PENGARUH PENAMBAHAN MICROBIALLY INDUCED CALCITE PRECIPITATION DAN ABU SEKAM PADI TERHADAP FISIK DAN KUAT GESER TANH LEMPUNG EKSPANSIF

Khofim Eka Ardinata[1], Eding Iskak Imananto[2], dan Eri Andrian Yudianto[3]

[1]Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No. 2, Malang
Email: khofimekaardinata23@gmail.com
[2] Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No. 2, Malang
Email: edingiskak@yahoo.com
[3]Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. Sigura-Gura No. 2, Malang
Email: eriandrianto@ftsp.itn.ac.id

ABSTRACT

Expansive clay soils present significant challenges in civil engineering due to their high shrink-swell potential, which can cause structural damage. This study investigates the combined effect of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) at 9% optimum concentration and Rice Husk Ash (RHA) at variations of 7%, 10%, 12%, and 15% on the physical properties and shear strength of expansive clay soils from Widang District, Tuban Regency, East Java. Laboratory tests included physical properties (water content, specific gravity, hydrometer analysis, Atterberg limits) and mechanical properties (Unconfined Compressive Strength, Direct Shear, and Triaxial Compression UU) with curing periods of 3, 7, 14, and 28 days. The results showed significant improvements across all parameters. The optimum condition was achieved at 9% MICP + 12% RHA with 28 days curing, yielding a reduction in Plasticity Index (PI) from 40.78% to 6.86% (83.18% reduction), indicating transformation from highly expansive to non-expansive soil. Shear strength parameters also improved substantially: Undrained Shear Strength (Su) increased from 0.511 to 1.994 kgf/cm² (74.37% increase), cohesion (c) from 0.276 to 1.469 kgf/cm² (81.21% increase), and internal friction angle (φ) from 2.18° to 3.86° (43.52% increase). Two-Way ANOVA analysis confirmed that both RHA percentage and curing period significantly affect soil improvement. This research demonstrates that the combination of MICP and RHA offers an effective, economical, and environmentally friendly solution for stabilizing expansive clay soils while utilizing agricultural waste.

Keywords: *Bacillus subtilis, Expansive Clay Soil, Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), Rice Husk Ash (RHA), Plasticity Index, Shear Strength.*

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang-susut tinggi akibat perubahan kadar air, yang dapat mengganggu stabilitas dan keamanan konstruksi. Penelitian ini mengkaji pengaruh kombinasi *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) pada konsentrasi optimum 9% dan Abu Sekam Padi (ASP) dengan variasi 7%, 10%, 12%, dan 15% terhadap sifat fisik dan kuat geser tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Pengujian laboratorium meliputi sifat fisik (kadar air, berat jenis, analisis hidrometer, batas Atterberg) dan sifat mekanik (*Unconfined Compressive Strength*, *Direct Shear*, dan *Triaxial Compression* UU) dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan pada seluruh parameter. Kondisi optimum dicapai pada campuran MICP 9% + ASP 12% dengan pemeraman 28 hari, menghasilkan penurunan Indeks Plastisitas (PI) dari 40,78% menjadi 6,86% (penurunan 83,18%), mengubah tanah dari sangat ekspansif menjadi *non-ekspansif*. Parameter kuat geser juga meningkat: Kuat Geser Tak Drainase (*Su*) dari 0,511 menjadi 1,994 kgf/cm² (peningkatan 74,37%), kohesi (c) dari 0,276 menjadi 1,469 kgf/cm² (peningkatan 81,21%), dan sudut geser (ϕ) dari 2,18° menjadi 3,86° (peningkatan 43,52%). Analisis *Two-Way ANOVA* mengonfirmasi bahwa persentase ASP dan lama pemeraman berpengaruh signifikan terhadap perbaikan tanah. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi MICP dan ASP menawarkan solusi stabilisasi tanah lempung ekspansif yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan dengan memanfaatkan abu sekam padi.

Kata kunci: *Bacillus subtilis*, Tanah Lempung Ekspansif, *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), Abu Sekam Padi (ASP), Plastisitas Indeks, Kuat Geser,

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki potensi kembang-susut tinggi akibat perubahan kadar air (Harwadi, 2021). Perubahan volume yang signifikan dapat menyebabkan differential settlement yang berpotensi menimbulkan kerusakan pada struktur bangunan, jalan raya, dan infrastruktur lainnya (Sulistyowati, 2023). Oleh karena itu, diperlukan metode perbaikan tanah yang efektif agar permasalahan tanah lempung ekspansif dapat ditangani secara optimal.

Tanah lempung ekspansif yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur. Berdasarkan penelitian Affandi (2025), tanah di daerah tersebut memiliki nilai *Liquid Limit* (LL) 70,54% dan *Plastic Limit* (PL) 31,50% sehingga diperoleh *Plasticity Index* (PI) 39,05%, yang mengindikasikan potensi kembang-susut tinggi (*highly expansive*).

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) merupakan teknologi ramah lingkungan yang memanfaatkan bakteri *Bacillus subtilis* untuk menginduksi pengendapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) di dalam tanah, sehingga meningkatkan stabilisasi tanah ekspansif (Affandi, 2025). Penelitian terdahulu menunjukkan kondisi optimum MICP pada campuran 9% dengan masa pemeraman 28 hari.

Abu sekam padi (ASP) merupakan limbah pertanian hasil pembakaran yang kaya kandungan silika (SiO_2) serta bersifat *pozzolan* dan dapat bereaksi dengan senyawa tanah untuk membentuk ikatan yang meningkatkan kekuatan dan stabilisasi tanah (Sianturi, 2025). Kandungan silika (SiO_2) optimum diperoleh pada pembakaran suhu 750°C selama 4,5 jam dengan hasil 96% (Nurlaila, 2023). Pemanfaatan limbah ini tidak hanya membantu mengatasi permasalahan geoteknik, namun juga mendukung pengelolaan limbah secara berkelanjutan dan ekonomis serta ramah lingkungan.

Penelitian ini mengembangkan penelitian terdahulu dengan mengkombinasikan MICP 9% (kondisi optimum) dan abu sekam padi dengan variasi 7%, 10%, 12%, dan 15% (A. Blayi et al., 2025) serta masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari. Tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis karakteristik sifat fisik dan mekanik tanah lempung ekspansif sebelum dan sesudah penerapan ASP; (2) menganalisis pengaruh penambahan ASP terhadap tanah yang telah distabilisasi MICP 9%; (3) menganalisis perubahan nilai kuat geser tanah akibat kombinasi MICP 9% dan ASP; (4) menentukan variasi campuran ASP yang paling efektif dalam meningkatkan nilai kuat geser tanah secara maksimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif didominasi oleh tanah berbutir halus jenis lempung dan lanau. Tanah ekspansif mengalami perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, mengembang saat basah dan menyusut saat kering (Sudjianto, 2015). Mineral montmorillonite menyebabkan tanah sangat sensitif terhadap air. Potensi ekspansif dapat diidentifikasi melalui nilai *Plasticity Index* (PI) yang diperoleh dari uji batas cair (LL) dan batas plastis (PL).

Tabel 1. Potensi Ekspansi tanah Berdasar Nilai PI

Plasticity Index (%)	Expansion Potential
0 – 15	Rendah (Low)
0 – 35	Sedang (Medium)
20 – 55	Tinggi (Heigh)
> 35	Sangat Tinggi (Very high)

Nilai Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah menahan geseran antar partikel sebelum mengalami kegagalan geser. Parameter ini sangat penting dalam mekanika tanah untuk menentukan stabilitas lereng, daya dukung pondasi, dan perilaku tanah di bawah beban. Kuat geser tanah dimodelkan dengan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb*:

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

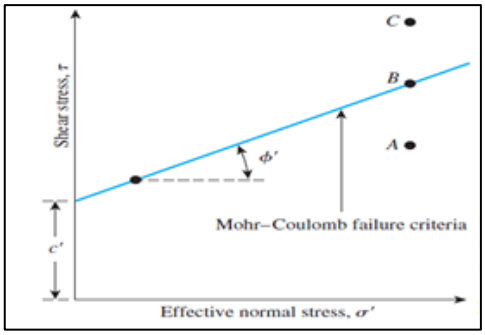
dimana:

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.

Microbially Induced Calcite Precipitation

MICP merupakan alternatif ramah lingkungan dalam rekayasa geoteknik dengan pemanfaatan bakteri untuk menghasilkan $CaCO_3$ yang mengikat partikel tanah, meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah (Lin Li et al., 2025). Reaksi yang terjadi:

Bacillus subtilis merupakan bakteri penghasil enzim *urease* yang berperan mengkatalisis hidrolisis urea ($CO(NH_2)_2$) menjadi ion karbonat (CO_3^{2-}) dan amonia. Ion karbonat yang terbentuk kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) yang berasal dari kalsium klorida ($CaCl_2$) membentuk endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$). Endapan $CaCO_3$ ini berfungsi sebagai perekat alami yang mengisi pori-pori dan mengikat partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi plastisitas tanah lempung ekspansif.

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

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

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

dimana:

$CO(NH_2)_2$	= Urea
H_2O	= Air
NH_4^+	= Amonia
CaCl2	= Kalsium Klorida
CaO	= Kalsium Oksida
HCl	= Asam Klorida
CO_3^{2-}	= Ion Karbonat
Ca^{2+}	= Ion Kalsium
$CaCO_3$	= Kalsium Karbonat

Abu Sekam Padi

Abu sekam padi merupakan bahan stabilisasi tanah karena bahan berpori yang mampu menyerap air dan menurunkan nilai indeks plastisitas tanah (Syahril et al., 2022). ASP mengandung silika (SiO_2) 21,6%, CaO 62,8%, dan material *pozzolan* (Suhardi D., 1982).

Tabel 2. Unsur-unsur yang terkandung dalam ASP

UNSUR	%	UNSUR	%
SiO_2	21,6	SO_4	2,1
Al_2O_3	4,6	CaO Bebas	1,2
Fe_2O_3	2,8	Na_2O	0,41
CaO	62,8	K_2O	0,24
MgO	3,2		

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang. Sampel tanah ekspansif diambil dari Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban, Jawa Timur pada kedalaman 0,5–1,0 m.

Variasi campuran *Bacillus subtilis* yang digunakan adalah 9%, dari berat tanah kering, dan abu sekam padi (ASP) 7%, 10%, 12%, dan 15% dari berat tanah kondisi optimum dengan masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari.

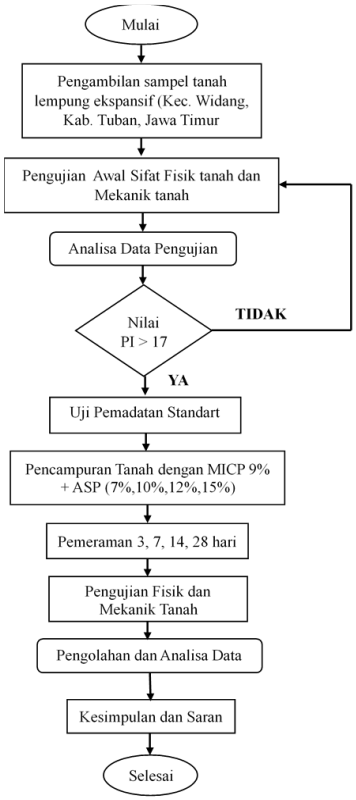
Alat dan Bahan

Bahan penelitian meliputi tanah ekspansif, kultur bakteri Bacillus subtilis, urea $CO(NH_2)_2$, kalsium klorida ($CaCl_2$), abu sekam padi (ASP) dan air. Peralatan yang digunakan antara lain oven, piknometer, hidrometer, perangkat batas cair dan batas plastis, alat *Direct Shear, Triaxial Compression* UU, 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).
- **Pemadatan Standar** – Dilakukan uji *Standard Proctor* untuk mengetahui kadar air optimum.
- **Pembuatan Larutan Sementasi** – Mencampur bakteri *bacillus subtilis* dengan komponen pendukung urea dan $CaCl_2$ sesuai konsentrasi yang direncanakan.
- **Pencampuran** – Tanah dicampur dengan larutan MICP 9% dan ASP sesuai variasi. Air dan tanah ditambahkan bertahap hingga kadar air optimum tercapai.
- **Pemeraman** – Sampel disimpan pada decivator vakum selama 3, 7, 14, dan 28 hari.
- **Pengujian Setelah Perlakuan** – Dilakukan pengujian fisik (plastisitas indeks) dan mekanik (UCS, *Triaxial* UU, *Direct Shear*).
- **Analisis Data Pengujian** – Data dianalisis secara deskriptif melalui grafik dan tabel serta uji statistik *Two-Way ANOVA* dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$.

Bagan Alir



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah ekspansif diambil dari Kec. Widang, 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 Lempung Ekspansif

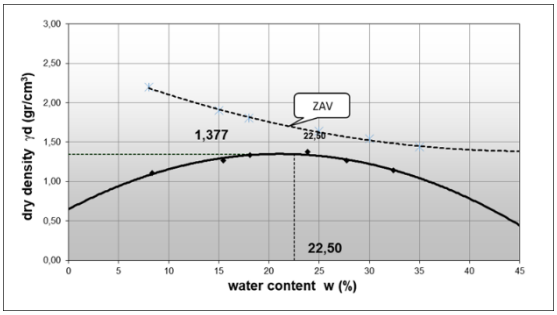
Pengujian Awal

Hasil pengujian fisik tanah asli Kec. Widang, Kabupaten Tuban, Jawa Timur menunjukkan bahwa sampel tergolong tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang-susut sangat tinggi:

Tabel 3. Hasil Pengujian Fisik dan Mekanik

Parameter	Hasil Tanah Asli
Nilai PI	40,78%
Su (UCS)	0,511 kgf/cm²
τ (Direct Shear)	0,552 kgf/cm²
c' (Direct Shear)	0,454 kgf/cm²
ϕ' (Direct Shear)	20°
c (Triaxial UU)	0,276 kgf/cm²
ϕ (Triaxial UU)	2,18°

Dari uji *Standart Proctor* diperoleh kadar air optimum 23,85% dengan berat isi kering maksimum 1,377 gr/cm³. Kebutuhan air kondisi optimum adalah 950 ml untuk tanah kondisi optimum.



Gambar 4. Uji Pemadatan Standar (*Standart Proctor*)

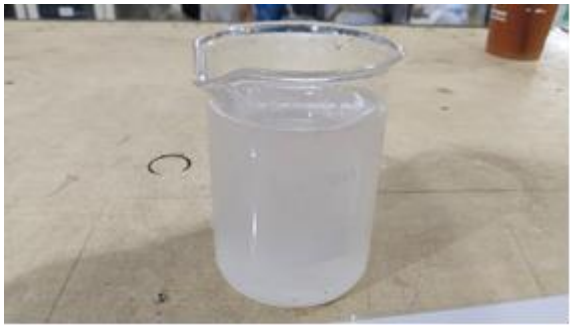
Pembuatan Larutan Sementasi

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 4. Komponen Larutan Sementasi

No	Campuran	Jumlah
1	Air (ml)	50
2	Bacillus Subtilis (ml)	50
3	$CaCl_2$ (gr)	150
4	$CO(NH_2)_2$ (gr)	100

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



Gambar 5. Larutan Sementasi

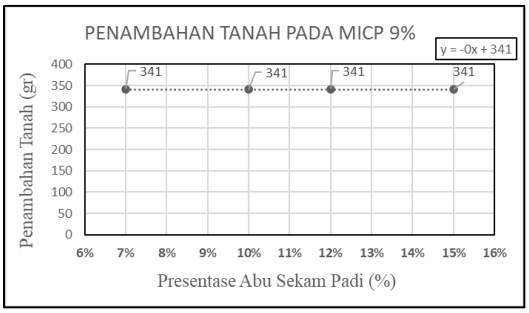
Pencampuran Dengan Sampel Tanah

Setelah diperoleh data pengujian pemadatan standar kondisi optimum dan larutan MICP, tahap berikutnya ialah pencampuran MICP pada sampel tanah.

Tabel 5. Persentase Penambahan MICP 9%

PRESENTASE PENAMBAHAN MICP 9%		
Berat Tanah Keseluruhan	(gr)	4000
Penambahan Air Kondisi Optimum	(ml)	950
MICP 9% (950 x 9%)	(ml)	**85,5**

Setelah tanah tercampur dengan MICP 9%, selanjutnya dilakukan penambahan tanah sebanyak 341 gr supaya kondisi sampel tetap pada kondisi optimum dan didapatkan berat keseluruhan tanah setelah ditambahkan MICP 9% yaitu 4341 gr.



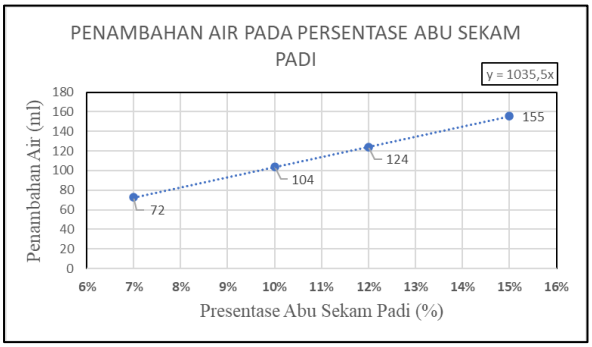
Gambar 6. Penambahan Tanah Kadar Air Optimum Pada MICP 9%

Selanjutnya dilakukannya penambahan abu sekam padi (ASP) sesuai variasi persentase yang direncanakan dari berat keseluruhan sampel tanah kondisi optimum yang telah dicampurkan dengan MICP 9% yaitu 4341 gram.

Tabel 6. Persentase Berat Campuran ASP

PENAMBAHAN ABU SEKAM PADI			
Abu Sekam Padi 7%	7% x 4341 gr	**304**	(gr)
Abu Sekam Padi 10%	10% x 4341 gr	**434**	(gr)
Abu Sekam Padi 12%	12% x 4341 gr	**521**	(gr)
Abu Sekam Padi 15%	12% x 4341 gr	**651**	(gr)

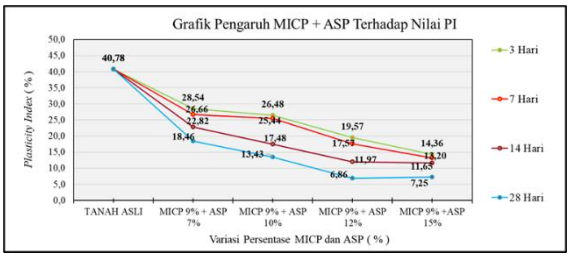
Setelah dilakukannya penambahan abu sekam padi (ASP) dilakukannya penambahan air agar kadar air tetap pada kondisi optimum kembali, yaitu sebagai berikut :



Gambar 7. Grafik Penambahan Air pada Persentase ASP

Pengujian Setelah Perlakuan

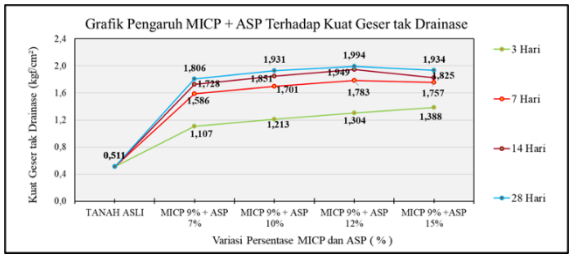
Setelah perlakuan MICP dan ASP dengan variasi konsentrasi MICP 9%, dan ASP 7%, 10%, 12%, dan 15% serta masa pemeraman 3, 7, 14, dan 28 hari, terjadi perubahan signifikan pada sifat fisik dan mekanik tanah.



Gambar 8. Grafik Pengaruh Nilai PI

Penurunan PI paling signifikan terjadi pada variasi MICP 9% + ASP 12% dengan masa pemeraman 28 hari, yaitu dari 40,78% menjadi 6,86% (penurunan 83,18%), mengubah status tanah dari sangat ekspansif menjadi *non-ekspansif*. Penurunan ini disebabkan oleh mekanisme pengikatan partikel lempung oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP dan reaksi pozzolanik dari silika (SiO_2) ASP yang mengisi pori-pori tanah. Variasi ASP 15% menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan ASP 12% pada pemeraman 28 hari (PI 7,25%), mengindikasikan bahwa kadar ASP yang berlebihan dapat menghambat pembentukan ikatan jangka panjang.

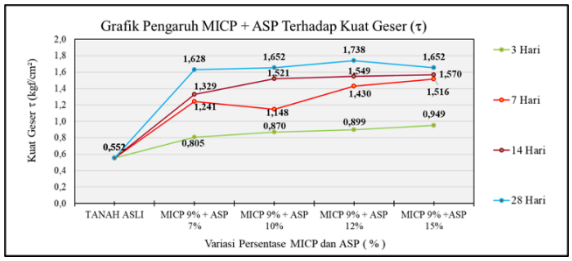
Unconfined Compressive Strength



Gambar 9. Grafik Pengaruh Nilai Kuat Geser Tak Drainase Su (UCS)

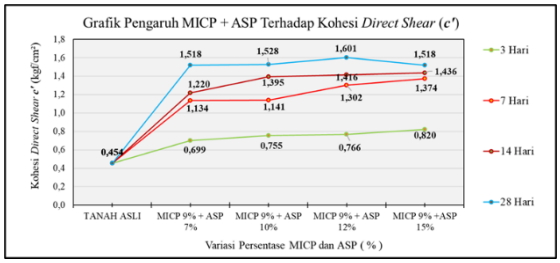
Nilai *Su* meningkat dari 0,511 kgf/cm² (tanah asli) menjadi 1,994 kgf/cm² pada variasi optimum (peningkatan 74,37%). Konsistensi tanah meningkat dari "Lempung Kaku" menjadi mendekati "Lempung Keras".

Direct Shear



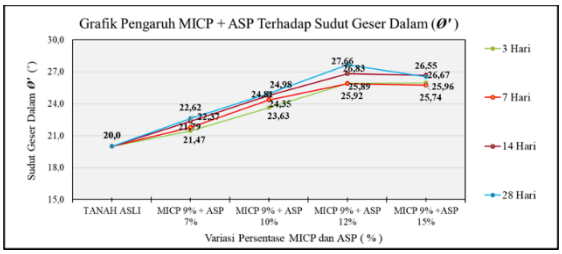
Gambar 10. Grafik Pengaruh Kuat Gesr (τ) *Direct Shear*

Seluruh variasi campuran MICP 9% + ASP meningkatkan kuat geser tanah, dengan hasil optimum pada MICP 9% + ASP 12% (28 hari) sebesar 1,738 kgf/cm² (peningkatan 68,24%). Variasi ASP 15% menunjukkan peningkatan lebih rendah (1,652 kgf/cm²), mengindikasikan kadar ASP berlebihan menghambat ikatan jangka panjang. Peningkatan ini disebabkan oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP yang mengikat partikel tanah dan reaksi pozzolanik silika (SiO_2) ASP yang memperkuat struktur serta mengisi pori-pori tanah.



Gambar 11. Grafik Pengaruh Kohesi (c') *Direct Shear*

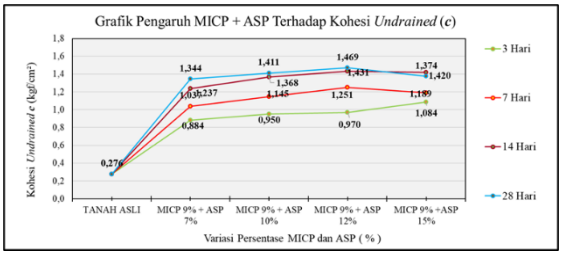
Seluruh variasi campuran MICP 9% + ASP meningkatkan nilai kohesi (c') tanah, dengan hasil optimum pada MICP 9% + ASP 12% (28 hari) sebesar 1,601 kgf/cm² (peningkatan 71,65%). Variasi ASP 15% menunjukkan nilai lebih rendah (1,518 kgf/cm²), mengindikasikan kadar ASP berlebihan menghambat ikatan jangka panjang. Peningkatan ini disebabkan oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP yang mengikat partikel tanah dan reaksi pozzolanik silika (SiO_2) ASP yang memperkuat struktur serta mengisi pori-pori tanah.



Gambar 12. Grafik Pengaruh Kohesi (ϕ') Direct Shear

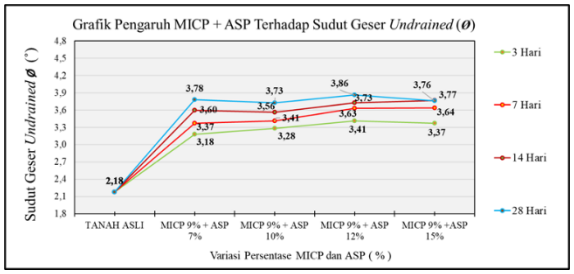
Seluruh variasi campuran MICP 9% + ASP meningkatkan nilai sudut geser dalam (ϕ') tanah, dengan hasil optimum pada MICP 9% + ASP 12% (28 hari) sebesar 27,66° (peningkatan 27,69%). Variasi ASP 15% menunjukkan nilai lebih rendah (26,55°), mengindikasikan kadar ASP berlebihan menghambat ikatan jangka panjang. Peningkatan ini disebabkan oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP yang mengikat partikel tanah dan reaksi pozzolanik silika (SiO_2) ASP yang memperkuat struktur serta mengisi pori-pori tanah.

Triaxial Compression UU



Gambar 13. Grafik Pengaruh Kohesi *Undrained* (c) *Triaxial* UU

Seluruh variasi campuran MICP 9% + ASP meningkatkan nilai kohesi *undrained* (c) tanah, dengan hasil optimum pada MICP 9% + ASP 12% (28 hari) sebesar 1,469 kgf/cm² (peningkatan 81,21%). Variasi ASP 15% menunjukkan nilai lebih rendah (1,374 kgf/cm²), mengindikasikan kadar ASP berlebihan menghambat ikatan jangka panjang. Peningkatan ini disebabkan oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP yang mengikat partikel tanah dan reaksi pozzolanik silika (SiO_2) ASP yang memperkuat struktur serta mengisi pori-pori tanah.



Gambar 14. Grafik Pengaruh Sudut Geser *Undrained* (ϕ) *Triaxial* UU

Seluruh variasi campuran MICP 9% + ASP meningkatkan nilai sudut geser *undrained* (ϕ) tanah, dengan hasil optimum pada MICP 9% + ASP 12% (28 hari) sebesar 3,86° (peningkatan 43,52%). Variasi ASP 15% menunjukkan nilai lebih rendah (3,76°), mengindikasikan kadar ASP berlebihan menghambat ikatan jangka panjang. Peningkatan ini disebabkan oleh endapan $CaCO_3$ dari MICP yang mengikat partikel tanah dan reaksi pozzolanik silika (SiO_2) ASP yang memperkuat struktur serta mengisi pori-pori tanah.

Hasil Uji Hipotesis (*Two-Way ANOVA*)

Uji hipotesis ini dibuat dengan *software Microsoft Excel*, di mana variabel independen Faktor A adalah variasi persentase campuran (MICP 9% + ASP 7%, MICP 9% + ASP 10%, MICP 9% + ASP 12%, dan MICP 9% + ASP 15%) dan Faktor B adalah masa pemeraman (3, 7, 14, dan 28 hari), serta nilai kuat geser tanah sebagai variabel dependen.

Tabel 7. Hasil *Two-Way ANOVA* Pada Nilai PI

ANOVA *Two-Faktor Without Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Rows (A)	403,914	3	134,638	53,66153	4,57517E-06	3,862548
Columns (B)	284,3582	3	94,78608	37,77809	1,99258E-05	3,862548
Error	22,5812	9	2,509022			
Total	710,8534	15				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 53,66 > 3,86; Faktor B = 37,78 > 3,86), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP dan variasi waktu pemeraman secara statistik berpengaruh signifikan terhadap penurunan nilai Indeks Plastisitas (PI) tanah.

Tabel 8. Hasil *Two-Way ANOVA* Pada Kuat Geser Tak Drainase (*Su*) UCS

ANOVA Two-Faktor Without Replication

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Rows (A)	0,093322	3	0,031107	16,65023	0,000513641	3,862548
Columns (B)	1,054603	3	0,351534	188,1594	1,95316E-08	3,862548
Error	0,016815	9	0,001868			
Total	1,164739	15				

Berdasarkan hasil yang didapatkan, nilai F hitung untuk Faktor A (16,65) dan Faktor B (188,16) lebih besar dari F tabel (3,86), sehingga H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini menunjukkan bahwa variasi persentase ASP dan lama masa pemeraman secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kuat geser tak drainase (*Su*) tanah hasil uji UCS.

Tabel 9. Hasil *Two-Way ANOVA* Pada Kuat Geser (τ) *Direct Shear*

ANOVA *Two-Faktor With Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Sample (A)	0,213255	3	0,071084964	19,4769	2,27947E-07	2,90112
Columns (B)	4,106882	3	1,368960628	375,0879	5,32407E-25	2,90112
Interaction (A x B)	0,075952	9	0,00843916	2,312284	0,039249013	2,188766
Within (Eror)	0,116791	32	0,003649707			
Total	4,51288	47				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 19,48 > 2,90; Faktor B = 375,09 > 2,90; Interaksi = 2,31 > 2,19), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP, variasi waktu pemeraman, serta interaksi antara keduanya secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kuat geser (τ) tanah hasil uji *Direct Shear*.

Tabel 10. Hasil *Two-Way ANOVA* Pada Sudut Geser Dalam (ϕ') *Direct Shear*

ANOVA *Two-Faktor Without Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Rows (A)	51,25685	3	17,08562	222,5333575	9,28967E-09	3,862548
Columns (B)	3,98185	3	1,327283	17,28733719	0,000445938	3,862548
Error	0,691	9	0,076778			
Total	55,9297	15				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 222,53 > 3,86; Faktor B = 17,29 > 3,86), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP dan variasi waktu pemeraman secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai sudut geser dalam (ϕ') tanah hasil uji *Direct Shear*.

Tabel 11. Hasil *Two-Way ANOVA* Kohesi (*c*') *Direct Shear*

ANOVA *Two-Faktor Without Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Rows (A)	0,052649677	3	0,017549892	4,947082	0,026811234	3,862548358
Columns (B)	1,345603832	3	0,448534611	126,436	1,12569E-07	3,862548358
Error	0,031927716	9	0,003547524			
Total	1,430181224	15				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 4,95 > 3,86; Faktor B = 126,44 > 3,86), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP dan variasi waktu pemeraman secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kohesi (c') tanah hasil uji *Direct Shear*.

Tabel 12. Hasil *Two-Way ANOVA* Kohesi *Undrained* (*c*) *Triaxial* UU

ANOVA *Two-Faktor With Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Sample (A)	0,16864	3	0,056213	29,17482	2,78301E-09	2,90
Columns (B)	1,409324	3	0,469775	243,8146	4,10879E-22	2,90
Interaction (A x B)	0,049175	9	0,005464	2,835769	0,014222585	2,19
Within (Error)	0,061657	32	0,001927			
Total	1,688796	47				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 29,17 > 2,90; Faktor B = 243,81 > 2,90; Interaksi = 2,84 > 2,19), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP, variasi waktu pemeraman, serta interaksi antara keduanya secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kohesi *undrained* (c) tanah hasil uji *Triaxial* UU.

Tabel 13. Hasil *Two-Way ANOVA* Sudut Geser *Undrained* (ϕ) *Triaxial* UU

ANOVA *Two-Faktor Without Replication*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F tabel*
Rows (A)	0,10055	3	0,0335167	9,57619	0,003669429	3,862548
Columns (B)	0,50025	3	0,16675	47,64286	7,56311E-06	3,862548
Error	0,0315	9	0,0035			
Total	0,6323	15				

Dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel pada seluruh sumber variasi (Faktor A = 9,58 > 3,86; Faktor B = 47,64 > 3,86), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hal ini berarti variasi persentase campuran MICP+ASP dan variasi waktu pemeraman secara statistik berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai sudut geser *undrained* (ϕ) tanah hasil uji *Triaxial* UU.

5. KESIMPULAN

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

1. Tanah dari Kecamatan Widang, Kabupaten Tuban memiliki karakteristik tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang-susut sangat tinggi (PI = 40,78%; CH menurut USCS). Tanah asli memiliki kuat geser tak drainase (*Su*) 0,511 kgf/cm², kohesi (c) 0,276 kgf/cm², dan sudut geser (ϕ) 2,18°. tekan bebas dibandingkan kondisi kontrol, sedangkan uji sifat fisik menunjukkan penurunan indeks plastisitas (PI).
2. Penambahan abu sekam padi (ASP) pada tanah yang telah distabilisasi MICP 9% memberikan pengaruh signifikan terhadap perbaikan sifat fisik dan mekanik tanah. Terjadi penurunan nilai PI hingga 83,18% (dari 40,78% menjadi 6,86%) dan perubahan klasifikasi tanah dari Lempung (*Clay*) menjadi Lempung Berlanau (*Silty Clay Loam*) hingga Lanau Berlempung (*Silty Loam*).
3. Kombinasi MICP 9% dan ASP memberikan peningkatan signifikan pada seluruh parameter kuat geser tanah. Pada kondisi optimum terjadi peningkatan *Su* sebesar 74,37%, kohesi (c) sebesar 81,21%, sudut geser (ϕ) sebesar 43,52%, serta peningkatan pada parameter Direct Shear (τ, c', ϕ').
4. Variasi campuran optimum adalah MICP 9% + ASP 12% dengan masa pemeraman 28 hari, yang menghasilkan PI 6,86% (*non-ekspansif*), Su 1,994 kgf/cm², kohesi (c) 1,469 kgf/cm², dan sudut geser (ϕ) 3,86°. Variasi ASP 15% menunjukkan hasil yang lebih rendah, mengindikasikan bahwa kadar ASP berlebihan dapat menghambat pembentukan ikatan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

Affandi, A., Imananto, E. I., & Yudianto, E. A. (2025). Penerapan Microbially Induced Calcite Precipitation Pada Tanah Ekspansif Serta Pengaruhnya Terhadap Nilai Kuat Geser Tanah. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil S1, Institut Teknologi Nasional Malang.

Arismawati, R., Lydia, E. N., Ardhyan, M. Z., & Mutia, E. (2024). Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Bahan Tambah Serbuk Gypsum dan Abu Sekam Padi. Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi, 7(1),84–92.

Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1965:2008 Cara Uji Penentuan Kadar Air untuk Tanah dan Batuan di Laboratorium. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 3638:2012 Metode Uji Kuat Tekan-Bebas Tanah Kohesif. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 3420:2016 Metode Uji Kuat Geser Langsung Tanah Tidak Terkonsolidasi dan Tidak Terdrainase. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Blayi, R. A., Kakrasul, J. I., & Hamad, S. M. (2026). Impact of rice husk ash on swelling and durability of expansive soils. Next Materials, 10, 101444.

Das, B. M. (1995a). Mekanika Tanah (Jilid 1). Penerbit Erlangga.

Das, B. M. (1995b). Mekanika Tanah (Jilid 2). Penerbit Erlangga.

Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah 1. Gadjah Mada University Press.

Harwadi, F., Rantesalu, S., & Nofrizal, N. (2021). Pengaruh Penambahan Fly Ash Terhadap Perilaku Teknis Tanah Ekspansif di Daerah Selimau Kabupaten Bulungan. Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil, 5(1), 89–102. https://doi.org/10.35334/be.v5i1.1640

Li, L., Liu, S., Wen, K., & Lu, X. (2025). The Immersion Method for Microbially Induced

Calcite Precipitation: Applications for Sustainability. CRC Press.

Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments (9th ed.). John Wiley & Sons.

Muhammad, R., Syahril, S., Suyono, A., Muchtar, & Sirait, T. (2022). Nilai Kuat Tekan Bebas pada Tanah Lunak yang Distabilisasi Menggunakan Limbah Abu Sekam Padi dan Asam Fosfat. Potensi: Jurnal Sipil Politeknik, 24(2), 94–99. https://doi.org/10.35313/potensi.v24i2.4450

Sudjianto, A. T. (2015). Tanah Ekspansif: Karakteristik dan Penanganannya. Universitas Brawijaya Press.

Sulistyowati, T. (2023). Kompressibilitas Lempung Ekspansif Yang Distabilisasi dengan Fly Ash Akibat Siklus Pembasahan Pengeringan Berulang. Jurnal Konstruksi, 21(1), 137–147. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.21-1.1303