan kestabilan tanah lempung berlanau.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung Berlanau

Tanah lempung berlanau adalah campuran partikel lempung (*clay*) dan lanau (*silt*) dengan sifat geoteknik yang kompleks, di mana kekuatan geser, kohesi, dan stabilitasnya sangat dipengaruhi kadar air, distribusi butir, dan jenis mineral penyusunnya. Menurut Bowles (1996), tanah ini memiliki perilaku konsolidasi lambat dan kekuatan geser rendah tanpa pemadatan yang baik. Dalam kondisi basah, tanah mengembang dan menjadi lengket, sedangkan saat kering meudah retak dan mengeras, dengan volume pori besar yang menyebabkan berat isi sudut gesek rendah. Braja M. Das (2010) menjelaskan bahwa mineral utama seperti *kaolinit*, *illit*, dan *montmorillonit* berperan penting terhadap sifat ekspansif, permeabilitas, dan kohesi tanah. Berdasarkan klasifikasi USDA, jenis ini termasuk *silty clay* atau *silt loam* tergantung proporsi lempung dan lanau.

Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah dalam sistem USCS juga memiliki beberapa prosedur pekerjaan laboratorium sebagai berikut.

1. Analisis Saringan (*Sieve Analysis*)
   Pengujian ini dilakukan pada tanah berbutir kasar dengan mengayak sampel kering menggunakan saringan tertentu untuk menentukan distribusi ukuran partikel
2. Analisis Hidrometer (*Hydrometer Analysis*)
   Pengujian ini dilakukan pada tanah berbutir halus dengan melarutkan sampel dalam air bercampur NaOH, lalu mengukur berat jenis suspensi menggunakan hidrometer.
3. Batas Atterberg (*Atterbreg Limits*)
   Batas Atterberg meliputi uji LL (*Liquid Limit*), PL (*Plastic Limit*), dan SL (*Shrinkage Limit*). Pengujian tersebut digunakan untuk menentukan nilai *Plasticity Index* (PI).

Tabel 1. Hubungan Nilai Index Plastisitas dengan Jenis Tanah

PI (%)	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesi
<7	Plastis Rendah	Lanau	Kohesi Sebagian
7 – 17	Plastis Sedang	Lempung Berlanau	Kohesi
>7	Plastis Tinggi	Lempung	Kohesi

Kuat Geser Tanah

Menurut Das (2010) dalam bukunya *Principles of Geotechnical Engineering* (Edisi ketujuh), kekuatan geser tanah adalah resistensi internal per satuan luas terhadap keruntuhan atau deformasi, yang ditentukan oleh kohesi dan gesekan internal antar partikel. Teori *Mohr-Couloumb* adalah model linier untuk menentukan kuat geser tanah dari tegangan normal, sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), yang umum digunakan di mekanika tanah dan teknik sipil.

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi)$$

Keterangan:

τ = Kuat geser tanah (kN/m^2)

c = Kohesi (kN/m^2)

φ = Sudut geser dalam (derajat)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m2)

Microbially Induce Calcite Precipitation (MICP)

Microbially Induce Calcite Precipitation (MICP) adalah metode perbaikan tanah ramah lingkungan yang memanfaatkan bakteri *Bacillus Subtilis* untuk menghidrolisis urea menjadi ion karbonat (CO_3^{2-}), yang beraksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) membentuk endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) sehingga pori tanah terisi dan kohesi meningkat (Madigan & Martinko, 2005). Berikut ini reaksi yang terjadi.

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow (urease)\ NH_4^+ + CO_3^{2-}$$

$$CaCl_2 + H_2O \rightarrow CaO + HCl$$

$$CO_3^{2-} + Ca^2 + \rightarrow CaCO_3$$

Dengan:

$CO(NH_2)_2$	= Urea
H_2O	= Air
NH_4^+	= Ion Amonia
urease	= Enzim yang dihasilkan bakteri
CO_3^{2-}	= Ion Karbonat
$CaCl_2$	= Kalsium Klorida
Ca^{2+}	= Ion Kalsium
CaO	= Kalsium Oksida
HCl	= Asam Klorida
$CaCO_3$	= Kalsium Karbonat

Salah satu penerapannya, *bio-grouting*, menggunakan suspense $CaCO_3$ aktif untuk memperkuat tanah, dengan keberhasilan dipengaruhi ukuran butir dan permeabilitas (Das, 1995). Keunggulan MICP adalah kemampuannya meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah secara berkelanjutan tanpa bahan kimia sintetis.

Pengujian Laboratorium

Penelitian ini melakukan pengujian laboratorium pada sampel tanah lempung berlanau sebelum dan sesudah injeksi *Bacillus Subtilis*, mengikuti standar SNI atau ASTM yang telah dirangkum dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah (Shirley, 1994).

1. Kadar Air
   Didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air tanah da berat partikel padat tanah, biasanya dinyatakan dalam presentase. Untuk mendapatkan persentase nilai kadar air menggunakan rumus dibawah ini.

$$W\ (\%) = \frac{W2-W3}{W3-W1}\ x\ 100$$

   Keterangan:

   W = Kadar Air

   W_1 = Berat Cawan Kosong

   W_2 = Berat Cawan + Tanah Basah

   W_3 = Berat Cawan + Tanah Kering

2. Berat Jenis Tanah
   Salah satu parameter penting dalam ilmu geoteknik untuk menentukan sifat fisik tanah. Nilai berat jenis akan diperoleh melalui rumus dibawah ini.

$$G_s = \frac{W2-W1}{(W4-W1)-(W3-W2)}$$

   Keterangan:

   W_1 = Berat Piknometer Kosong

   W_2 = Berat Piknometer + Tanah Kering

   W_3 = Berat Piknometer + Tanah + Air

   W_4 = Berat Piknometer + Air

3. Batas Cair
   Salah satu metode dalam ilmu mekanika tanah yang digunakan untuk kadar air pada saat tanah berada dalam kondisi batas antara keadaan plastis dan cair.
4. Batas Plastis
   Salah satu pengujian laboratorium yang termasuk dalam bagian *atterberg test*, yamg mencakup pengujian batas cair dan batas penyusutan. Nilai index plastis akan diperoleh dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$PI = LL - PL$$

   Keterangan:

   PI : *Plasticity Index*

   LL : *Liqiud Limit*

   PL : *Plastic Limit*

5. Analisa Hidrometer
   Metode yang digunakan untuk menentukan distribusi partikel tanah halus (lempung dan lanau) yang tidak diukur melalui pengujian saringan.
6. *Unconfined Compressive Strength*
   Metode untuk menentukan kekuatan tanah tanpa tekanan lateral, yang sering diterapkan pada tanah kohesif seperti lempung.
7. *Direct Shear Test*
   Metode laboratorium yang digunakan untuk menentukan parameter geser tanah, seperti kohesi dan sudut geser dalam.

8. *Triaxial Compression Test*

   Metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan karakteristik mekanis tanah dengan mensimulasikan kondisi tegangan tiga arah.

Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian adalah pendekatan secara sistematis untuk merumuskan dan menguji hipotesis dalam suatu penelitian, hipotesis itu sendiri merupakan pernyataan sementara yang diajukan sebagai jawaban atau penjelasan terhadap masalah dalam penelitian (Sugiyono, 2023). Dalam penelitian ini, setelah hipotesis dan data ditetapkan, data dianalisis menggunakan uji F atau Anova Dua Arah (*Two Way Analysis of Variance*).

3. METODELOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang. Sampel tanah lempung berlanau diambil dari Kabupaten Malang, Jawa Timur. Variasi campuran *Bacillus Subtilis* yang digunakan adalah 4%, 6%, 8%, dan 10% dari berat tanah kering, dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari.

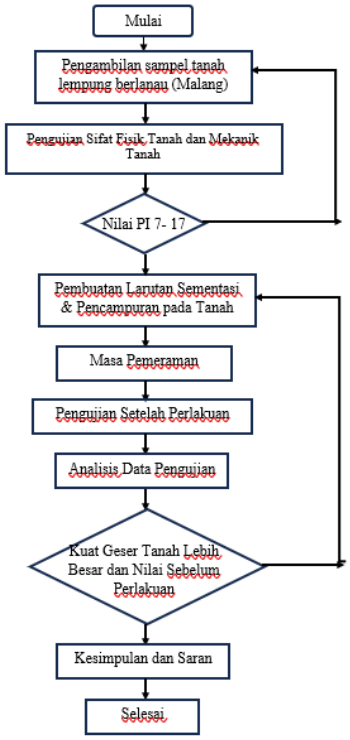
Alat dan Bahan

Bahan penelitian meliputi tanah lempung berlanau, kultur bakteri *Bacillus Subtilis*, urea ($CO(NH_2)_2$), kalsium klorida ($CaCl_2$), dan air. Peralatan yang digunakan antara lain oven, piknometer, hidrometer, perangkat batas cair dan bahan plastis, alat *Direct Shear*, *Triaxial Compression*, dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS).

Prosedur Pengujian

1. **Pengujian Awal –** Sampel tanah diuji sifat fisik (kadar air, berat jenis, batas Atterberg, analisis hidrometer) dan sifat mekanik (UCS, *Direct Shear*, *Triaxial UU*).
2. **Pembuatan Larutan Sementasi –** Mencampur urea dan $CaCl_2$ sesuai konsentrasi yang direncanakan.
3. **Pencampuran Bakteri dan Tanah –** Tanah kering dicampur dengan larutan bakteri dan larutan sementasi sesuai variasi.
4. **Pemeraman –** Sampel disimpan selama periode 3, 7, 14, dan 28 hari.
5. **Pengujian Setelah Perlakuan –** Dilakukan pengujian fisik dan mekanik yang sama seperti pengujian awal untuk membandingkan perubahan sifat tanah.

Bagan Alir



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah lempung berlanau diambil dari Kabupaten Malang, Jawa Timur, pada kedalaman 0,5 – 1,0 m dari permukaan tanah asli.



Gambar 2. Pengambilan Sampel Tanah di Kabupaten Malang

Pengujian Awal

Hasil pengujian fisik tanah menunjukkan bahwa sampel tanah ekspansif asal Kabupaten Tuban termasuk dalam klasifikasi lempung berplastisitas tinggi. Nilai batas Atterberg menunjukkan **batas cair (LL)** sebesar 42,73% dan **batas plastis (PL)** sebesar 25,15%, sehingga **indeks plastisitas (PI)** mencapai

17,5%. Lalu pada pengujian sifat mekanik tanah dengan parameter pengujian nilai kuat geser tanah maka berikut adalah hasil pengujiannya:

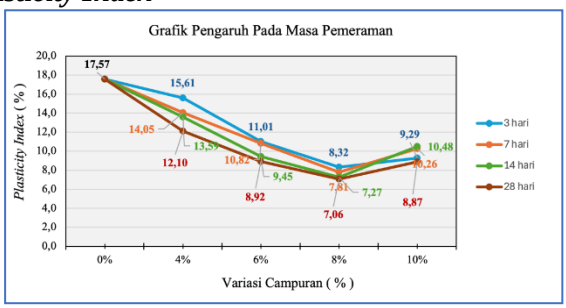
Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian	Kuat Geser Tanah
Direct Shear	0,461 Kgf/cm^2
Triaxial Compression UU	0,290 Kgf/cm^2
Unconfined Compressive Strength	0,325 Kgf/cm^2

Pengujian Setelah Perlakuan

Setelah perlakuan MICP menggunakan *Bacillus Subtilis* dengan variasi konsentrasi 4%, 6%, 8%, dan 10% serta masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari, terjadi perubahan signifikan pada sifat fisik dan mekanik tanah.

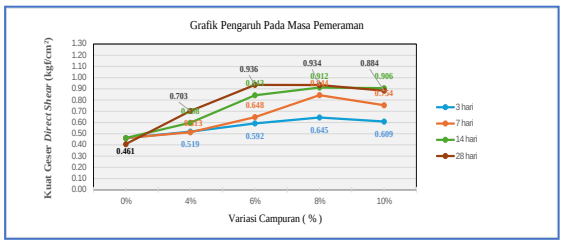
Plasticity Index



Gambar 3. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai PI

Grafik menunjukkan bahwa nilai *Plasticity Index* (PI) mengalami penurunan hingga variasi campuran 8%, mencapai nilai terendah **7,06%** pada hari ke-28. Namun, setelah melewati titik optimal di 8%, nilai PI kembali meningkat pada variasi 10%, dengan puncak mencapai **10,48%** pada hari ke-14. Kenaikan ini menunjukkan adanya kejenuhan bahan stabilisasi atau berkurangnya aktivitas biologis yang mengakibatkan degradasi ikatan tanah seiring berjalannya waktu. Secara umum, perubahan nilai PI selama masa pemeraman lebih dipengaruhi oleh interaksi antara reaksi kimia jangka panjang dan kestabilan aktivitas mikroba atau bahan aditif yang digunakan.

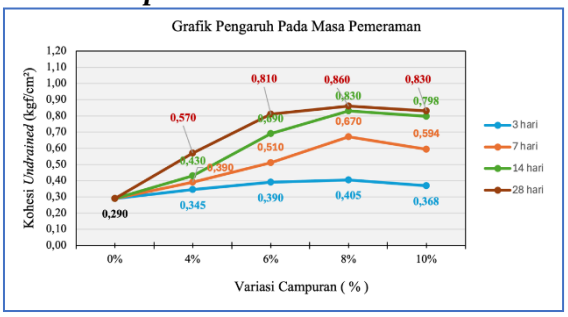
Direct Shear



Gambar 4. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Tegangan Geser

Grafik menunjukkan bahwa pada hasil *Direct Shear* (tegangan geser) meningkat hingga variasi campuran 6%, mencapai nilai tertinggi **0,936 kgf/cm²** pada hari ke-28, sebelum menurun pada variasi 8% dan 10%. Meskipun menggunakan bakteri yang sama, nilai tegangan geser bervariasi setiap hari karena tingkat kematangan struktur tanah hasil reaksi biologis dan fisik yang berkembang seiring waktu. Pada hari ke-3, tanah belum menunjukkan perubahan signifikan karena proses pengendapan kalsium karbonat belum optimal. Seiring berjalannya waktu, terutama pada hari ke-14 dan 28, struktur internal tanah menjadi lebih padat dan terkonsolidasi akibat akumulasi produk metabolit dan pertumbuhan koloni bakteri yang memperkuat ikatan antarpartikel. Penurunan pada variasi 8% dan 10% disebabkan tidak hanya oleh kelebihan campuran, tetapi juga oleh peningkatan kadar bahan aditif yang dapat menyebabkan kelebihan air atau porositas mikro, sehingga mengurangi tegangan geser tanah akibat gangguan pada keseragaman struktur mikro tanah.

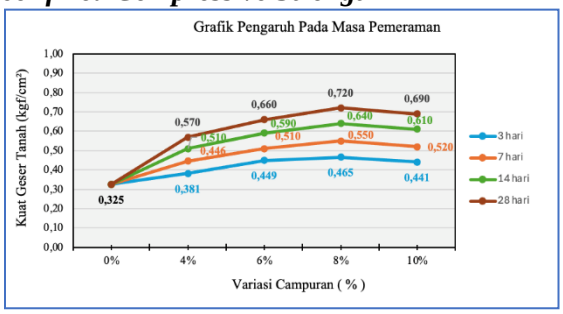
Triaxial Compression UU



Gambar 5. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Kohesi *Undrained*

Grafik menunjukkan peningkatan nilai uji *Triaxial Compression* (kohesi *undrained*) seiring dengan bertambahnya variasi campuran hingga 8%, mencapai puncaknya sebesar **0,860 kgf/cm²** pada hari ke-28, sebelum sedikit menurun pada campuran 10%. Meskipun bakteri yang digunakan tetap sama, perbedaan nilai antar hari disebabkan oleh proses hidrasi dan pemadatan tanah yang bervariasi seiring waktu. Pada hari ke-3, tanah belum cukup mengalami reaksi pencampuran dan pengikatan, sehingga kohesi masih rendah (**0,290 kgf/cm²**). Seiring berjalannya waktu, terutama pada hari ke-14 dan 28, tanah mengalami proses pemadatan alami dan penguatan ikatan antarpartikel akibat reaksi lanjutan antara material tanah, air, dan hasil aktivitas bakteri, sehingga kohesi meningkat. Penurunan pada variasi 10% terjadi karena kelebihan campuran yang menyebabkan ketidakseimbangan kadar air dan material, sehingga mengganggu konsistensi struktur tanah dan menurunkan kohesi.

Unconfined Compressive Strength



Gambar 6. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Kuat Geser Tanah

Grafik menunjukkan bahwa nilai kuat geser tanah pada uji UCS (*Unconfined Compression Strength*) meningkat seiring dengan bertambahnya variasi campuran hingga 8%, mencapai puncaknya sebesar **0,720 kgf/cm²** pada hari ke-28, sebelum sedikit menurun pada campuran 10%. Perbedaan nilai kuat geser antar hari, meskipun menggunakan bakteri yang sama, disebabkan oleh variasi aktivitas biologis bakteri di setiap tahap pemeraman. Pada hari ke-3, aktivitas bakteri masih rendah karena berada dalam fase adaptasi, sehingga kuat geser juga rendah (**0,325 kgf/cm²**). Seiring berjalannya waktu, terutama pada hari ke-14 dan 28, bakteri masuk ke fase aktif dan memproduksi senyawa pengikat seperti kalsium karbonat melalui proses *biocementation*, yang memperkuat ikatan antarpartikel tanah dan meningkatkan kuat geser. Namun, pada variasi campuran 10%, terjadi sedikit penurunan karena campuran melebihi dosis optimal, yang dapat menyebabkan struktur tanah menjadi kurang homogen dan mengurangi efektivitas ikatan antarpartikel.

Hasil Hipotesis Penelitian

Triaxial UU (Kohesi *Undrained*)

ANOVA Two-Factor With Replication

Dependent Variable: KohesiY

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	1.621[a]	15	.108	36.161	<.001	.944
Intercept	25.311	1	25.311	8467.784	<.001	.996
Bakteri	.533	3	.178	59.429	<.001	.848
Pemeraman	1.034	3	.345	115.330	<.001	.915
Bakteri * Pemeraman	.054	9	.006	2.016	.070	.362
Error	.096	32	.003			
Total	27.028	48				
Corrected Total	1.717	47				

a. R Squared = .944 (Adjusted R Squared = .918)

Gambar 7. Hasil *Two-Way ANOVA* pada Kohesi *Undrained* (*Triaxial UU*)

Hasil analisis ANOVA dua arah dengan replikasi terhadap data kohesi dari uji *triaxial compression UU* menunjukkan bahwa faktor persentase bakteri memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai kohesi (***F* = 59.429; *Sig.* < 0.001**), demikian pula dengan faktor masa pemeraman yang juga signifikan (***F* = 113.330; *Sig.* < 0.001**). Interaksi antara persentase bakteri dan masa pemeraman juga menunjukkan pengaruh yang signifikan (***F* = 2.016; Sig. = 0.070**). Nilai *Partial Eta Squared* mengindikasikan bahwa masa pemeraman memberikan kontribusi variasi terbesar terhadap kohesi (***η²* = 0.915**), diikuti oleh persentase bakteri (***η²* = 0.848**), sementara interaksi keduanya juga cukup signifikan (***η²* = 0.362**). Secara keseluruhan, model ini menjelaskan 94.4% variasi dalam data (***R²* = 0.918**), yang menunjukkan bahwa pengaruh gabungan kedua faktor terhadap peningkatan kohesi tanah sangat kuat dan signifikan. Maka semua **H_1** diterima dan **H_0** ditolak.

Direct Shear

ANOVA Two-Factor With Replication

Dependent Variable: Kohesi_Y

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	1.413[a]	15	.094	28.587	<.001	.931
Intercept	25.187	1	25.187	7641.154	<.001	.996
Bakteri	.436	3	.145	44.103	<.001	.805
Pemeraman	.893	3	.298	90.279	<.001	.894
Bakteri * Pemeraman	.085	9	.009	2.851	.014	.445
Error	.105	32	.003			
Total	26.705	48				
Corrected Total	1.519	47				

a. R Squared = .931 (Adjusted R Squared = .898)

Gambar 8. Hasil *Two-Way ANOVA* pada Tegangan Geser (*Direct Shear*)

Berdasarkan hasil uji ANOVA dua arah terhadap data uji *direct shear*, terungkap bahwa variasi bakteri dan lama pemeraman memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai kohesi tanah. Variasi bakteri menunjukkan pengaruh signifikan dengan nilai *F* sebesar **44.103** dan signifikansi < **0.001**, sedangkan lama pemeraman juga signifikan dengan nilai *F* sebesar **90.279** dan signifikansi < **0.001**. Interaksi antara bakteri dan pemeraman juga memberikan pengaruh signifikan terhadap kohesi, dengan nilai *F* sebesar **2.851** dan signifikansi **0.014**. Nilai *Partial Eta Squared* menunjukkan bahwa lama pemeraman memiliki pengaruh terbesar (**0.894**), diikuti oleh variasi bakteri (**0.805**), dan interaksi keduanya (**0.445**). Secara keseluruhan, model ini dapat menjelaskan 93,1% variasi nilai kohesi pada tanah berdasarkan nilai *R Squared* (**0.898**). Maka semua **H_1** diterima dan **H_0** ditolak.

Unconfined Compressive Strength

ANOVA Two-Way Factor Without Replication

Dependent Variable: Kohesi_Y

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	.147[a]	15	.010	.	.	1.000
Intercept	4.788	1	4.788	.	.	1.000
Bakteri	.029	3	.010	.	.	1.000
Pemeraman	.116	3	.039	.	.	1.000
Bakteri * Pemeraman	.002	9	.000	.	.	1.000
Error	.000	0	.			
Total	4.935	16				
Corrected Total	.147	15				

a. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = .)

Gambar 9. Hasil *Two-Way ANOVA* pada Kuat Geser Tanah (UCS)

Berdasarkan hasil *ANOVA Two-Way Factor* tanpa replikasi pada uji *Unconfined Compressive Strength*, nilai *Corrected Model* memiliki *Sum of Squares* sebesar **0.147** dengan *Mean Square* **0.010** dan derajat

bebas (*df*) **15**. Semua nilai *F* dan Signifikansi (*Sig*.) tidak tersedia (ditandai dengan titik), karena nilai *Error* adalah 0.000, sehingga perhitungan lebih lanjut tidak dapat dilakukan. Meskipun demikian, nilai *Partial Eta Squared* untuk seluruh sumber variasi (Bakteri, Pemeraman, dan interaksinya) tercatat sebesar 1.000, menunjukkan kontribusi maksimal terhadap total variasi. Namun, karena tidak ada nilai *F* dan *Sig*., tidak dapat disimpulkan secara statistik apakah pengaruhnya signifikan atau tidak.

5. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, berikut ini beberapa hal yang dapat disimpulkan:

1. Penerapan metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) secara signifikan mengubah karakteristik fisik tanah lempung berlanau dengan menurunkan tingkat plastisitasnya, yang terlihat dari penurunan nilai Indeks Plastisitas (PI). Penurunan yang paling optimal biasanya terjadi pada campuran 8%, yang mencapai nilai PI terendah sekitar 7,06% pada hari ke-28 dari nilai awal 17,57% tanpa perlakuan, menunjukkan penurunan sekitar 60%. Meskipun dalam beberapa kasus terdapat sedikit peningkatan PI pada campuran 10%, pengurangan plastisitas ini berkorelasi positif dengan peningkatan sifat mekanik tanah.
2. MICP terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan geser tanah lempung berlanau melalui proses biomineralisasi yang mengikat partikel tanah. Efektivitas ini terlihat dari peningkatan signifikan dalam nilai kuat geser dari berbagai pengujian: *Unconfined Compressive Strength* (UCS) mencapai puncak 0,720 kgf/cm² pada campuran 8% di hari ke-28 (naik dari 0,441 kgf/cm² tanpa perlakuan di hari ke-3, meningkat sekitar 63,3%), *Direct Shear* mencapai 0,936 kgf/cm² pada campuran 6% di hari ke-28, dan *Triaxial Compression* (kohesi *undrained*) mencapai 0,860 kgf/cm² pada campuran 8% di hari ke-28, menegaskan kemampuan MICP untuk secara substansial memperbaiki daya dukung dan stabilitas tanah.
3. Penerapan MICP secara konsisten dan signifikan meningkatkan nilai kuat geser tanah lempung berlanau seiring dengan bertambahnya persentase campuran dan durasi pemeraman. Peningkatan ini paling optimal terjadi pada variasi campuran antara 6% hingga 8%, mencapai puncaknya pada hari ke-28 pemeraman. Hal ini terlihat dari kenaikan *Unconfined Compressive Strength* (UCS) hingga 0,720 kgf/cm² pada campuran 8% (peningkatan sekitar 63,3%), tegangan geser (*Direct Shear*) hingga 0,946 kgf/cm² pada campuran 6% (peningkatan sekitar 132,4%), dan kohesi undrained (*Triaxial Compression*) hingga 0,860 kgf/cm² pada campuran 8%. Ini menunjukkan bahwa MICP berhasil meningkatkan daya dukung dan stabilitas tanah secara efektif dengan membentuk ikatan kalsium karbonat antarpartikel tanah.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, berikut beberapa saran untuk penelitian lebih lanjut:

1. Perluasan studi pada jenis tanah yang berbeda, seperti tanah berpasir, tanah gambut, atau tanah residu, untuk mengetahui batasan dan potensi penerapan metode MICP dalam kondisi geoteknik yang lebih beragam.
2. Diperlukan pengujian di lapangan (*in-situ*) untuk menguji validitas dan efektivitas proses MICP di luar laboratorium, serta melihat pengaruh faktor lingkungan secara langsung terhadap hasil penguatan tanah.
3. Pengamatan mikrostruktur dan mineralogi perlu dilakukan menggunakan alat seperti SEM (*Scanning Electron Microscope*) atau XRD (*X-ray Diffraction*) untuk secara visual dan mineralogis mengonfirmasi keberadaan serta penyebaran kalsium karbonat ($CaCO_3$) dalam pori-pori tanah.
4. Penting untuk melakukan evaluasi jangka panjang guna meninjau ketahanan hasil pengendapan $CaCO_3$ terhadap kondisi lingkungan, seperti siklus basah-kering, perubahan suhu, demi memastikan kestabilan tanah yang telah diperbaiki.

DAFTAR PUSTAKA

Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (Vol. 5th Edition). (P. Silaban, Trans.) McGraw-Hill.

Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah Jilid I.* (N. Endah, & I. B. Mochtar, Trans.) Penerbit Erlangga.

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). (N. E. Mochtar, & I. S. Mochtar, Trans.) Stamford: Cengage Learning.

Ir. Shirley LH. (1994). *Penuntun Praktis Geoteknik dan Mekanika Tanah: Penyelidikan Lapangan dan Laboratorium.* Bandung: Nova, Bandung.

Madigan, M. T., & Martinko, J. (2005). *Brock Biology of Microorganisms* (11th Edition ed.). (L. R. Parsaulian, Trans.) Lebanon: Englewood Cliff: Prentice Hall.

Sugiyono, D. (2023). *Statistika untuk Penelitian.* Penerbit Alfabeta.