

ANALISIS PENGARUH BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS* TERHADAP PARAMETER KUAT GESER PADA TANAH LANAU

Fernando Valentino Ritung^{1*} dan Andryan Suhendra¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
*fernando.325210007@stu.untar.ac.id

Masuk: 02-07-2025, revisi: 09-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2025

ABSTRACT

In some cases, the land used to erect a building has soil that does not have a bearing capacity that is suitable for the building to be erected. Therefore, the use of additives is sometimes necessary to increase the bearing capacity value of the soil. One type of additive that can be used is bacteria. However, only some bacteria can be used to increase the bearing capacity of the soil. An example of bacteria that can be used is Bacillus Subtilis, which is a gram-positive bacteria that is rod-shaped and one-celled. In general, bacteria that are given to the soil need to be tended to so that the bacteria can work optimally. After the soil has been cured, the soil can be tested through the Unconfined Compression Test (UCT) or free compressive strength test to obtain the shear strength parameter of soil. The results of this study prove that the use of Bacillus subtilis bacteria can significantly increase soil shear strength, with the maximum increase reaching 276,89% at a concentration of 8% and a 15-day curing period. However, after 25 days, there was a decrease in soil strength due to reduced bacterial activity caused by limited nutrients in the soil.

Keywords: Soil; bearing capacity; bacteria; Bacillus Subtilis; shear strength.

ABSTRAK

Pada beberapa kasus, lahan yang digunakan untuk mendirikan sebuah bangunan memiliki tanah yang bersifat lembek atau tidak memiliki daya dukung yang sesuai dengan bangunan yang akan didirikan. Maka dari itu, penggunaan zat aditif terkadang diperlukan untuk meningkatkan nilai daya dukung dari tanah di lapangan. Salah satu jenis zat aditif yang dapat digunakan adalah bakteri. Namun tidak sembarang bakteri yang digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Salah satu contoh bakteri yang dapat digunakan adalah *Bacillus Subtilis*, dimana bakteri ini adalah bakteri gram positif yang berbentuk batang dan bersel satu. Pada umumnya, bakteri yang diberikan kepada tanah perlu didiamkan terlebih dahulu atau diperam agar bakteri dapat bekerja dengan maksimal. Setelah tanah diperam dalam waktu yang telah ditetapkan sebelumnya, maka tanah dapat diuji melalui pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT) atau kuat tekan bebas guna untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan bakteri *Bacillus subtilis* mampu meningkatkan kuat geser tanah secara signifikan, dengan peningkatan maksimal mencapai 276,89% pada konsentrasi 8% dan masa pemeraman 15 hari. Namun, setelah 25 hari, terjadi penurunan kekuatan tanah akibat berkurangnya aktivitas bakteri yang disebabkan oleh keterbatasan nutrisi di dalam tanah.

Kata kunci: tanah; daya dukung; bakteri; *Bacillus Subtilis*; kuat geser.

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Di dunia konstruksi, dalam membangun infrastruktur perlu memperhatikan komponen utama dalam membangun suatu gedung, jalan, rumah, jembatan, ataupun jenis konstruksi lainnya. Salah satu komponen utama tersebut adalah tanah, dimana tanah menjadi salah satu tempat berdirinya sebuah bangunan yang akan dibangun. Sudah banyak terjadi kasus bangunan yang ambruk akibat tidak diperhatikannya kondisi tanah tempat bangunan tersebut akan dibangun. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sifat fisik dan mekanis tanah sangat diperlukan dalam perancangan struktur yang aman dan tahan lama. Sifat fisik tanah mengacu pada kesesuaian tanah untuk berbagai keperluan, seperti daya dukung atau kemampuan menahan beban, kemampuan tanah menyimpan air, drainase, penetrasi akar tanaman, pengendalian iklim, dan pengikatan unsur hara (Puspitorini & Pradhipta, 2024)

Permasalahan tanah sering muncul di lapangan, sehingga perbaikan tanah diperlukan untuk meningkatkan daya dukungnya. Penggunaan zat aditif untuk tanah juga diperlukan untuk meningkatkan kualitas tanah, terutama untuk tanah yang memiliki sifat fisik kurang bagus. Zat aditif juga bertujuan untuk meningkatkan daya dukung tanah yang diuji. Daya dukung tanah sendiri adalah seberapa kuat tanah mampu menahan beban yang berada di atasnya. Jika semakin kecil nilai daya dukung tanah, maka akan berbahaya untuk bangunan yang berdiri di atasnya, karena berpotensi untuk mengalami kerusakan ataupun keruntuhan.

Penelitian ini menggunakan mikroorganisme berupa bakteri sebagai bahan utama dalam uji coba kekuatan tanah. Bakteri yang digunakan adalah jenis bakteri *Bacillus Subtilis* dimana bakteri ini sering ditemukan pada jerami, sisa-sisa tanaman, air, udara, dan ada juga yang hidup di dalam tanah. Metode yang akan dilakukan adalah metode injeksi dimana bakteri akan dimasukkan ke dalam tanah melalui alat suntik sehingga bakteri dapat tercampur di dalam tanah. Percobaan ini dapat dilakukan di lapangan guna untuk perkuatan sementara saja dikarenakan efek yang dihasilkan dari bakteri ini masih dapat mengalami penurunan.

Tanah

Tanah adalah campuran dari mineral-mineral yang ada di dalam bumi dan menyatu dengan hasil pelapukan batuan. Butiran-butiran yang ada tidak seluruhnya terikat secara sempurna, hal ini disebabkan oleh zat organik, karbonat, dan oksida yang mengendap di tiap partikelnya (Hardiyatmo, 2002). Rongga-rongga yang terdapat diantara partikel tersebut diisi oleh air, udara ataupun keduanya.

Tanah terbentuk secara berlapis akibat adanya proses fisik, kimia, dan biologis yang mencakup perubahan dari bahan-bahan yang terdapat pada tanah itu sendiri (Darwis, 2018). Proses pembentukan tanah secara fisik terjadi akibat adanya pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, ataupun akibat perubahan suhu atau cuaca. Pembentukan tanah secara kimia diakibatkan oleh pengaruh dari air, oksigen, karbon dioksida dan bahan kimia lainnya. Untuk pembentukan secara biologis, umumnya terjadi diakibatkan oleh organisme-organisme yang ada di dalam bumi dan sisa-sisa bahan organik seperti tumbuhan serta hewan,

Pemahaman tentang atribut fisik tanah mulai dari densitas, jumlah pori, distribusi partikel, formasi struktur, hingga warna sangat esensial dalam mengkaji kekuatan dan aplikasinya untuk pekerjaan konstruksi. Tekstur tanah didefinisikan oleh proporsi pasir, lanau, dan lempung, sementara struktur menjelaskan susunan partikel-partikel tanah. Nilai kepadatan menunjukkan berat tanah per satuan volume, dan porositas mengkuantifikasi ruang kosong yang menentukan pergerakan udara dan air. Selain itu, warna tanah dapat mencerminkan tingkat bahan organik dan komposisi mineral, dimana seluruh parameter ini menentukan kinerja tanah sebagai material bangunan (Shinde et al., 2024)

Uji *Index properties*

Pengujian *Index Properties* (IP) bertujuan untuk menentukan karakteristik tanah seperti nilai *Specific Gravity* (G_s) dari sampel tanah yang diuji. Adapun parameter yang didapatkan dari pengujian ini adalah nilai kadar air dan berat jenis atau nilai G_s . Klasifikasi jenis tanah terhadap nilai G_s dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Berat jenis sampel tanah (Hardiyatmo, 2002)

Jenis tanah	Nilai <i>Specific Gravity</i> (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Uji *Atterberg limit*

Pengujian *Atterberg Limit* ini dilakukan untuk menentukan kadar air pada saat tanah mengalami perubahan tingkah laku dari padat ke plastis atau dari plastis ke cair. Uji *Atterberg Limit* ini untuk mendapatkan nilai batas cair (*Liquid Limit*, LL), batas plastis (*Plastic Limit*, PL), dan indeks plastisitas (*Plasticity Index*, PI).

Uji Grain size analysis

Pengujian *Grain Size Analysis* bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran tanah. Hasil uji ini juga membantu dalam mengklasifikasi tanah. Dalam pengujian ini dilakukan 2 jenis percobaan, yakni *Sieve Analysis* dan *Hydrometer*. Gabungan dari kedua percobaan ini untuk menentukan distribusi ukuran butiran tanah, baik untuk butiran kasar maupun halus. Nilai a atau *correction factor* yang digunakan berdasarkan ASTM D422-63, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Values of correction factor, a , for different specific gravities of soil particles

Specific Gravity (G_s)	Correction Factor (a)
2,8	0,97
2,75	0,98
2,7	0,99
2,65	1,00
2,6	1,01
2,55	1,02

Pemeraman

Pemeraman ini adalah suatu proses yang digunakan untuk memberikan kesempatan kepada bakteri yang ada di dalam tanah untuk bekerja dan berkembang biak. Pemeraman ini dilakukan dengan meletakkan sampel tanah yang telah disuntik bakteri ke dalam desikator sehingga tidak terpapar oleh partikel dan udara dari luar.

Unconfined compression test

Uji kuat tekan bebas atau *Unconfined Compression Test* (UCT) adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk mengukur kekuatan geser tanah kohesif dengan keadaan tanpa *lateral pressure*, baik dalam keadaan asli (*undisturbed*), buatan (*remolded*), ataupun dengan cara pemadatan (*compacted*). Nilai kuat tekan (q_u) yang didapatkan merupakan nilai tegangan secara aksial yang bisa ditahan oleh tanah sebelum tanah tersebut mengalami keruntuhan. Nilai kuat tekan berasal dari pembacaan *load dial* dengan tegangan maksimum. Nilai kuat tekan yang diperoleh dapat menentukan jenis konsistensi yang dimiliki oleh tanah yang diuji seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi konsistensi tanah kohesif (Das, 2010)

Consistency	q_u (kg/cm ²)
Very Soft	< 0,25
Soft	0,25 – 0,50
Medium	0,50 – 1,00
Stiff	1,00 – 2,00
Very Stiff	2,00 – 4,00
Hard	> 4,00

Klasifikasi tanah

Klasifikasi tanah adalah suatu proses pengelompokan berbagai jenis tanah berdasarkan karakteristiknya. Sistem klasifikasi ini memudahkan pengguna untuk mencari sifat-sifat tanah yang sangat bervariasi.

AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)

Sistem AASHTO mengelompokkan tanah menjadi 8 kelompok, dari kelompok A-1 hingga A-8, termasuk sub-sub pada kelompok. Pengujian yang digunakan untuk sistem klasifikasi ini adalah analisis batas *Atterberg*, yaitu batas cair (LL) dan batas plastis (PL) serta analisis saringan. Pembagian kelompok tanah ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Klasifikasi tanah	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
	A - 1		A - 3	A - 2			
Klasifikasi kelompok	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7
Analisa ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Maks.50 Maks.30 Maks.15	Maks.50 Maks.25	Maks.51 Maks.10	Maks.35	Maks.35	Maks.35	Maks.35
Sifat fraksi yang lolos Ayakan No.40 Batas cair (LL) Indeks plastisitas (PI)	Maks. 6		NP	Maks.40 Maks.10	Min. 41 Maks.10	Maks.40 Min. 11	Min. 41 Min. 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlannau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik						
Klasifikasi tanah	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7-5* A - 7-6**			
Analisa ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Min. 36	Min. 36	Min. 36	Min. 36			
Sifat fraksi yang lolos Ayakan No.40 Batas cair (LL) Indeks Plastisitas (IP)	Maks. 40 Maks. 10	Min. 41 Maks. 10	Maks. 40 Min. 11	Min. 41 Min. 11			
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah berlempung				
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek						

* A-7-5, $PI \leq LL - 30$
** A-7-6, $PI > LL - 30$

Gambar 1. Sistem Klasifikasi AASHTO

USCS (Unified Soil Classification System)

Sistem USCS adalah sistem yang digunakan untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat fisiknya, seperti ukuran butiran, kandungan air dalam tanah, hingga komposisi mineralnya. Sistem ini dimulai oleh Casagrande di tahun 1942 untuk digunakan dalam konstruksi lapangan terbang oleh *The Army Corps of Engineer* pada Perang Dunia ke-2. Tidak lama setelah itu, *American Society for Testing and Materials (ASTM)* menggunakan sistem ini untuk menjadi standar klasifikasi tanah mereka. Pengelompokan jenis tanah ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium
Tanah berbutir kasar: 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW
	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus	
	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir - lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir - lempung	
	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak	
	SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak	
Pasir lebih dari 50 % Kerikil 50% atau lebih dari saringan no. 4 (4.75 mm)	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau	Diagram plastisitas untuk mengidentifikasi kelas butiran halus yang terdapat dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang tertera dalam daerah yang diarsir berarti bahwa klasifikasi menggunakan dua simbol. Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488
	CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir	
	OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatome, lanau elastis	
	CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fat clays</i>)	
Lanau dan lempung batas cair > 50 %	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan	

Gambar 2. Sistem klasifikasi USCS (Hardiyatmo, 2002)

Stabilitas Tanah

Metode stabilisasi tanah melalui bahan campuran dipandang sebagai solusi alternatif yang baik guna mengatasi kekurangan material yang signifikan. Hasil stabilisasi ditentukan oleh jenis tanah, kondisi pemeraman, dan tingkat pematatannya. Mayoritas tanah yang diberi perlakuan dengan berbagai bahan aditif mengalami penurunan plastisitas dan pencapaian kepadatan kering maksimum sesuai dosis stabilisator, terlepas dari klasifikasi tanah (Anburuvel, 2024). Adapun beberapa zat aditif yang bisa menjadi alternatif untuk stabilisasi tanah, antara lain adalah:

1. Kapur
2. Semen *Portland*
3. *Fly ash*
4. Pasir
5. Biopolimer
6. Abu sekam padi
7. Serbuk marmer
8. Serat *Polypropylene* (Nilon)
9. Mikroorganisme

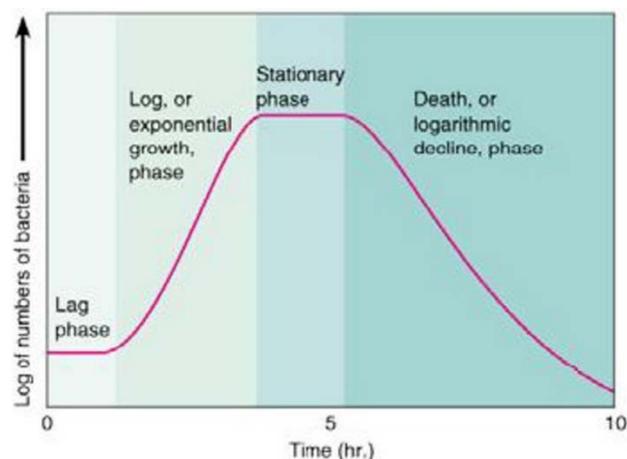
Bakteri

Bacillus subtilis adalah sebuah bakteri gram-positif yang memiliki bentuk batang (Morales Angeles & Scheffers, 2021), bersel satu, dan berukuran $0,5 - 2,5 \mu\text{m} \times 1,2 - 10 \mu\text{m}$. Bakteri ini memiliki sifat aerob (anaerob fakultatif), dan heterotrof. *Bacillus subtilis* adalah jenis bakteri atau mikroorganisme yang berasal dari tanaman, tanah, dan makanan. *Bacillus subtilis* mempunyai jaringan yang cukup beda dari berbagai bakteri lainnya yang juga apatogen, yaitu relatif mudah untuk dimanipulasi secara genetika dan mudah untuk dikembangkan, oleh karena itu mereka sangat dibutuhkan dalam perindustrian (Soesanto, 2008).

Seperti bakteri pada umumnya, *bacillus subtilis* mampu bergerak dengan cara berenang di media yang cair, bakteri ini mampu mendorong dirinya sendiri dengan menggunakan beberapa flagela yang berputar dan terlihat mengelilingi sel. Seperti halnya dengan bakteri *Escherichia coli*, *bacillus subtilis* berenang tidak dalam garis lurus, melainkan dalam gerakan yang tidak beraturan (Losick, 2020).

Bakteri antagonis ini memanfaatkan eksudat akar dan bahan tanaman mati dari dalam tanah sebagai sumber nutrisinya. Apabila kondisi tanah buruk bagi pertumbuhan bakteri, maka bakteri akan membentuk endospora sebagai peralihan dari pertumbuhan vegetatif. Endospora yang berasal dari bakteri ini memiliki daya tahan yang cukup tinggi terhadap faktor fisika maupun kimia. Pembentukan endospora ini terjadi selama kurang lebih 8 jam dan bisa bertahan selama kurang lebih 6 tahun (Soesanto, 2008). Bakteri ini juga mampu menghasilkan senyawa eksopolisakarida (EPS) dan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses biomineralisasi dimana senyawa tersebut dapat berfungsi sebagai perekat alami sehingga mampu membentuk lapisan tanah yang stabil dan kuat.

Selain digunakan dalam perkuatan tanah, bakteri ini juga dipakai dalam aspek pertanian sebagai pengendali hama, penyakit tanaman, dan layu pada tanaman sehingga tanaman tidak rusak dan juga dapat digunakan sebagai pemacu pertumbuhan tanaman. Pertumbuhan dari bakteri mikroba secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva pertumbuhan mikroba (Djide & Sartini, 2008)

Bakteri *Bacillus Subtilis* ini memiliki peran yang cukup banyak dalam tanah seperti meningkatkan daya dukung tanah dengan cara memperbaiki struktur tanahnya, meningkatkan ketersediaan nutrisi pada tanah, hingga mengendalikan patogen dalam tanah.

Rumusan masalah

Rumusan masalah yang dibahas:

Pengujian karakteristik tanah dengan menghitung nilai dari uji UCT untuk tanah dengan campuran bakteri *bacillus subtilis* yang melalui masa pemeraman 5, 15, dan 25 hari, dengan variasi konsentrasi bakteri yang beragam.

Tujuan penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini:

1. Mengetahui nilai *specific gravity*, *liquid limit*, dan *plastic limit* dari tanah yang digunakan.
2. Mengetahui nilai kuat tekan tanah dengan kadar bakteri yang beragam dan masa pemeraman yang berbeda.
3. Mengetahui pengaruh dari bakteri *bacillus subtilis* terhadap kuat geser tanah.
4. Mendapatkan kadar bakteri *bacillus subtilis* dan waktu pemeraman yang paling efektif.

2. METODE PENELITIAN

Tahap-tahap penelitian yang dilakukan ini diambil dari diagram alir dimana dimulai dengan pembahasan topik, lalu mengumpulkan referensi dari jurnal, buku, dan penelitian-penelitian terdahulu. Setelah menentukan topik, dilanjutkan dengan uji laboratorium dengan beberapa jenis uji lab. Setelah melalui uji kuat tekan dan mendapatkan nilai kuat tekan bebas, dapat memulai pengolahan dan analisis data, dan terakhir buat kesimpulan akhirnya.

Variabel dan populasi sampel

Jumlah sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3 buah sampel untuk pengujian *Index properties*, 1 buah sampel untuk pengujian *Atterberg limit*, 3 buah sampel untuk pengujian *Grain size*, dan 80 sampel untuk pengujian *Unconfined compression test* (UCT).

Acuan pengujian sampel

Pengujian sampel yang dilakukan dalam penelitian ini semuanya mengacu pada SNI dan ASTM yang berlaku. Sebagai contoh, pengujian kuat tekan bebas (UCT) mengacu pada SNI 3638:2012 dan pengujian *Grain size* mengacu pada ASTM D422-63.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Index properties

Pengujian *Index Properties* diperlukan untuk mendapatkan nilai G_s (*Specific Gravity*). Pada pengujian ini, dilakukan sebanyak 3 sampel pengujian untuk mendapatkan nilai rata-rata dari G_s . Nilai rata-rata dari G_s tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai G_s (*Specific Gravity*)

Sampel	Nilai G_s
Sampel 1	2,65
Sampel 2	2,61
Sampel 3	2,64
Rata - rata	2,63

Berdasarkan tabel klasifikasi berat jenis tanah (*specific gravity*) (Hardiyatmo, 2002), tanah ini masuk ke dalam 2 jenis tanah, yaitu **Lanau** dengan rentang nilai 2,62 – 2,68 dan **Lempung** dengan rentang nilai 2,58 – 2,65. Dikarenakan klasifikasi tanah yang didapatkan belum begitu jelas, maka diperlukan pengujian lain untuk menentukan lebih spesifik jenis tanah yang digunakan. Pengujian tersebut antara lain adalah *Atterberg Limit* dan *Grain Size Analysis*.

Atterberg limit

Atterberg limit adalah salah satu pengujian yang merupakan indikator penting dalam menilai karakteristik plastisitas suatu tanah. Dalam pengujian ini, nilai dari *liquid limit*, *plastic limit*, dan *plasticity index* ini ditentukan untuk mengidentifikasi klasifikasi tanah sesuai dengan standar yang digunakan. Nilai LL, PL, dan PI ini sendiri dapat dilihat pada Tabel 5 hingga Tabel 7.

Tabel 5. Nilai *Liquid Limit*

	Grafik	Rumus
<i>Liquid Limit</i>	58,2%	58,34%

Tabel 6. Nilai *Plastic Limit*

Sampel	<i>Plastic Limit</i>
1	39,05%
2	39,45%
3	41,47%
Rata-Rata	39,99%

Tabel 7. Hasil perhitungan *Plasticity Index*

Hasil Perhitungan	
<i>Liquid Limit</i>	58,34%
<i>Plastic Limit</i>	39,99%
<i>Plasticity Index</i>	18,35%

Grain size analysis

Grain size analysis adalah pengujian yang dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik distribusi partikel berdasarkan ukurannya di dalam tanah. Hasil perhitungan yang didapatkan dari pengujian ini dapat dilihat dari Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Resume persentase sebaran butiran tanah

	% Batuan	% Pasir	% Lanau	% Lempung
Sampel 1	4,27%	23,95%	65,37%	6,41%
Sampel 2	4,31%	24,09%	60,85%	10,75%
Sampel 3	4,26%	22,21%	62,98%	10,56%

Tabel 9. Nilai D_{10} , D_{30} , D_{60}

Sampel Tanah	D_{10}	D_{30}	D_{60}
Sampel 1	0,006108	0,028118	0,026065
Sampel 2	0,009063	0,042300	0,026528
Sampel 3	0,009238	0,063928	0,02858

Unconfined compression strength

Pengujian kuat tekan bebas ini menggunakan sampel tanah lanau. Pada pengujian ini, didapatkan hasil kuat tekan maksimum dan hasil kuat geser seperti yang ada pada Tabel 10 dan Tabel 11.

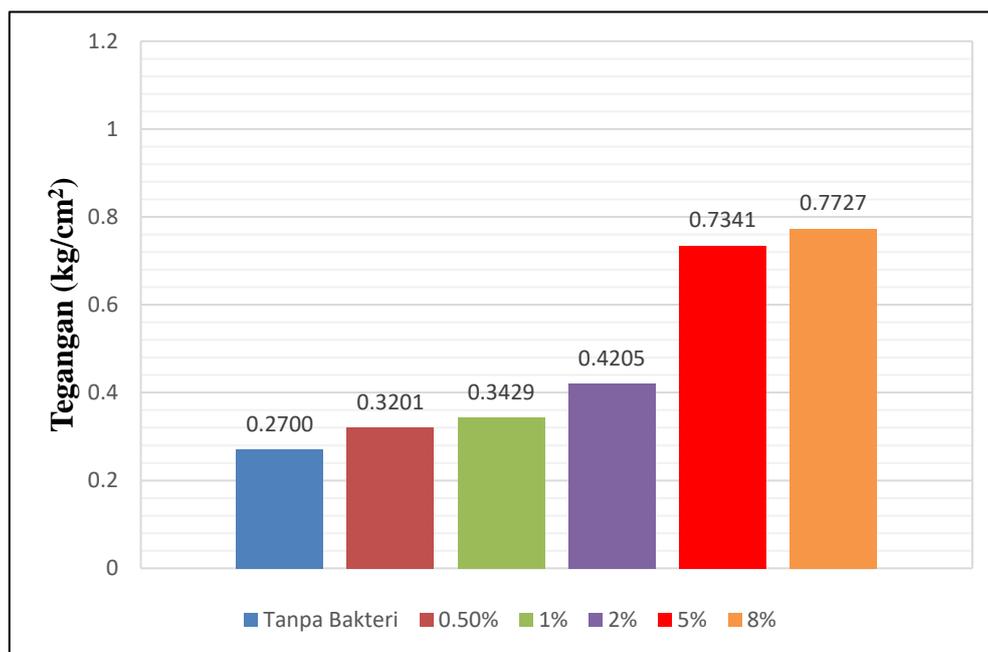
Tabel 10. Hasil kuat tekan maksimum sampel tanah

	Natural	0,5%	1%	2%	5%	8%
5 Hari	0,27003	0,3201	0,3429	0,4205	0,7341	0,7727
15 Hari	0,27003	0,5296	0,6062	0,7840	0,9451	1,0175
25 Hari	0,27003	0,3063	0,2989	0,3559	0,7281	0,5879

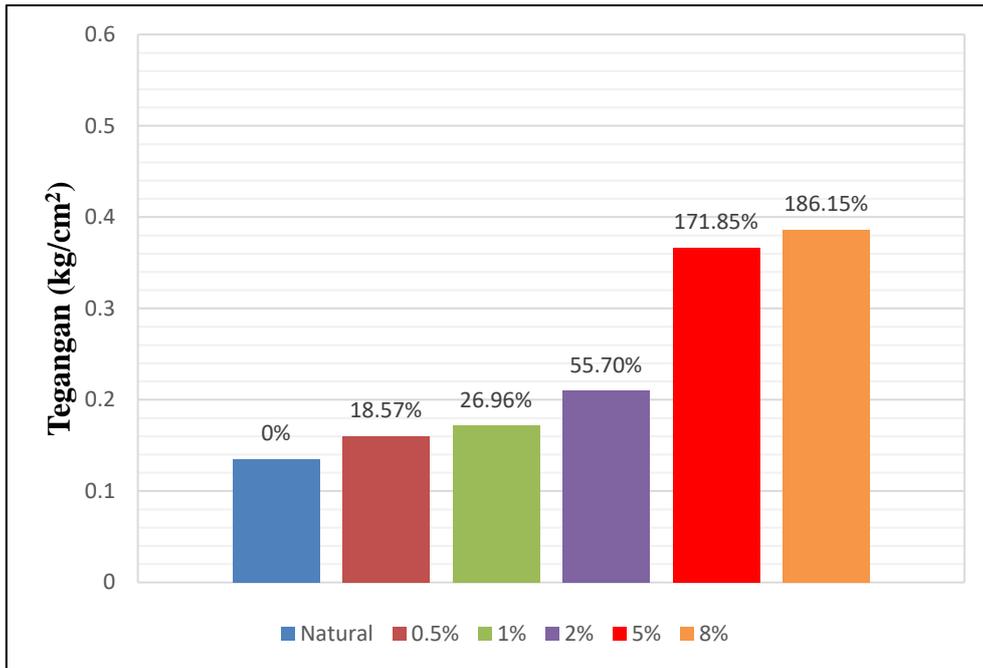
Tabel 11. Hasil kuat geser sampel tanah

	Natural	0,5%	1%	2%	5%	8%
5 Hari	0,135	0,16007	0,1714	0,2102	0,3670	0,3863
15 Hari	0,135	0,2648	0,3031	0,3920	0,4725	0,5088
25 Hari	0,135	0,1531	0,1495	0,1779	0,3641	0,2940

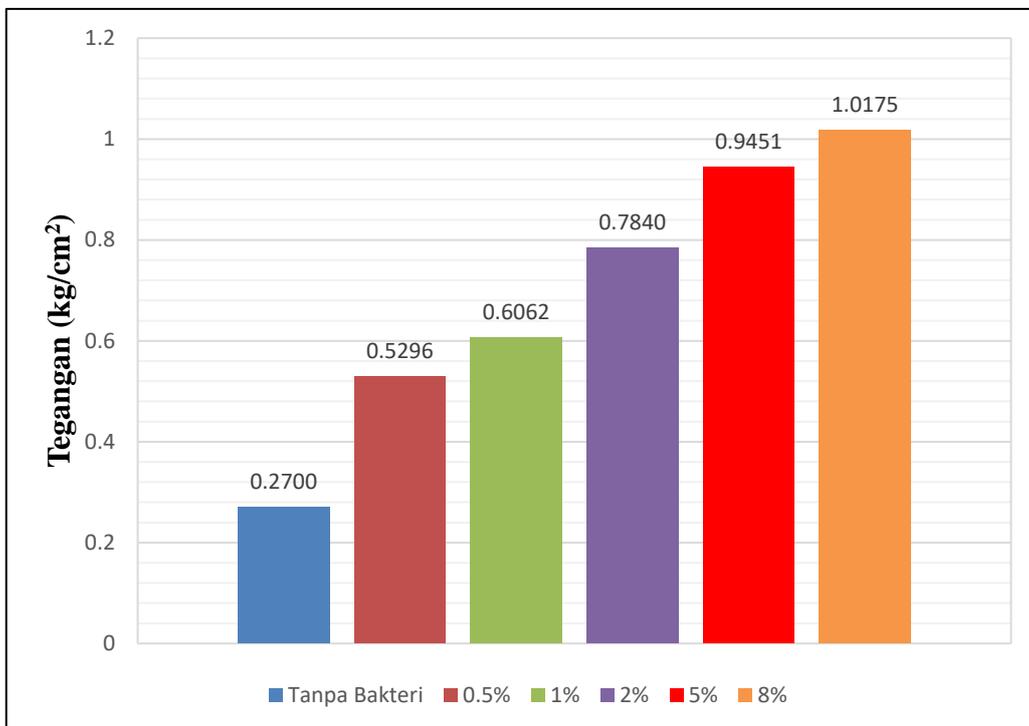
Perbandingan kekuatan sampel tanah tanpa bakteri dan tanah dengan campuran bakteri beserta grafik perubahan persentase kuat geser tanah tanpa bakteri dan tanah dengan campuran bakteri dapat dilihat pada Gambar 4 hingga Gambar 9.



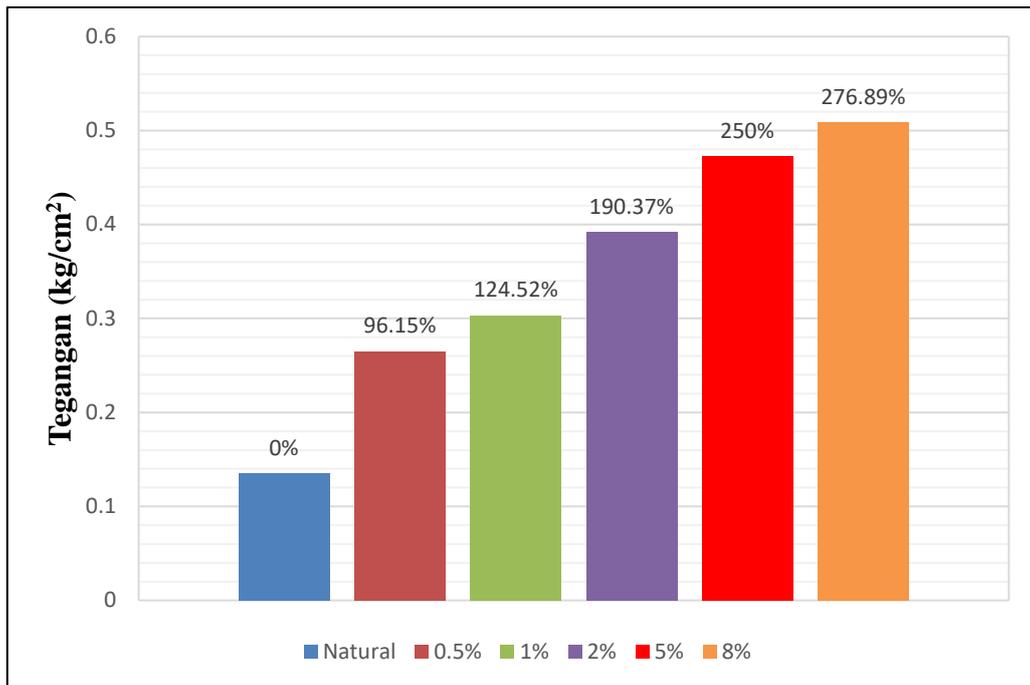
Gambar 4. Grafik kuat tekan tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 5 hari



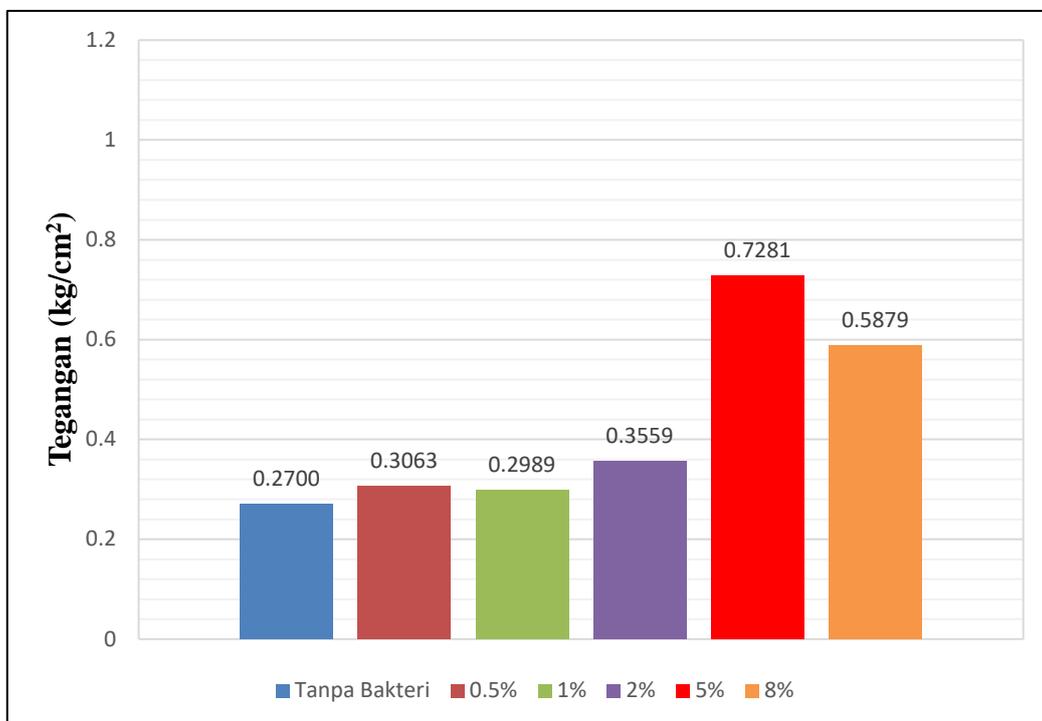
Gambar 5. Grafik perubahan persentase kuat geser tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 5 hari



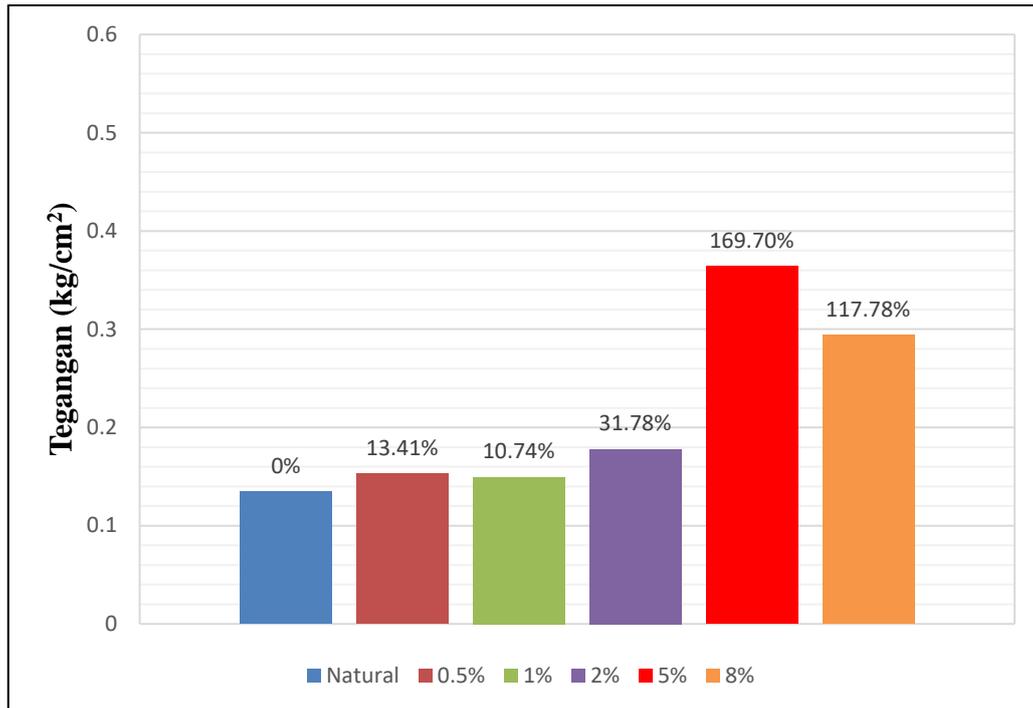
Gambar 6. Grafik kuat tekan tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 15 hari



Gambar 7. Grafik perubahan persentase kuat geser tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 15 hari



Gambar 8. Grafik kuat tekan tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 25 hari



Gambar 9. Grafik perubahan persentase kuat geser tanah seluruh variasi persen bakteri dengan masa pemeraman 25 hari

4. KESIMPULAN

Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil perhitungan data, dapat disimpulkan bahwa **kadar bakteri yang efektif belum dapat tercapai** dikarenakan grafik yang belum mengalami penurunan sehingga belum dapat dikatakan sebagai nilai tertinggi atau kadar bakteri yang paling efektif.
2. Dari hasil penelitian ini, dapat diketahui bahwa **zat aditif mampu meningkatkan nilai tegangan dari tanah**. Dimana dapat dilihat dari grafik kuat tekan, tanah natural memiliki grafik yang lebih landai daripada grafik pada tanah dengan campuran bakteri.
3. Pada pengujian kuat tekan bebas, nilai kuat geser (c_u) yang dihasilkan oleh tanah yang memiliki campuran bakteri mengalami **peningkatan paling besar sebanyak 276,89%** dari kuat geser (c_u) yang dihasilkan oleh tanah natural.
4. Nilai kuat tekan (q_u) dan kuat geser (c_u) tanah yang memiliki campuran bakteri mencapai titik paling tinggi atau puncaknya pada **masa pemeraman 15 hari**.
5. Semakin banyaknya jumlah bakteri dan semakin lama masa pemeraman yang diberikan kepada sampel tanah, maka akan berpengaruh pada tampilan fisik sampel tanah dimana dapat terlihat bercak putih seperti jamur pada sekeliling sampel tanah. Bercak ini merupakan kalsit yang dihasilkan oleh bakteri yang sedang bekerja di dalam tanah.
6. Penggunaan mikroorganisme sebagai perkuatan tanah ini dapat diterapkan di lapangan dengan cara penyemprotan atau penyuntikan ke area tanah yang akan digunakan.
7. Berdasarkan hasil penelitian, belum ditemukan efek jangka panjang yang dapat mengganggu kondisi tanah yang digunakan. Namun, pada saat bakteri sudah kehabisan nutrisi sebagai sumber makanannya, maka tanah tidak akan mengalami peningkatan kekuatan lebih lanjut. Maka dari itu, penggunaan bakteri ini sebaiknya hanya dipergunakan sebagai perkuatan sementara saja untuk menghindari terjadinya penurunan kekuatan pada tanah.

Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan variasi persen bakteri dan masa pemeraman yang lebih beragam guna untuk mendapatkan data yang lebih banyak dan akurat.
2. Menambahkan jumlah metode pengaplikasian bakteri ke tanah, seperti dengan metode semprot (*spray*) atau oles sehingga data yang dihasilkan lebih luas dan beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Anburuvel, A. (2024). The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(1), 1–42. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02554-x>
- Darwis. (2018). *Dasar-dasar Mekanika Tanah*. Pena Indis.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed). Cengage Learning.
- Djide, M, N., & Sartini. (2008). *Dasar-Dasar Mikrobiologi Farmasi*. Lembaga Penerbitan Unhas.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS.
- Losick, R. M. (2020). Bacillus subtilis: A bacterium for all seasons. *Current Biology*, 30(19), R1146–R1150. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.06.083>
- Angeles, M. D., & Scheffers, D.-J. (2021). The Cell Wall of *Bacillus subtilis*. *Current Issues in Molecular Biology*, 539–596. <https://doi.org/10.21775/cimb.041.539>
- Puspitorini, P., & Pradhita, G. I. (2024). *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. MITRA CENDEKIA MEDIA.
- Shinde, B., Sangale, A., Pranita, M., Sanagle, J., & Roham, C. (2024). Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. *Progress in Engineering Science*, 1(2–3), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100009>
- Soesanto, L. (2008). *Pengantar Pengendalian Hayati Penyakit Tanaman: Suplemen Ke Gulma Dan Nematoda*. RajaGrafindo Persada.