

SKRIPSI

**EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH
EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS**

Disusun dan diajukan oleh:

**ANDI MUHAMMAD IHRAMSYAH PADUPPAI
D011191094**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS

Disusun dan diajukan oleh

ANDI MUHAMMAD IHRAMSYAH PADUPPAI
D011 19 1094

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 5 Februari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, M.T

NIP: 196007301986031003

Pembimbing Pendamping,



Ir. Sitti Hijraimi Nur, ST, MT.

NIP: 197711212005012001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng

NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Andi Muhammad Ihramsyah Paduppai

NIM : D011191094

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH
EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 22 February 2024

Menyatakan


Andi Muhammad Ihramsyah paduppai

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas segala kebaikan dan karunia-Nya kepada setiap insan intelektual, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas akhir yang berjudul **“EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS”** merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagi pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN.Eng.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Prof. Dr. Ir. Abd Rahman Djamaluddin, MT.** selaku dosen pembimbing I dan **Ibu Sitti Hijrains Nur, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. **Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Andi Muhammad irfan** dan ibunda **Asriani** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu.
2. Rekan-rekan di **Laboratorium Mekanika Tanah** yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.
3. Bapak dan ibu mahasiswa S3, terkhususnya **Pak Komang, Pak Hairullah, Kak Nurul Marfu'ah, dan Pak Suyadi** yang telah banyak membantu serta memberikan saran serta masukan kepada penulis selama penelitian.
4. Kakak kakak mahasiswa S2, terkhususnya **Kak Januar, Kak Ismi , dan Kak Dwiyanto** telah menjadi teman cerita serta memberikan masukan kepada penulis.
5. Para filsuf penghuni kos PPG, yang beranggotakan **Bagas Fairuz, Didik Apriadi** yang menjadi ruang diskusi dan literasi yang terjadi disunyinya malam.
6. Para Anggota **HIMAB**, yang menjadi memberi semangat serta dukungan kepada penulis
7. Kepada teman patner penelitian penulis, **Andi Ammar Jultiar Alam** yang sering membantu serta memberikan masukan kepada penulis hingga bisa menyelesaikan Skripsi .
8. Saudara-saudari **PORTLAND 2020**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2019** yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.
9. Teman-teman **KKD Geoteknik**, terkhusus Ritha dan Laode Agung yang sering membantu serta memberikan semangat dan dorongan kepada penulis sehingga dapat menyusun skripsi ini.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan, dan dukungan hingga terselesainya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhirnya semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 2023

Penulis

ABSTRAK

ANDI MUHAMMAD IHRAMSYAH PADUPPAI. EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS (dibimbing oleh Abd Rahman Djamaluddin dan Sitti Hijraini Nur.)

Tanah ekspansif adalah jenis tanah yang rentan terhadap perubahan volume akibat perubahan kadar air. Ketidakstabilan tanah ekspansif dapat menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan dan sub grade pada jalan. Penampilan tanah ekspansif dapat dilihat oleh kasat mata. Ketika musim kemarau tanah ekspansif akan mengalami penyusutan yang sangat besar sehingga dapat dilihat pada permukaan tanahnya retak retak sedangkan ketika hujan tanah ekspansif rentan mengalami perubahan volume sehingga menyebabkan kenaikan pada elevasi tanah ekspansif itu sendiri. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh *Microbially induced calcite precipitation* (MICP) dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* terhadap sifat mekanis tanah ekspansif. Tanah ekspansif yang di dapatkan dengan cara mencampurkan tanah asli dengan bentonite dengan komposisi 70% bentonite 30% tanah asli, 50% bentonite 50% tanah asli, serta 100% bentonite agar dapat melihat perubahan nilai kuat tekan ketika nilai PI yang dari sedang hingga paling tinggi. Bentonite itu sendiri merupakan tanah liat alami yang sangat halus, pertama ditemukan di *Fort Benton* Amerika Serikat, memiliki mineral *montmorillonite* yang sama dengan tanah ekspansif serta kemampuan mengembang yang sangat tinggi jika terkena oleh air. Metode stabilisasi dengan metode MICP lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit. Pengujian *Unconfined Compression Test* dipilih sebagai metode untuk menguji nilai kuat tekan bebas yang telah terstabilisasi pada penelitian ini. Stabilisasi tanah ekspansif dilakukan dengan variasi penambahan larutan bakteri mulai dari 4%, 6%, dan 8% terhadap berat sampel, dimana kultur bakteri yang digunakan adalah kultur 3 hari dan 6 hari. Sampel yang telah tercampur dengan variasi bakteri kemudian diperam selama 7 hari, 14 hari, 28 hari kemudian diuji dengan metode *Unconfined Compression Test* untuk melihat nilai kuat tekan yang terjadi pada setiap pemeraman serta penambahan larutan bakteri yang diberikan pada sampel. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa dengan metode MICP dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas tanah ekspansif. Dimana nilai kuat tekan bebas optimum didapatkan rata rata dengan penambahan 8% larutan bakteri kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari yang paling tinggi pada tanah bentonite 100% dengan nilai kuat tekan sebesar 4940.93 kN/m² atau 15 kali lipat lebih tinggi dari nilai kuat tekan bebas tanpa stabilisasi.

Kata Kunci: Kuat tekan bebas, *Microbially Induced Calcite Precipitation*, Bentonite

ABSTRACT

ANDI MUHAMMAD IHRAMSYAH PADUPPAI. *EFFECT OF BIOREMEDIATION WITH MICP ON EXPANSIVE SOIL WITH UNCONFINED COMPRESSION TEST PARAMETERS* (supervised by Abd Rahman Djamaluddin and Sitti Hijraini Nur)

Expansive soil is a type of soil that is susceptible to changes in volume due to changes in water content. The instability of expansive soil can cause damage to building structures and sub grade on roads. The appearance of expansive soil can be seen with the naked eye. During the dry season, expansive soil will experience very large shrinkage so that cracks can be seen on the surface of the soil, whereas when it rains, expansive soil is susceptible to changes in volume, causing an increase in the elevation of the expansive soil itself. This research aims to determine the effect of Microbially induced calcite precipitation (MICP).) using bacillus subtilis bacteria on the mechanical properties of expansive soil. Expansive soil is obtained by mixing original soil with bentonite with a composition of 70% bentonite, 30% original soil, 50% bentonite, 50% original soil, and 100% bentonite in order to see changes in the compressive strength value when the PI value is from medium to highest. . Bentonite itself is a very fine natural clay, first discovered in Fort Benton, United States. It has the same mineral montmorillonite as expansive soil and the ability to expand very high when exposed to water. The stabilization method using the MICP method is more environmentally friendly because it utilizes metabolic pathways. bacteria to form calcite. The Unconfined Compression Test was chosen as a method to test the stabilized unconfined compressive strength value in this study. Stabilization of expansive soil is carried out by varying the addition of bacterial solutions ranging from 4%, 6% and 8% to the sample weight, where the bacterial culture used is a 3 day and 6 day culture. Samples that have been mixed with a variety of bacteria are then cured for 7 days, 14 days, 28 days and then tested using the Unconfined Compression Test method to see the compressive strength value that occurs during each cure and the addition of bacterial solution given to the sample. Based on the research results it was found that with The MICP method using Bacillus subtilis bacteria can increase the unconfined compressive strength value of expansive soil. Where the optimum unconfined compressive strength value was obtained on average by adding 8% bacterial culture solution for 6 days with a curing period of 28 days which was highest in 100% bentonite soil with a compressive strength value of 4940.93 kN/m² or 15 times higher than the compressive strength value. free without stabilization..

Keywords: Unconfined compression test ,Microbially Induced Calcite Precipitation, Bentonite

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	2
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	2
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Definisi Tanah dan Klasifikasi Tanah.....	4
2.2 Tanah Lempung Ekspansif.....	12
2.3 Bentonite	16
2.4 Bakteri <i>Bacillus Subtillis</i>	17
2.5 Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)	19
2.6 Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compression Test).....	20
2.7. Penelitian Terdahulu	21
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	26
3.1 Lokasi Penelitian.....	26
3.2 Metode Pengumpulan Data.....	26
3.3 Kerangka Alir Penelitian.....	27
3.4 Material	29
3.5 Peralatan Laboratorium.....	31
3.5 Standar Pengujian	32
3.6 Pengujian Karakteristik Tanah Asli, Campuran, dan Bentonite	33
3.7 Optimalisasi Bahan Stabilisator	34
3.8 Prosedur Pengujian Sampel	35
3.10 Proses Pembuatan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	39
3.11 Proses Pembuatan Benda Uji <i>Unconfined Compression Test</i>	41
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Karakteristik fisik dan mekanis tanah.....	43
4.2 Karakteristik Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas Variasi Campuran Bentonite dan Tanah Asli Terstabilisasi <i>Bacillus Subtillis</i>	57
4.3 Rekapitulasi Pengaruh Campuran Bakteri dengan Variasi Campuran Bentonite dan Tanah Asli Terhadap Kuat Tekan Bebas	81
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	90
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar	1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA) (Das, Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), 1995).	6
Gambar	2. Rentang Range dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002).	8
Gambar	3. Grafik hubungan antara Presentase Tanah dan Aktivitas Sumber : (Chen, 1975).	15
Gambar	4 .Bakteri Bacillus Subtilis dilihat dari Mikroskop Sumber : (Hussein, 2019)	18
Gambar	5. Lokasi pengambilan sampel tanah	26
Gambar	6. . Bagan Alir Penelitian	28
Gambar	7. Bakteri Bacillus Subtilis	30
Gambar	8. Proses Pembuatan Bakteri Bacillus Subtilis	41
Gambar	9. Sampel yang sudah di cetak dan diberikan wrap	42
Gambar	10. Gradasi Butiran Campuran bentonite Tanah Asli 100%	44
Gambar	11 .Gradasi Butiran Campuran bentonite Bentonite 100%	44
Gambar	12. Gradasi Butiran Variasi Campuran 70% bentonite 30% tanah asli	45
Gambar	13. Gradasi Butiran Variasi Campuran 50% bentonite 50% tanah asli	45
Gambar	14. Grafik batas cair Tanah Asli 100%	46
Gambar	15. Grafik batas cair Bentonite 100%	46
Gambar	16. Grafik Batas Cair Variasi Campuran 70% bentonite 30% tanah asli	47
Gambar	17. Grafik Batas Cair Variasi Campuran 50% bentonite 50% tanah asli	47
Gambar	18. Grafik hubungan Kadar air dengan berat isi kering Tanah Asli 100%	52
Gambar	19. Grafik hubungan Kadar air dengan berat isi kering Bentonite 100%	53
Gambar	20. Grafik hubungan Kadar air dengan berat isi kering Bentonite 70% Tanah Asli 30%	53
Gambar	21. Grafik hubungan Kadar air dengan berat isi kering Bentonite 50% Tanah Asli 50%	54
Gambar	22. Grafik hubungan Tegangan dan Regangan Pada pengujian Kuat Tekan Bebas Variasi Tanah Asli 100%	55
Gambar	23. Grafik hubungan Tegangan dan Regangan Pada pengujian Kuat Tekan Bebas Variasi Bentonite 100%	55
Gambar	24. Grafik hubungan Tegangan dan Regangan Pada pengujian Kuat Tekan Variasi Campuran 70% Bentonite 30% Tanah Asli	56

Gambar 25.	Grafik hubungan Tegangan dan Regangan Pada pengujian Kuat Tekan Variasi Campuran 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	56
Gambar 26.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 3 Hari pada Tanah Asli	58
Gambar 27.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 3 Hari pada Bentonite 100%	59
Gambar 28.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 3 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	60
Gambar 29.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 3 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	61
Gambar 30.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 3 Hari pada Tanah Asli	62
Gambar 31.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 3 Hari pada Bentonite 100%	63
Gambar 32.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 3 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	64
Gambar 33.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 3 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	65
Gambar 34.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 3 Hari pada Tanah Asli	66
Gambar 35.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 3 Hari pada Bentonite 100%	67
Gambar 36.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 3 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	68
Gambar 37.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 3 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	69
Gambar 38.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 6 Hari pada Tanah Asli	70
Gambar 39.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 6 Hari pada Bentonite 100%	71
Gambar 40.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 3 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	72
Gambar 41.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 4% Bakteri Kultur 6 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	73
Gambar 42.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 6 Hari pada Tanah Asli.	74
Gambar 43.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 6 Hari pada Bentonite 100%	75
Gambar 44.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 6 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	76
Gambar 45.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 6 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli.....	77
Gambar 46.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 6 Hari pada Tanah Asli	78
Gambar 47.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 6 Hari pada Bentonite 100%	79
Gambar 48.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 6 Pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli.....	80

Gambar 49.	Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas dengan Penambahan 8% Bakteri Kultur 6 Pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli	81
Gambar 50.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 Hari pada 100% Tanah Asli	82
Gambar 51.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 Hari pada 100% Bentonite	83
Gambar 52.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 Hari pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli Error! Bookmark not defined.	
Gambar 53.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 Hari pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli	84
Gambar 54.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 6 Hari pada 100% Tanah Asli	85
Gambar 55.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 6 Hari pada 100% Bentonite	86
Gambar 56.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 6 Hari pada 70% Bentonite 30% Tanah Asli	86
Gambar 57.	Grafik Hubungan q_u dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 Hari pada 50% Bentonite 50% Tanah Asli	87

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO	8
Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS	11
Tabel 3. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan	13
Tabel 4. Korelasi nilai fraksi lempung lolos saringan no. 200, LL, dan N uji SPT dengan tingkat pengembangan	13
Tabel 5. Hubungan nilai aktivitas dengan tingkat keaktifan	14
Tabel 6. Klasifikasi potensi pengembangan	15
Tabel 7. Penelitian terdahulu tentang bakteri Bacillus Subtilis	21
Tabel 8. Variasi Tanah Penelitian	29
Tabel 9. Alat yang digunakan dalam pengujian sifat fisis	31
Tabel 10. Alat yang digunakan dalam pengujian sifat mekanis Error! Bookmark not defined.	
Tabel 11. Standar pengujian sifat fisis tanah	Error! Bookmark not defined.
Tabel 12. Standar pengujian sifat mekanis tanah	33
Tabel 13. Variasi presentase komposisi bahan stabilisasi dengan variasi tanah ...	34
Tabel 14. Hasil pengujian fisis Variasi Bentonite Dengan Tanah Asli	43
Tabel 15. Replitulasi Pengembangan bebas Variasi Campuran tanah bentonite ...	49
Tabel 16. Rekapitulasi Identifikasi Tanah ekspansif	51
Tabel 17. Hasil Pengujian Kompaksi	52
Tabel 18. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas	54
Tabel 19. Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Sifat Fisis dan Sifat Mekanis Tanah Variasi Campuran Bentonite	57
Tabel 20. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas Variasi Campuran Bentonite dengan Tanah Asli Terstabilisasi Bacillus Subtilis	87
Tabel 21. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Variasi Campuran Bentonite dengan Terstabilisasi Bacillus Subtilis dengan nilai Tertinggi	89

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah ekspansif adalah salah satu jenis tanah yang memiliki karakteristik unik dan berdampak signifikan dalam konstruksi. Tanah lempung ekspansif cenderung mengalami perubahan volume yang drastis seiring dengan perubahan kelembapan. Ketika lembab, tanah lempung ekspansif dapat mengembang dan menyebabkan pengangkatan atau pergeseran struktur di atasnya. Sebaliknya, saat mengering, tanah dapat mengkerut menyebabkan penurunan struktur. Sifat ini membuat tanah lempung ekspansif menjadi tantangan dalam merancang dan membangun bangunan stabil dan tahan lama. Dalam konstruksi, masalah timbul dari tanah lempung ekspansif meliputi retaknya dinding, pergeseran fondasi. Oleh karena itu salah satu cara untuk mengatasi masalah tanah lempung ekspansif adalah dengan menggunakan metode stabilisasi tanah.

Stabilisasi tanah merupakan proses perbaikan tanah secara mekanis atau penambahan suatu material tanah secara kimiawi, guna memperbaiki sifat-sifat fisis tanah dan sifat mekanis tanah. Pada proses stabilisasi secara mekanis, umumnya menggunakan alat bantu seperti alat penumbuk dan penggetar, sementara pada proses stabilisasi kimiawi, umumnya menambahkan *cement*, kapur, abu dan bakteri pada tanah. Namun penggunaan bahan kimia yang berlebihan akan menimbulkan masalah baru, seperti pencemaran dan kerusakan ekosistem di sekitar, sehingga tidak terjadi stabilisasi tanah yang bisa digunakan secara terus menerus (*unsustainable*). Maka dari itu perlu bahan kimia yang ramah lingkungan, sehingga bahan kimia tersebut dapat digunakan untuk stabilisasi tanah secara berkelanjutan (*sustainable*). Salah satunya menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dengan menggunakan metode MICP.

MICP (*Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation*) merupakan salah satu metode inovasi yang bergerak di bidang teknik sipil dan lingkungan dikarenakan metode ini memanfaatkan kemampuan mikroorganisme khususnya bakteri, untuk mengendapkan karbonat kalsium (CaCO_3) dari larutan, yang

membentuk endapan kalsit yang kuat. Dan salah satu pengaplikasiannya menggunakan bakteri *Bacillus Subtilis*.

Bacillus subtilis adalah spesies bakteri yang telah dipelajari dalam konteks ini. *Bacillus subtilis* adalah bakteri gram positif yang tumbuh secara alami di tanah. Bakteri tersebut mampu menghasilkan enzim yang dapat mengubah sifat tanah, seperti meningkatkan kekuatan mekanik dan menurunkan kadar air. Salah satu parameter yang digunakan untuk mengukur kekuatan mekanik tanah adalah kuat tekan bebas (*unconfined compressive strength*).

Berdasarkan uraian tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “*EFEK BIOREMEDIASI DENGAN METODE MICP PADA TANAH EKSPANSIF DENGAN PARAMETER KUAT TEKAN BEBAS*”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana parameter fisis dan klasifikasi tanah ekspansif yang diuji ?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi dan kultur bakteri *Bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan bebas tanah yang telah stabilisasi ?
3. Bagaimana pengaruh masa pemeraman terhadap nilai kuat tekan bebas tanah terstabilisasi *Bacillus Subtilis*?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan Rumusan Masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui parameter fisis dan menelaah klasifikasi tanah yang diuji.
2. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi dan kultur bakteri *Bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan bebas tanah yang telah terstabilisasi
3. Mengetahui pengaruh masa pemeraman terhadap nilai kuat tekan bebas terstabilisasi *Bacillus Subtilis*?

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat yang diharapkan pada penilitan ini yaitu :

1. Dapat memberikan wawasan terhadap pembaca mengenai jenis tanah dan klasifikasi tanah.
2. Dapat memberikan pengetahuan bahwa bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai bahan kimia yang ramah lingkungan, dapat digunakan sebagai stabilisasi tanah lempung ekspansif yang diukur melalui parameter geser langsung.
3. Memberikan alternative untuk meningkatkan daya dukung tanah tentunya pada bidang konstruksi sipil.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini adalah penelitian skala laboratorium.
2. Tanah ekspansif diperoleh dari pencampuran 30% tanah asli + 70% benotonite dan 50% tanah asli + 50% bentonite serta 100% tanah asli dan 100% bentonite
3. Penelitian ini tidak meninjau kandungan mineralogi sampel variasi campuran bentonite dan tanah asli
4. Sifat mekanis tanah dengan bahan tambah bakteri *Bacillus Subtilis* yang diuji adalah pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*).
5. Presentase konsentrasi bakteri yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4%, 6% dan 8% terhadap berat kering tanah.
6. Kultur bakteri yang digunakan yaitu kultur 3 hari dan kultur 6 hari.
7. Waktu pemeraman setelah pencampuran tanah dengan bakteri *Bacillus Subtilis* adalah 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dengan kondisi di laboratorium.
8. Metode bioremediasi yang digunakan adalah *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Tanah dan Klasifikasi Tanah

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak terikat satu sama lain secara kimia dan dari bahan organik yang melapuk (berpartikel padat), disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut. Tanah sangat berguna untuk menjadi bahan bangunan berbagai macam pekerjaan teknik sipil. Seorang ahli teknik sipil harus bisa mempelajari sifat-sifat dasar dari tanah, seperti asal usulnya, penyebaran ukuran butiran, kemampuannya dalam mengalirkan air, pemampatan jika diberikan pembebanan, kekuatan geser, kapasitas daya dukung terhadap beban, dan lain-lain. (Das, Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), 1995).

Tanah sangat penting bagi peranan teknik sipil, karena tidak ada bangunan yang tidak berdiri tepat di atas tanah, tanah yang baik tentunya memiliki kualitas mampu menahan beban konstruksi di atasnya dengan baik, dan dapat bertahan sampai bertahun-tahun dengan penurunan yang tidak terlalu tinggi. Menurut Hardiyatmo (2002), pada bidang teknik sipil tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida yang terkandung diantara partikel, kemudian ruang antar partikel tersebut terisi oleh air, udara ataupun keduanya.

Klasifikasi tanah menurut Das (1995), adalah sistem pengelompokkan jenis tanah yang berbeda namun memiliki sifat serupa berdasarkan pemakaiannya. Klasifikasi tanah dibagi menjadi dua yaitu klasifikasi tanah berdasarkan tekstur dan klasifikasi tanah berdasarkan pemakaian.

2.1.1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur

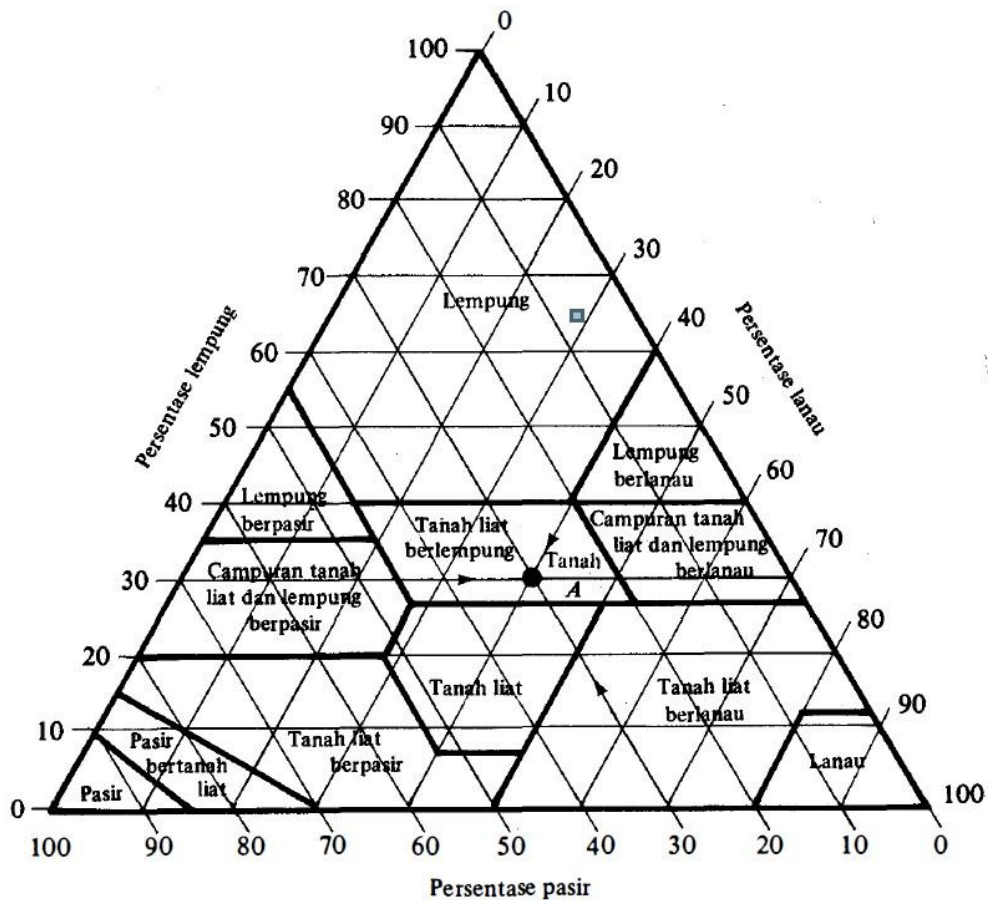
Tanah menurut Bowles (1991) adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari:

1. Berangkal (*boulders*), merupakan potongan batu yang besar, biasanya lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. Untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (*cobbles*).
2. Kerikil (*gravel*), partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
3. Pasir (*sand*), partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
4. Lanau (*silt*), partikel batuan berukuran dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. Lanau dan lempung dalam jumlah besar ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan ke dalam danau atau di dekat garis pantai pada muara sungai.
5. Lempung (*clay*), partikel mineral berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah kohesif.
6. Koloid (*colloids*), partikel mineral yang “diam” berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Menurut Das (1995), Gambar 1 Membagi tanah dalam beberapa kelompok: kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*), atas dasar ukuran butirannya. Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya, seperti lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan seterusnya.

Gambar 1 menunjukkan sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah yang dikembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika (USDA). Sistem ini didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah seperti yang diterangkan oleh sistem USDA, yaitu :

- a. Pasir: butiran dengan diameter 2,0 sampai dengan 0,05 mm
- b. Lanau: butiran dengan diameter 0,05 sampai dengan 0,002 mm
- c. Lempung: butiran dengan diameter lebih kecil dari 0,002 mm.



Gambar 1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA) (Das, Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), 1995).

. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA) (Das, Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), 1995).

2.1.2. Klasifikasi Berdasarkan Pemakaian

Selain klasifikasi tanah dapat dilihat secara langsung lewat tekstur dan ukuran butiran, klasifikasi tanah dapat ditentukan dengan memperhitungkan sifat plastisitas tanah. Karena, jika hanya dilihat berdasarkan tekstur sistem tersebut dianggap tidak memadai untuk sebagian besar keperluan teknik. Untuk sekarang ada dua buah klasifikasi berdasarkan pemakaian yang selalu dipakai oleh ahli teknik sipil.

Klasifikasi tersebut memerlukan perhitungan ukuran butir dan batas-batas Atterberg, dengan sistem yang digunakan adalah Sistem Klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) yang dipakai oleh departemen jalan raya di Amerika, dan Sistem Klasifikasi Unified umumnya lebih disukai oleh para ahli bidang geoteknik.

1. Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)

Sistem klasifikasi ini diberikan pada Tabel 1. Pada sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai A-7. Jika tanah diklasifikasikan dalam kelompok A-1 sampai A-2 adalah tanah berbutir dimana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Jika tanah tersebut 35% lolos dari ayakan No.200 maka tanah tersebut dikategorikan masuk ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran A-4 sampai A-7 sebagian besar adalah lanau atau lempung. Sistem klasifikasi ini berdasarkan dari dua kriteria:

a) Ukuran Butir

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm).

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm).

Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.

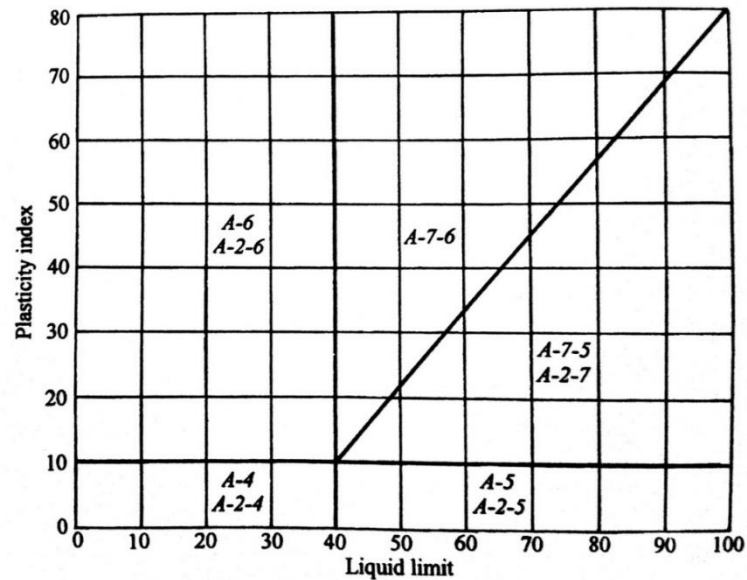
b) Plastisitas

Apabila Indeks Plastisitasnya atau *Plasticity Index* (PI) ≤ 10 maka dikategorikan ke golongan tanah jenis lanau, dan apabila *Plasticity Index* (PI) ≥ 11 maka termasuk ke dalam golongan tanah jenis lempung.

c) Batuan (Ukuran ≥ 75 mm)

Ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka dianjurkan untuk batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu, tetapi presentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Gambar 2 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair (Liquid Limit, LL) dan Indeks Plastisitasnya (PI) untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-2 sampai A-7.



Gambar 2. Rentang Range dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002).

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO

Klasifikasi Umum	Material Granuler ($< 35\%$ lolos saringan no.200)						
	A-1		A-3	A-2			
Kelompok	A-1 a	A-1 b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa Saringan (% lolos)							
2,00 mm (no.10)	50 maks	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-
0.075 mm (no.200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 Maks	35 maks
Sifat Fraksi lolos saringan no. 40							
Batas Cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks Plastisitas (PI)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	6 min
Indeks Kelompok	0		0	0		4 maks	
Tipe Material yang pokok pada umumnya	Pecahan Batu, kerikil dan pasir		Pasir Halus	Kerikil berlanau dan berlempung dan pasir			
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						

Klasifikasi Umum	Tanah-tanah lanau-lempung (> 35% lolos saringan no.200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Kelompok				A7-5/A-7-6
Analisa Saringan (% lolos)				
2,00 mm (no.10)	-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	-	-	-	-
0.075 mm (no.200)	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat Fraksi lolos saringan no. 40				
Batas Cair (LL)	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks Plastisitas (PI)	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks Kelompok	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe Material yang pokok pada umumnya	Tanah berlanau		Tanah Berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sedang sampai buruk			

Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

Catatan:

Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PL)

Untuk $PL > 30$, klasifikasinya A-7-5

Untuk $PL < 30$, klasifikasinya A-7-6

N_p = Nonplastis

2. Sistem Klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*)

Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh seorang bernama Cassagrande pada tahun 1942, untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh The Army Corps of *Engineers* selama *World War II*. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*Coarse grained soil*) yaitu, tanah kerikil dan pasir di mana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200, simbolnya dinamakan dengan Huruf G dan S, yaitu G untuk (*Gravel*) dan S untuk (*Sand*).
2. Tanah berbutir Halus (*Fine grained soil*) yaitu, tanah yang lolos saringan nomor 200 melebihi dari 50% berat total. Simbol dari kelompok ini diawali dengan huruf M untuk lanau (*Silt*)

anorganik, C untuk lempung (Clay) anorganik, dan O untuk Lanau-organik dan lempung organik. Sementara untuk PT digunakan untuk tanah gambut (peat).

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi USCS yaitu:

W = Well Graded (tanah dengan gradasi yang baik)

P = Poorly Graded (tanah dengan gradasi yang buruk)

L = low plasticity (plastisitas rendah) ($LL < 50$)

H = high Plasticity (plastisitas tinggi) ($LL > 50$).

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti: **GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM dan SC**. Dengan factor yang harus diperhatikan:

1. Presentase butiran yang lolos ayakan No. 200 adalah fraksi halus
2. Presentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40
3. Koefisien keseragaman (uniformity coefficient, C_u) dan koefisien gradasi (gradation coefficient, C_c) untuk tanah 0 sampai 12% lolos saringan No. 200
4. Batas cari (LL) dan indeks plastisitas (PI) bagian tanah yang lolos saringan No. 40 (untuk tanah di mana 5% atau lebih lolos saringan No. 200).

Menurut (Hardiyatmo C. , 2002) dalam USCS (Unified Soil Classification System) dibagi beberapa jenis kelompok tanah berdasarkan simbol ke dalam tabel 2.

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium		
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW	
		Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil bertanau, campuran kerikil pasir-lempung		
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		
	Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW	
			SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir bertanau, campuran pasir - lanau		
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung		
			Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Bila batas Atterberg berada di daerah arsis dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol		
			Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$			
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus bertanau atau berlempung	<p>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol</p>		
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung bertanau, lempung kurus ("lean clays")			
		OL	Lanau organik dan lempung bertanau organik dengan plastisitas rendah			
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis			
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clays")			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
		ML atau OL				
	Tanah dengan kadar organik tinggi	P _t	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi		Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

2.2 Tanah Lempung Ekspansif

Tanah ekspansif (*expansive soil*) adalah istilah yang digunakan untuk tanah yang memiliki potensi pengembangan atau penyusutan yang tinggi karena pengaruh kadar air. Tanah ekspansif akan menyusut pada saat kadar air berkurang, dan akan mengembang jika kadar air bertambah (Hardiyatmo, 2017).

Mineral yang terdapat pada tanah ekspansif adalah *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite*. Ketiganya merupakan bentuk kristal Hidros Aluminium Silikat, tetapi sifat dan struktur ketiganya memiliki perbedaan. Perbedaan sifat dan struktur kristal yang ada pada mineral memberikan kelemahan untuk mengalami pengembangan. Pengembangan akan terjadi pada lempung ketika air masuk diantara partikel lempung yang mengakibatkan terjadinya pemisah partikel. (Gunarso, Nuprayogi, & Pardoyo, 2017).

Ada beberapa cara untuk mengidentifikasi suatu tanah bersifat ekspansif, yaitu:

1. Visual

Cara awal yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tanah lempung ekspansif yaitu dengan diamati secara visual. Ketika mengering karakteristik bongkahan tanahnya sangat keras, ketika dipotong akan licin dan ketika basah terasa lembut dan lengket.

2. Identifikasi tidak langsung

Cara ini dilakukan di laboratorium dan membagi tanah ekspansif ke dalam berbagai potensi pengembangan. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian batas-batas Atterberg dan nilai Aktivitas. Beberapa cara identifikasi tanah ekspansif dengan cara tidak langsung adalah sebagai berikut:

a) Cara Chen (1975)

Beberapa cara dalam melakukan identifikasi tanah ekspansif, ada dua cara yang dikemukakan Chen, yaitu: cara pertama, Chen menggunakan indeks tunggal yaitu *Plasticity Index* (PI) dan cara

kedua yaitu menggunakan korelasi antara fraksi lempung lolos saringan no. 200, batas cair (LL), dan nilai N dari hasil uji Standard Penetration Test (SPT) di lapangan.

Tabel 3 di bawah menunjukkan hubungan antara nilai PI dengan potensi pengembangan yang dibagi menjadi 4 bagian, yaitu: potensi pengembangan rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Tanah ekspansif dengan tingkat sangat tinggi yaitu nilai plasticity index > 55%

Tabel 3. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan

Indeks Plastisitas (PI) %	Potensi Pengembangan
0 – 15	Rendah
10 – 35	Sedang
20 – 55	Tinggi
> 55	Sangat Tinggi

Sumber : (Chen, 1975).

Tabel 4. Korelasi nilai fraksi lempung lolos saringan no. 200, LL, dan N uji SPT dengan tingkat pengembangan

< No. 200, %	LL, %	Standard Penetration Blows per Foot	Probable expansion, %	Degree of Expansion
< 30	< 30	< 10	< 1	Low
30 – 60	30 – 40	10 – 20	1 – 5	Medium
60 – 95	40 – 60	20 – 30	3 – 10	High
> 95	> 60	> 30	> 10	Very High

Sumber: (Snethen, Jhonson, & Patrick, 1977).

b) Cara Skempton (1953)

Identifikasi lempung ekspansif juga sering dilakukan dengan memperhatikan nilai aktivitasnya, Skempton (1953) mendefinisikan nilai *activity* (A) dengan persamaan:

$$A = \frac{PI}{c}$$

dimana,

A = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

C = persen fraksi ukuran lempung (D butiran < 0,002 mm, %).

Tabel 11 di bawah menunjukkan hubungan antara nilai aktivitas dengan tingkat keaktifannya.

Tabel 5. Hubungan nilai aktivitas dengan tingkat keaktifan

Status	Range	Potential Swell
Inactive clay	Activity < 0,75	Low
Normal clay	Activity 0,75 – 1.25	Medium
Active clay	Activity > 1,25	High

Sumber : (Skempton, 1953)

c) Cara Seed, Woodward, dan Lundgren

Cara ini menggunakan persamaan aktiviti dari skempton yang dikembangkan menjadi:

$$A = \frac{PI}{C-10}$$

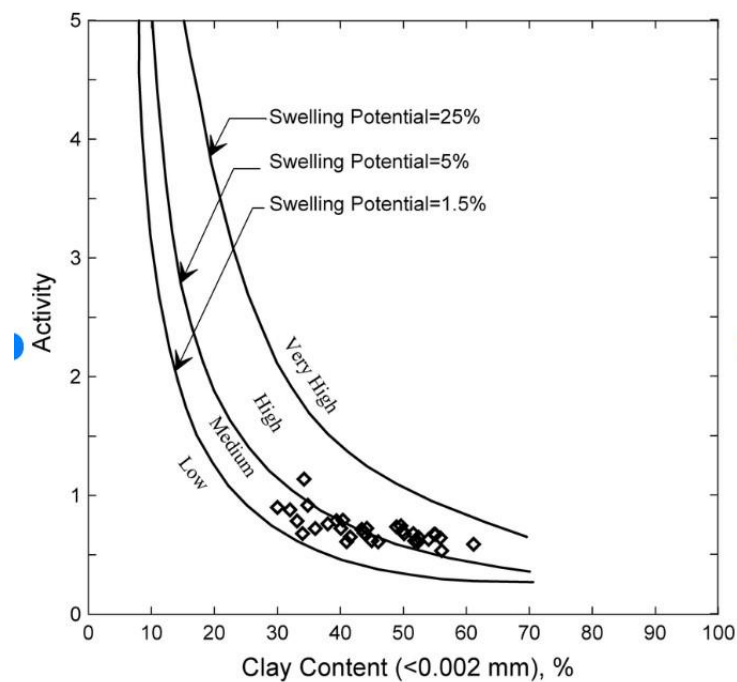
dimana,

A = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

C = persen fraksi ukuran lempung (D butiran < 0,002 mm, %)

Angka 10 adalah faktor reduksi, pada **Gambar 10** di bawah ini merupakan grafik hubungan presentase tanah lolos saringan No.200 dan aktivitas serta potensial swelling.



Gambar 3. Grafik hubungan antara Presentase Tanah dan Aktivitas
Sumber : (Chen, 1975).

Seed, Woodward, dan Lundgren juga mengusulkan hubungan empiris yang lain antara potensi pengembangan dan indeks plastisitas tanah, dengan persamaan:

$$SP = 60 K (PI)^{2,44}$$

Keterangan,

SP = Swell potential (%)

K = $3,6 \times 10^{-5}$

PI = Plasticity indeks (%)

Tabel 6. Klasifikasi potensi pengembangan

Derajat Pengembangan	Potensi Pengembangan, SP (%)
Rendah	0 – 1,5
Sedang	1.5 – 5
Tinggi	5 – 25
Sangat Tinggi	> 25

Sumber : (Snethen, Jhonson, & Patrick, 1977).

3. Identifikasi langsung

Dilakukan test langsung pada tanah dengan cara uji pengembangan bebas dan uji oedometer.

2.3 Bentonite

Bentonite merupakan koloid alam dari silikat aluminium terhidrasi. Bentonite adalah bahan yang terbentuk secara alami yang diciptakan oleh perubahan abu vulkanik di lingkungan laut. Bentonite mempunyai kemampuan untuk mengembang jika terkena air, luas permukaan yang besar dan mudah menyerap air. Adapun sifat lain dari bentonite sebagai berikut:

- a) Berkilap lilin umumnya lunak, plastis dan sarang.
- b) Berwarna pucat dengan kenampakan putih, hijau muda jika segar, berwarna krem bila lapuk.
- c) Bila diraba terasa licin seperti sabun.
- d) Bila dimasukkan ke dalam air akan menghisap air sedikit atau banyak.
- e) Bila terkena hujan singkapan bentonite berubah menjadi bubur dan bila kering akan menimbulkan rekahan yang nyata.

Bentonite memiliki beragam manfaat dalam kehidupan sehari-hari yaitu,

1. Bentonite dapat digunakan sebagai bahan baku pengikat pasit cetak pengecoran.
2. Bahan baku pembuatan semen, keramik, kosmetik.
3. Bentonite juga bisa sebagai zat pengental atau suspensi yang biasanya digunakan pada cat.
4. Untuk keperluan pengeboran, bentonite dapat digunakan sebagai penyusun lumpur, menutupi dinding lubang bor.

Berbicara mengenai mineral alami yang terdapat pada lempung, menurut Wollast (1967) pada proses pelapukan dilihat dari laju aliran air.

1. Bila laju aliran air lebih cepat dibanding dengan dengan peralutan yang terjadi maka akan terbentuk *gibsit*.
2. Bila laju aliran makin rendah dibanding dengan peralutan yang terjadi maka akan terbentuk *kaolinit*.

3. Bila laju aliran hampir berhenti, suatu reaksi akan terjadi antara kation dengan $Al(OH)_3$ dan silika membentuk *montmorillonite*.

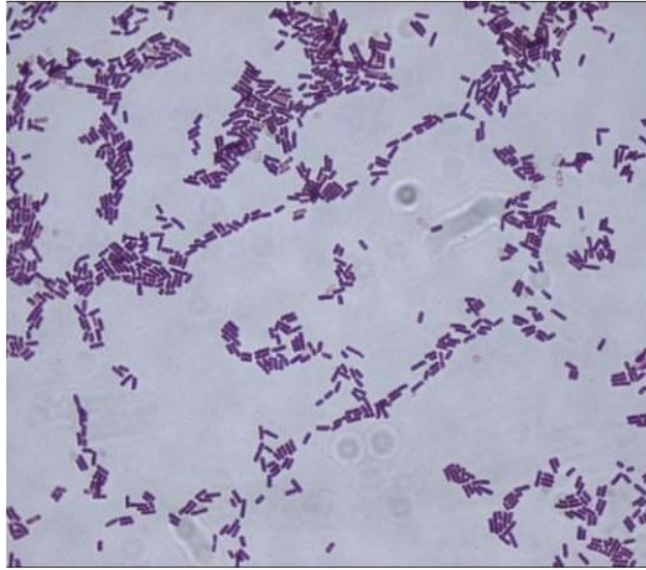
Bentonite didefinisikan sebagai lempung halus yang mengandung 80% lebih terdiri dari mineral *montmorillonite* $(Na, Ca)_{0,33} (Al, Mg)_{12} Si_4 O_{10} (OH)_2 \cdot n H_2O$, bersifat lunak. Lempung tersebut bisa disebut menjadi lempung *montmorillonite* tetapi dalam dunia perdagangan lebih senang menyebutnya bentonite. (Sukandarrumidi, 2009)

2.4 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Bakteri *Bacillus Subtilis* adalah bakteri tidak *pathogen* (tidak memiliki sifat yang menyebabkan penyakit pada manusia, hewan dan tumbuhan) yang dapat diisolasi dari tanah dan menghasilkan antibakteri yang mampu menghambat bakteri gram negatif dan gram positif (Awais, Pervez, Yaqub, & Shah, 2010).

Bacillus subtilis adalah bakteri yang ada di mana-mana diperoleh dari air, tanah, udara, dan tumbuhan yang membusuk residu. Bakteri antagonis ini dapat bertahan hidup pada kondisi lingkungan tertentu, yakni pada suhu -5° sampai $75^\circ C$ dengan tingkat keasaman (pH) antara 2-8. (Suriani & Muis, 2016).

Bakteri *bacillus subtilis* dapat mempercepat proses sementasi karena memiliki enzim urease, enzim urease ini bersifat biokatalisator dengan menghidrolisis urea menjadi *ammonia* yang akan merubah kalsium menjadi kalsium carbonat ($CaCO_3$). Keunggulan bakteri *bacillus subtilis* adalah bakteri ini memiliki endospora yang dapat bertahan hidup lebih lama di cuaca yang ekstrim.



Gambar 4 .Bakteri Bacillus Subtilis dilihat dari Mikroskop
Sumber : (Hussein, 2019)

2.5 Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)

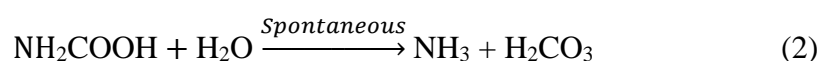
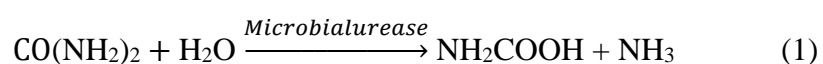
MICP adalah kalsium karbonat yang digerakkan secara biologis (kalsit atau CaCO_3) teknologi presipitasi, yang mencakup dua mekanisme pengendapan CaCO_3 yang dikendalikan secara biologis dan diinduksi secara biologis. Dalam mekanisme yang dikendalikan secara biologis, organisme mengontrol nukleasi dan pertumbuhan partikel mineral, dan secara mandiri mensintesis mineral dalam bentuk yang unik, terlepas dari kondisi lingkungan (Mujah, Shahin, & Cheng, 2016).

Pada contoh mineralisasi yang dikendalikan secara biologis dijelaskan oleh Barabesi (2007) yang menunjukkan bahwa, mineralisasi CaCO_3 dicapai secara molekuler menggunakan *Bacillus subtilis* (Mujah, Shahin, & Cheng, 2016).

Dalam ilmu geoteknik, *grouting* kimia (*Chemical Grouting*), adalah perbaikan tanah yang paling umum digunakan oleh banyak orang. Namun, teknik ini sering kali menjadi penghambat karena alasannya yang mahal dan membutuhkan banyak sumur injeksi untuk mengolah volume yang besar. *Grouting* kimia secara menerus dapat mengurangi permeabilitas tanah yang dirawat, meningkatkan pH air tanah ke tingkat yang sangat basa, sehingga membuat masalah serius pada lingkungan. Oleh karena itu, MICP atau biosementasi hadir, dengan alternatif baru teknologi perbaikan tanah yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba.

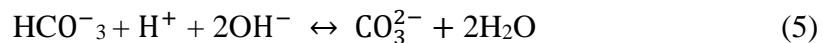
2.5.1 Mekanisme Presipitasi Kalsit

Urea mengkatalisis hidrolisis urea menjadi *ammonium* dan *carbonate*. Dalam reaksi ini, satu mol urea dihidrolisis menjadi satu mol *ammonia* dan satu mol karbamat asam (Persamaan 1), yang secara spontan terhidrolisis menjadi satu mol *ammonia* lainnya dan asam karbonat (Persamaan 2).

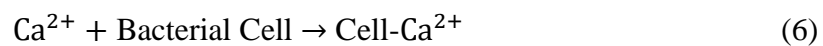


Kedua produk ini NH_3 dan H_2CO_3 selanjutnya diseimbangkan dalam air membentuk bikarbonat (Persamaan 3) dan dua mol ammonium dan dua

mol ion hidroksida (Persamaan 4). Ion hidroksida menghasilkan peningkatan pH, yang dapat menggeser kesetimbangan bikarbonat, menghasilkan pembentukan ion karbonat (Persamaan 5). Pergeseran ini kemudian bisa mengendapkan ion logam.



Pengendapan CaCO_3 terjadi pada permukaan sel bakteri apabila terjadi konsentrasi yang cukup antara Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dalam larutan dapat dilihat pada gambar (Persamaan 6 dan 7) (Anbu, Kang, & Jae-Seong So, 2016).



2.6 Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compression Test).

Kuat tekan bebas adalah tekanan aksial benda uji pada saat mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial mencapai 20%. Uji kuat tekan bebas adalah salah satu cara untuk mengetahui geser tanah. Uji kuat tekan bebas bertujuan untuk menentukan kekuatan tekan bebas suatu jenis tanah yang bersifat kohesif, baik dalam keadaan asli (Undisturbed), buatan (remoulded) maupun tanah yang dipadatkan (Compacted). Benda uji harus mempunyai diameter minimum 30 mm dan partikel (butiran) yang paling besar yang terkandung dalam benda uji harus kecil dari 1/10 diameter benda uji. Rasio tinggi benda uji terhadap diameter harus sama dengan 2 sampai 2.5. Tinggi dan diameter rata-rata benda uji harus ditentukan dengan menggunakan peralatan yang sesuai. Kuat tekan bebas (q_u) adalah harga tegangan aksial maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji silindris sebelum mengalami keruntuhan. Nilai kuat tekan bebas dapat dari pembacaan proving ring dengan tegangan maksimum

$$q_u = \frac{k \times R}{A}$$

Dimana:

q_u = kuat tekan bebas

- k = kalibrasi proving ring
 R = pembacaan maksimum
 A = luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan R

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai stabilisasi tanah dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* yang telah dilakukan, disajikan dalam tabel 7 di bawah.

Tabel 7. Penelitian terdahulu tentang bakteri *Bacillus Subtilis*

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
Muhammad Saleh Nasution, Yusep Muslih Purwana, dan Bambang Setiawan	Penurunan Permeabilitas Dan Peningkatan Kuat Geser Tanah Lanau Menggunakan Pengaruh Mikrobakteri <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Pseudomonas SP</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mekanis tanah yang telah distabilisasi bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Pseudomonas sp</i> dengan waktu pemeraman 15 hari dan 30 hari serta membandingkan nilai koefisien permeabilitas dan kuat geser tanah asli tanpa bakteri dan tanah yang telah dicampur bakteri. Hasilnya kuat geser tanah lanau dengan campuran bakteri pada waktu pemeraman 15 hari mengalami peningkatan sebesar 38.37 % dan 34.88 % dibandingkan dengan hasil uji tanah lanau tanpa bakteri, sedangkan pada pemeraman 30 hari kuat geser meningkat sebesar 48.88 % dan 59.30 %. Hasil pengujian permeabilitas dengan konsentrasi <i>Bacillus Subtilis</i>	e-Jurnal Matriks Teknik Sipil, Desember 2017, pages 1- 8

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>dan <i>Pseudomonas sp</i> yaitu $1,34 \times 10^{-9}$ m/dt. Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> lebih menguntungkan dibanding dengan pseudomonas sp. <i>Bacillus subtilis</i> lebih efektif dalam mengisi rongga dan merekatkan antar partikel tanah hal ini didasari sifat koloni yang berkelompok dan bukan menyebar seperti <i>Pseudomonas sp</i>.</p>	
Angelina Lynda	<p>Karakteristik Kuat Geser Tanah Dengan Metode Stabilisasi Biogrouting Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i></p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil stabilisasi tanah yang optimum dengan metode biogrouting yang dimaksud pada penelitian ini, yaitu ketika nilai parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) yang diperoleh merupakan nilai terbesar dari semua perbandingan pencampuran sampel tanah dengan bakteri untuk waktu pemeraman selama 28 hari. Variasi presentase larutan sementasi dan larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> yaitu tanah pasir berlempung + 0 cc larutan sementasi + 0 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>. Tanah pasir berlempung + 2 cc larutan sementasi + 2 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>. Tanah pasir berlempung + 4 cc larutan sementasi + 4 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>. Hasil stabilisasi</p>	<p>Tugas Akhir Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, 2013</p>

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>biogrouting bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> yang optimum diperoleh pada sampel tanah dengan 3x injeksi (6cc larutan bakteri dan 6cc larutan sementasi). Dimana nilai kohesi yang diperoleh sebesar 1,192 kg/cm² dan nilai sudut geser dalam sebesar 35.07°. karakteristik mekanis tanah yang mengalami stabilisasi optimum mengalami perubahan parameter kuat gesernya yaitu, terjadi peningkatan nilai kohesi sebesar 297% terhadap nilai kohesi sampel tanah asli. Terjadi peningkatan nilai sudut geser dalam sebesar 6,86% terhadap nilai sudut geser dalam tanah asli.</p>	
Andi Mariani Indriani, dan Gunaedy Utomo	<p>Pengaruh <i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i> (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara</p>	<p>Tujuan penelitian ini untuk mengetahui besarnya kohesi dan kuat geser tanah dengan variasi I 95% pasir dan 5% Batubara, variasi II 90% pasir dan 10% Batubara, variasi III 85% pasir dan 15% Batubara. Hasil yang didapatkan dari pengujian Direct Shear pada tanah variasi I menunjukkan terjadi peningkatan nilai kohesi dan nilai sudut geser dalam. Setelah pemeraman 28 hari terjadi peningkatan nilai kohesi dai 17 kPa menjadi 34 kPa sedangkan nilai sudut geser dalam semakin besar</p>	<p>Journal of Civil Engineering and Vocational Education, Vol 10, Maret 2023, pages 53-60</p>

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>dari 31° menjadi 41°. Setelah parameter kohesi dan sudut geser dalam dimasukkan dalam persamaan kuat geser diperoleh nilai kuat geser sebesar 59 kPa atau meningkat 3 kali dibandingkan nilai kuat geser tanah yang tidak distabilisasi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> memberikan efek yang baik terhadap peningkatan nilai kuat geser tanah. Pada tanah terkontaminasi 10% dan 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser masing-masing sebesar 7 kali dan 15 kali dibandingkan tanah yang tidak di stabilisasi.</p>	
<p>Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, dan Tri Harianto</p>	<p><i>A Study on Clay Soil Improvement with Bacillus Subtilis Bacteria as The Road Subbase Layer</i></p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daya dukung tanah lempung dengan plastisitas tinggi yang terstabilisasi bakteri (<i>Bacillus Subtilis</i>). Untuk bakteri yang digunakan adalah bakteri dengan usia kultur 6 hari. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk pengujian California Bearing Ratio (CBR) dan Uji Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compressive Strength) dengan penambahan 2%, 4%, dan 6% menunjukkan bahwa nilai kuat tekan cenderung meningkat dan</p>	<p>International Journal of Geomate, Vol 15, December 2018, pages 114-120</p>

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>menurun pada penambahan 8% bakteri. Kurva kuat tekan juga mengalami kenaikan seiring dengan waktu pemeraman yaitu 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa menggunakan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> sebagai bahan stabilisasi meningkatkan daya dukung tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Daya dukung (Unconfined Compressive Strength = 382 kN/m² dan nilai CBR = 72,33%) menurun pada penggunaan bakteri melebihi 6%</p>	