PENERAPAN MICROBIALLY INDUCED CALCITE PRECIPITATION PADA TANAH EKSPANSIF SERTA PENGARUHNYA TERHADAP NILAI KUAT GESER TANAH

Aditiya Affandi[1], Eding Iskak Imananto[2], dan Eri Andrian Yudianto[3]

[1]*Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Bend. Sengguruh No.15 Malang*
Email: Aditiyaaffandi@gmail.com
[2] *Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang,Jl. Parikesit 45 Malang*
Email: abdulgani@yahoo.co.id
[3]*Prodi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Sekip 10, Semarang*
Email: supriyadi@ymail.com

ABSTRACT

Expansive clay soils exhibit high shrink–swell potential due to fluctuations in moisture content, which can compromise the stability and safety of civil engineering structures. One environmentally friendly ground improvement technology is *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), utilizing *Bacillus subtilis* bacteria to biologically produce calcium carbonate ($CaCO_3$) precipitates that enhance the physical and mechanical properties of soils. This study aims to evaluate the effects of varying bacterial content (3%, 6%, 9%, and 12% by dry soil weight) and curing periods (3, 7, 14, and 28 days) on the physical characteristics and shear strength of expansive clay soils. Laboratory tests included specific gravity, hydrometer analysis, liquid limit (LL), plastic limit (PL), plasticity index (PI), and mechanical tests such as *Direct Shear*, *Unconsolidated Undrained Triaxial Compression* (UU), and *Unconfined Compressive Strength* (UCS). The results indicate that MICP treatment significantly reduced PI values and enhanced shear strength parameters, including cohesion and internal friction angle. The highest improvement was achieved with 12% bacterial content and 28 days of curing, producing the greatest increase in cohesion and shear strength compared to other variations. These findings demonstrate that MICP is an effective method for improving expansive clay soils by simultaneously increasing shear strength and reducing shrink–swell potential, making it a promising solution for construction projects in regions with similar problematic soil conditions.

Keywords: *Bacillus subtilis*, Expansive Clay Soils, *Microbially Induced Calcite Precipitation*.

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang-susut tinggi akibat perubahan kadar air, yang dapat mengganggu stabilitas dan keamanan konstruksi. Salah satu teknologi perbaikan tanah yang ramah lingkungan adalah *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) dengan memanfaatkan bakteri *Bacillus subtilis* yang mampu menghasilkan endapan kalsit ($CaCO_3$) melalui proses biologis, sehingga memperbaiki sifat fisik dan mekanis tanah. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi kadar campuran bakteri (3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat tanah kering) dan lama pemeraman (3, 7, 14, dan 28 hari) terhadap sifat fisik dan kuat geser tanah lempung ekspansif. Pengujian dilakukan di laboratorium meliputi berat jenis, analisis hidrometer, batas cair (LL), batas plastis (PL), indeks plastisitas (PI), serta uji mekanis *Direct Shear*, *Triaxial Compression* (UU), dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan MICP secara signifikan menurunkan nilai PI dan meningkatkan parameter kuat geser seperti kohesi dan sudut geser dalam. Peningkatan optimal terjadi pada campuran bakteri 12% dengan masa pemeraman 28 hari, yang memberikan peningkatan kohesi dan kekuatan geser terbesar dibandingkan variasi lain. Temuan ini membuktikan bahwa MICP efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah lempung ekspansif sekaligus mengurangi potensi kembang-susut, sehingga berpotensi diaplikasikan secara luas pada proyek konstruksi di wilayah dengan permasalahan tanah serupa.

Kata kunci: *Bacillus subtilis*, *Microbially Induced Calcite Precipitation*, Tanah lempung ekspansif

1. PENDAHULUAN

Tanah ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang memiliki potensi kembang-susut tinggi akibat perubahan kadar air, sehingga berisiko menimbulkan kerusakan pada infrastruktur seperti fondasi bangunan, jalan raya, dan saluran irigasi. Perubahan

volume yang signifikan pada tanah ini sering menurunkan stabilitas dan daya dukung tanah, sehingga diperlukan metode perbaikan yang efektif dan ramah lingkungan.

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) merupakan teknologi inovatif dalam bidang geoteknik yang memanfaatkan bakteri penghasil enzim urease, seperti *Bacillus subtilis*, untuk menginduksi pengendapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) di dalam tanah. Endapan ini berfungsi sebagai pengikat antarpartikel tanah, sehingga dapat mengurangi ekspansivitas dan meningkatkan kuat geser. MICP telah banyak diteliti pada berbagai jenis tanah, namun studi mengenai penerapannya pada tanah ekspansif di Indonesia, khususnya terhadap perubahan parameter kuat geser, masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh MICP menggunakan *Bacillus subtilis* terhadap sifat fisik dan mekanik tanah ekspansif dari Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Variasi konsentrasi bakteri (3%, 6%, 9%, dan 12%) serta masa pemeraman (3, 7, 14, dan 28 hari) diuji melalui serangkaian pengujian laboratorium, termasuk *Direct Shear Test*, *Triaxial Compression Test*, dan *Unconfined Compressive Strength*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode perbaikan tanah yang berkelanjutan dan efektif untuk mengatasi permasalahan tanah ekspansif di Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif adalah jenis tanah yang memiliki potensi besar untuk mengembang ketika jenuh air dan menyusut saat mengering. Perilaku ini disebabkan oleh adanya mineral lempung tertentu, terutama *montmorillonite*, yang memiliki kemampuan menyerap air dan mengalami perubahan volume signifikan.

Karakteristik utama tanah ekspansif:

- Kembang susut tinggi akibat perubahan kadar air.
- Banyak ditemukan di daerah beriklim kering dan semi-kering, namun di Indonesia juga tersebar di wilayah yang memiliki perbedaan musim hujan dan kemarau yang jelas.
- Potensi ekspansi dapat mengakibatkan kerusakan pada infrastruktur seperti jalan, fondasi bangunan, dan saluran irigasi..

Potensi ekspansi tanah dapat diidentifikasi melalui **Plasticity Index (PI)** yang diperoleh dari uji batas cair (*Liquid Limit*, LL) dan batas plastis (*Plastic Limit*, PL). Nilai PI dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat ekspansivitas tanah.

$$PI = LL - PL$$

dimana:
PI = *Plasticity Index*

LL = *Liquid Limit*

PL = *Plastic Limit*

Tabel 1. Potensi Ekspansi tanah Berdasar Nilai PI

Plasticity Index (%)	Expansion Potential
0–15	Low
0–35	Medium
20–55	High
> 35	Very high

Nilai Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan geseran antarpartikel tanah akibat gaya eksternal sebelum mengalami deformasi atau kegagalan geser. Parameter ini sangat penting dalam mekanika tanah dan rekayasa geoteknik karena menentukan stabilitas lereng, daya dukung pondasi, dan perilaku tanah di bawah beban. Secara umum kuat geser tanah dimodelkan dengan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb:

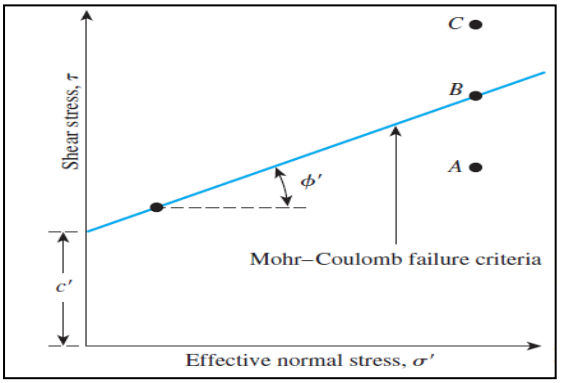
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

dimana:
τ = Kuat geser tanah

c = Kohesi

ϕ = Sudut geser dalam

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh



Gambar 1. Hukum Keruntuhan Mohr

Tanah berbutir kasar umumnya memiliki sudut geser dalam tinggi (30°–45°) dengan kohesi rendah, sedangkan tanah berbutir halus memiliki sudut geser dalam rendah (< 30°) dengan kohesi tinggi. Pengukuran parameter kuat geser dilakukan melalui *Direct Shear Test*, *Triaxial Compression Test*, dan

Unconfined Compressive Strength sesuai standar pengujian geoteknik.

Microbially Induced Calcite Precipitation

MICP merupakan metode perbaikan tanah ramah lingkungan yang memanfaatkan bakteri penghasil enzim urease untuk menghidrolisis urea, menghasilkan ion karbonat (CO_3^{2-}) yang bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) membentuk endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$). Endapan ini berfungsi mengikat partikel tanah, meningkatkan kepadatan, mengurangi porositas, serta memperbaiki sifat mekanik seperti kuat geser dan daya dukung.

Bacillus subtilis adalah bakteri Gram-positif berbentuk batang yang dapat membentuk endospora, sehingga tahan terhadap kondisi ekstrem. Bakteri ini dapat hidup aerob maupun anaerob, banyak ditemukan di lapisan tanah atas (0–30 cm) dan di sekitar rizosfer tanaman. Pada proses MICP, *B. subtilis* memproduksi enzim urease yang menghidrolisis urea menjadi ion karbonat dan amonia:

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

$$CO_32- + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3$$

dimana:

$CO(NH_2)_2$ = Urea

H_2O = Air

NH_4^+ = Amonia

CO_3^{2-} = Ion Karbonat

Ca^{2+} = Ion Kalsium

$CaCO_3$ = Kalsium Karbonat

3. METEDOLOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang. Sampel tanah ekspansif diambil dari Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Variasi campuran *Bacillus subtilis* yang digunakan adalah 3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat tanah kering, dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari.

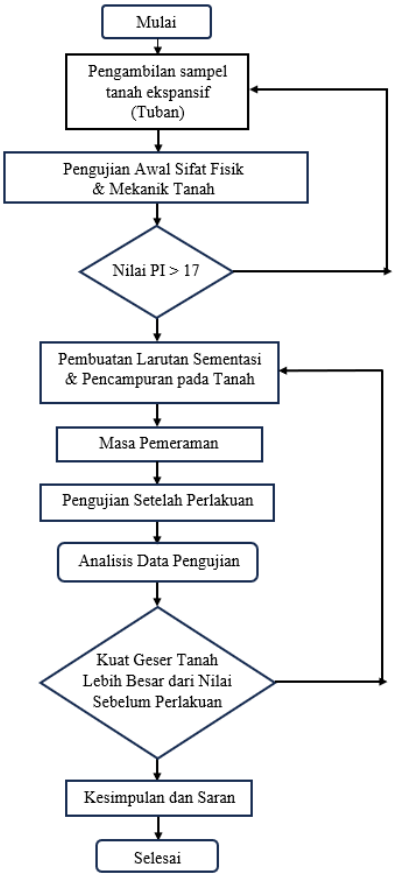
Alat dan Bahan

Bahan penelitian meliputi tanah ekspansif, 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 batas plastis, alat *Direct Shear*, *Triaxial Compression*, dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS).

Prosedur Pengujian

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

Bagan Alir



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah ekspansif diambil dari Kabupaten Tuban, Jawa Timur, pada kedalaman 0,5 – 1,0 m dari permukaan tanah asli. Kabupaten Tuban dipilih sebagai lokasi pengambilan sampel karena memiliki perbedaan musim hujan dan kemarau yang jelas, yang menyebabkan fluktuasi kadar air tanah cukup signifikan.



Gambar 3. Pengambilan Sampel Tanah Ekspansif

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 70,54% dan **batas plastis (PL)** sebesar 31,50%, sehingga **indeks plastisitas (PI)** mencapai 39,05%, mengindikasikan potensi kembang-susut tinggi (*highly expansive*). 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	0,543 Kgf/cm^2
Triaxial Compression UU	0,270 Kgf/cm^2
Unconfined Compressive Strength	0,506 Kgf/cm^2

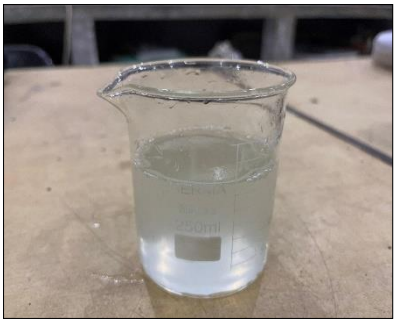
Pembuatan Larutan Sementasi

Larutan sementasi merupakan larutan campuran daru tiga komponen utama yaitu bakteri *Bacillus subtillis*, kalsium klorida ($CaCl_2$) dan urea ($CO(NH_2)_2$), dengan komposisi sebagai berikut :

Tabel 3. Komponen Larutan Sementasi

Komponen Campuran	Kebutuhan
***Bacillus subtillis* (ml)**	50
Kalsium klorida (gr)	150
Urea (gr)	100

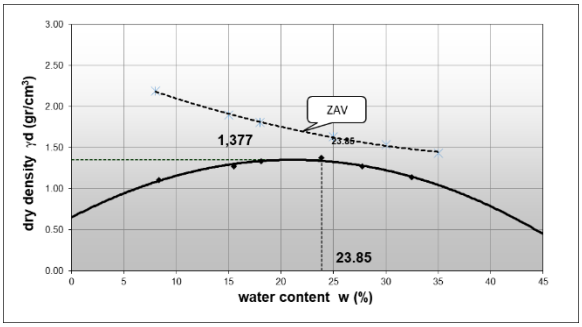
Nantinya Ketiga campuran tersebut akan dicampurkan menjadi satu dan disaring lalu didiamkan agar ketiga komponen tersebut saling bereaksi satu sama lain



Gambar 4. Larutan Sementasi

Pencampuran Dengan Sampel Tanah

Setelah diperoleh larutan sementasi, tahap berikutnya ialah pencampuran larutan tersebut pada sampel tanah, pada proses ini dilakukan uji standart proctor guna mengetahui berat isi kering (γd), kadar air optimum, kebutuhan air kondisi optimum dan kebutuhan tanah.



Gambar 5. Hasil Uji Pemadatan Standar (*Standart Proctor*)

Dengan:

Tabel 4. Hasil Uji Pemadatan Standar (*Standart Proctor*)

Kebutuhan Air	**950 ml**
Kebutuhan Tanah.	1570 gr
Berat Isi Kering (Γd)	1,377 gr/cm^3
Kadar Air Optimum	23,85 %

Lalu dengan konsentrasi larutan yang sudah direncanakan (3%, 6%, 9%, 12%) nantinya kebutuhan tiap konsentrasi akan diketahui dengan mengalikannya pada kebutuhan air pada uji pemadatan standar.

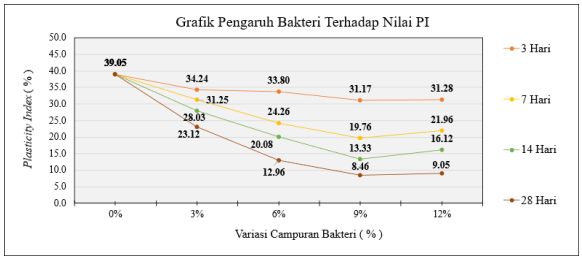
Tabel 5. Kebutuhan Larutan Sementasi

Konsentrasi Rencana	Kebutuhan Air	Kebutuhan Larutan Sementasi
3%	950 ml	28,5 ml
6%	950 ml	57 ml
9%	950 ml	85,5 ml
12%	950 ml	114 ml

Pengujian Setelah Perlakuan

Setelah perlakuan MICP menggunakan *Bacillus subtilis* dengan variasi konsentrasi 3%, 6%, 9%, dan 12% serta masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari, terjadi perubahan signifikan pada sifat fisik dan mekanik tanah.

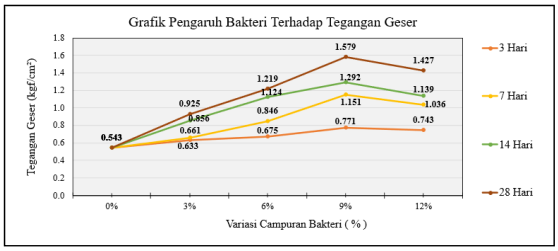
Plasticity Index



Gambar 6. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai PI

Berdasarkan hasil pengujian, nilai PI pada sampel kontrol (tanpa campuran bakteri) adalah **39,05%**. Penurunan PI paling signifikan terjadi pada masa pemeraman 28 hari dengan variasi campuran bakteri 9%, yaitu menjadi **8,46%** atau mengalami penurunan sebesar **78,34%** dari nilai kontrol. Pada variasi campuran 12%, nilai PI sedikit meningkat menjadi **9,05%**, sehingga penurunan terhadap nilai kontrol menjadi **76,82%**.

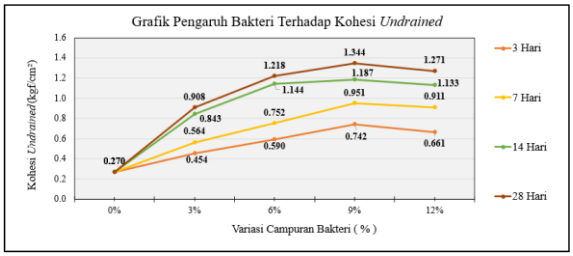
Direct Shear



Gambar 7. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Tegangan Geser

Nilai tegangan geser maksimum pada sampel kontrol (tanpa campuran bakteri) mengalami peningkatan signifikan setelah perlakuan MICP. Tegangan geser tertinggi tercatat sebesar **1,579 kgf/cm²** dengan sudut geser dalam (ϕ) **25,5°** dan kohesi (*c*) **1,453 kgf/cm²** pada masa pemeraman 28 hari dengan variasi campuran bakteri 9%, atau meningkat sebesar **65,61%** dibandingkan nilai kontrol.

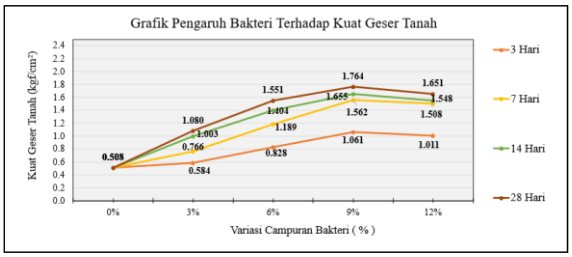
Triaxial Compression UU



Gambar 8. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Kohesi *Undrained*

Pengujian *Triaxial UU* menunjukkan bahwa nilai kohesi undrained (cuc_ucu) pada sampel kontrol sebesar **0,270 kgf/cm²** mengalami peningkatan signifikan setelah perlakuan MICP. Peningkatan tertinggi dicapai pada masa pemeraman 28 hari dengan variasi campuran bakteri 9%, yaitu menjadi **1,344 kgf/cm²**, atau setara dengan kenaikan **79,89%** dari nilai kontrol.

Unconfined Compressive Strength



Gambar 9. Grafik Pengaruh Bakteri Terhadap Nilai Kuat Geser Tanah

Hasil pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) menunjukkan bahwa nilai UCS pada sampel kontrol sebesar **0,507 kgf/cm²** mengalami peningkatan optimal pada masa pemeraman 28 hari dengan variasi campuran bakteri 9%, yaitu mencapai **1,764 kgf/cm²** atau meningkat sebesar **69,22%** dari nilai kontrol.

Perubahan nilai PI, parameter kuat geser (*direct shear*, *triaxial UU* dan *Unconfined Compressive Strength*), secara konsisten dipengaruhi oleh aktivitas bakteri *Bacillus subtilis* dalam proses MICP. Bakteri ini menghasilkan endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang mengisi pori tanah, menyebabkan penggumpalan butiran, dan memperkuat ikatan antarpartikel. Akibatnya, gesekan internal meningkat, struktur tanah menjadi lebih rapat, dan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser maupun beban tekan bebas bertambah signifikan.

Hasil Uji Hipotesis (*Two-Way ANOVA*)

Uji hipotesi ini dibantu dengan software *excel* dimana variabel independen faktor A adalah variasi campuran (3%, 6%, 9% dan 12%) dan masa pemeraman (3, 7, 14, dan 28 Hari) sebagai faktor B serta nilai kuat geser tanah sebagai variabel dependen, didapat hasil pengujian sebagai berikut:

ANOVA Two-Factor With Replication

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Sample (A)	0.911436	3	0.303812	429.9228	6.36E-26	3.29
Columns (B)	2.467458	3	0.822486	1163.895	9.84E-33	3.29
Interaction (AxB)	0.057936	9	0.006437	9.109447	1.13E-06	2.19
Within (Error)	0.022613	32	0.000707			
Total	3.459444	47				

Gambar 10. Hasil Uji ANOVA dua arah pada *Triaxial Compression UU*

Pada Uji *Triaxial Compression UU*, Dapat disimpulkan karena faktor A 429,92 > 3,29, faktor B 1163,9 > 3,29 serta Interaksi AxB 9,10 > 2,19, maka semua $\mathbf{H_1}$ diterima dan $\mathbf{H_0}$ ditolak.

ANOVA Two-Factor With Replication

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Sample (A)	1.211053	3	0.403684	126.1389	8.29E-18	3.29
Columns (B)	2.044772	3	0.681591	212.9761	3.24E-21	3.29
Interaction (AxB)	0.279405	9	0.031045	9.700607	5.77E-07	2.19
Within (Error)	0.10241	32	0.0032			
Total	3.63764	47				

Gambar 11. Hasil Uji ANOVA dua arah pada *Direct Shear*

Lalu Uji *Direct Shear*, Dapat disimpulkan karena faktor A 126,14 > 3,29, faktor B 212,98 > 3,29 serta Interaksi AxB 9,70 > 2,19, maka semua $\mathbf{H_1}$ diterima dan $\mathbf{H_0}$ ditolak.

ANOVA Two-Factor Without Replication

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Rows (A)	1.012689	3	0.337563	68.33862	1.63E-06	3.862548
Columns (B)	0.939573	3	0.313191	63.40458	2.25E-06	3.862548
Error	0.044456	9	0.00494			
Total	1.996717	15				

Gambar 12. Hasil Uji ANOVA dua arah pada *Unconfined Compressive Strength*

Terakhir, pada Uji *Unconfined Comprresive Strength*, Dapat disimpulkan karena faktor A 68,34 > 3,86, faktor B 63,40 > 3,86 dan tanpa replikasi, maka semua $\mathbf{H_1}$ diterima dan $\mathbf{H_0}$ ditolak.

5. KESIMPULAN

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

1. Penerapan teknologi MICP dengan *Bacillus subtilis* terbukti meningkatkan kuat geser tanah ekspansif secara signifikan. Hasil uji *Direct Shear*, *Triaxial UU*, dan UCS menunjukkan peningkatan nilai kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tekan bebas dibandingkan kondisi kontrol, sedangkan uji sifat fisik menunjukkan penurunan indeks plastisitas (PI).
2. Mekanisme perbaikan terjadi melalui pengendapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) hasil aktivitas bakteri, yang berfungsi sebagai semen alami antarpartikel tanah, mengurangi porositas, dan memperkuat struktur tanah.
3. Variasi campuran bakteri dan masa pemeraman berpengaruh signifikan terhadap hasil akhir. Nilai PI awal sebesar 39,05% dapat diturunkan hingga 8,46% (penurunan 78,34%) pada campuran 9% dengan pemeraman 28 hari. Peningkatan tertinggi pada parameter mekanik terjadi pada kondisi yang sama, yaitu tegangan geser maksimum naik 65,61%, kohesi *undrained* naik 79,89%, dan UCS naik 69,22% dari nilai kontrol.

DAFTAR PUSTAKA (DAN PENULISAN PUSTAKA)

Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. (Eds.). (2006). *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment*.

Braja, M. D., Noor, T. E., & Indrasurya, B. M. (1998). *Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis*).

Das, B. M., & Sobhan, K. (1990). *Principles of geotechnical engineering eight edition*.

Hardiyatmo, H. C. (2010). *Mekanika_Tanah_II_H_C_Hardiyatmo* (Vol. 3).

Li, L., Liu, S., Wen, K., & Lu, X. (Eds.). (2025). *The Immersion Method for Microbially Induced Calcite Precipitation:: Applications for Sustainability*. CRC Press.