

TESIS

STUDI PENGARUH CAMPURAN TANAH – BAKTERI (*Bacillus subtilis*) TERHADAP NILAI CBR RENDAMAN DAN TANPA RENDAMAN

A STUDY OF THE EFFECT OF SOIL – BACTERIA (Bacillus subtilis) MIXTURES ON CBR VALUE OF SOAKED AND UNSOAKED

SILVETHER TANDI
D012202009



PROGRAM MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



Optimized using
trial version
www.balesio.com

TESIS

STUDI PENGARUH CAMPURAN TANAH-BAKTERI (*Bacillus Subtilis*) TERHADAP NILAI CBR RENDAMAN DAN TANPA RENDAMAN

SILVETHER TANDI
D012202009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., P.hD
NIP. 196007301986031003

Pembimbing Pendamping



Dr.Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng,Sc
NIP. 197607072005011002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



nmad Isran Ramli, ST. MT,IPM
09262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr.Ir.M.Asad Abdurrahman, ST. M.Eng.PM,IPM
NIP. 197303061998021001



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Silvether Tandil
Nomor mahasiswa : D012202009
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Studi Pengaruh Campuran Tanah-Bakteri (*Bacillus Subtilis*) Terhadap Nilai CBR Rendaman dan Tanpa Rendaman” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Ir. Achmad Bakri Muhiddin., M.Sc, P.hD dan Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* dengan status *under review (revise)* sebagai artikel dengan judul (“*Investigation of the Potential of Bacillus Subtilis for Enhancing CBR or Clay Soil under Unsoaked and Soaked Conditions*”)

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 15 Agustus 2024

Yang menyatakan,



Silvether Tandil



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “Studi Pengaruh Campuran Tanah-Bakteri terhadap Nilai CBR Rendaman dan tanpa Rendaman” dengan baik..

Keberhasilan penyusunan Tesis ini tentu tidak lepas dari bantuan serta dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karenanya penulis ingin menyampaikan terimakasih yang sebesar besarnya kepada Istri Saya tercinta Veliyana Londong Allo, S.Si,.M.Si dan anak-anak saya Jonathan Axel Tandi Liku dan Arsenio Nicholas Tandi Liku atas segala dukungan, pengorbanan dan dukungannya. Kepada kedua orang tua saya M.Tandi Liku dan Hana Andi’ Ratu serta saudara-saudara saya (Henriyana M, ST, ilvinus Liku,. ATT III, Reni Mangguali, S.Kep.,Ners, Melty, S.kep, Ners,.M.Kep, Merry Liku, A.Md.Keb, Yulce Rompon Tandi Liku, S.Pd,.MA) . Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada bapak **Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc.,Ph.D.** dan Bapak **Dr.Eng. Ir. Ardy Arsyad, S.T.,M.Eng.Sc** sebagai Pembimbing Utama dan Pembimbing Pendamping yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan usulan penelitian tesis ini. Tak lupa juga ucapan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas

Hasanuddin serta seluruh staf pasca sarjana yang telah mengisinkan dan memfasilitasi saya dalam selama menempuh pendidikan.



2. Bapak Prof. Dr.Eng. Tri Harianto, ST.,MT.,IPU., ASEAN.Eng. Selaku Kepala Laboratorium Riset Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin yang telah membimbing, mengarahkan dan mengisinkan kami melakukan penelitian di laboratorium.
3. Kepada Seluruh teman-teman S2 Teknik Sipil konsentrasi Geoteknik, Asisten Laboratorium Mekanika Tanah, serta laboran yang telah membantu selama penyelesaian studi ini.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih memerlukan perbaikan, baik itu sebagian ataupun secara menyeluruh. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan usulan Tesis ini demi perbaikan pada masa mendatang. Semoga penelitian ini bermanfaat bagi pembacanya terutama bagi penulis sendiri.

Hormat Kami

Silvether Tandi



ABSTRAK

SILVETHER TANDI. Studi Pengaruh Campuran Tanah – Bakteri (*Bacillus Subtilis*) Terhadap Nilai CBR Rendaman Dan Tanpa Rendaman (dibimbing oleh **Achmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad**)

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan bakteri terhadap karakteristik mekanis tanah asli berupa bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai bahan stabilisasi yang bertujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai CBR tanah. Sampel yang diuji terdiri dari kombinasi material tanah asli dan larutan bakteri dengan beberapa variasi perlakuan yaitu variasi waktu pemeraman 0, 3,7,14 dan 28 hari, persentase waktu kultur bakteri 3 dan 6 hari serta variasi larutan bakteri 4%, 6%, dan 8% terhadap kadar air optimum tanah asli. Pengujian yang dilaksanakan meliputi pengujian sifat fisik dan mekanis tanah asli yang diuji di laboratorium Geoteknik Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Hasil uji karakteristik fisik tanah diperoleh bahwa tanah asli yang digunakan, diidentifikasi adalah tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* pada tanah yang diklasifikasikan sebagai tanah CH atau lempung berplastisitas tinggi menurut USCS dan A-7-5 menurut ASSHTO, dapat meningkatkan nilai CBR tanah. Dimana nilai CBR akan terus meningkat seiring bertambahnya masa pemeraman. Kadar penambahan bakteri *Bacillus subtilis* optimum adalah 6% dengan waktu pemeraman 28 hari yang menghasilkan peningkatan Nilai CBR dari nilai CBR tanah asli dengan metode tanpa rendaman sebesar 4,19% menjadi 38,65% atau meningkat sebesar 9,22 kali lipat. Sedangkan Peningkatan nilai CBR dari nilai CBR tanah asli dengan metode rendaman tidak signifikan dengan nilai 3,80% menjadi 5,81% atau hanya mengalami peningkatan sebesar 1,529 kali lipat.

Kata Kunci: *Bacillus subtilis*, Stabilisasi, CBR.



ABSTRACT

SILVETHER TANDI. A Study Of The Effect Of Soil – Bacteria (*Bacillus Subtilis*) Mixtures On Cbr Value Of Soaked And Unsoaked. (Supervised by **Achmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad**)

This research was conducted to evaluate the effect of adding bacteria on the mechanical characteristics of native soil. *Bacillus Subtilis* bacteria was used as a stabilizing material to determine its influence on the soil's CBR (California Bearing Ratio) value. The tested samples combined native soil material and bacterial solution with several treatment variations. These variations included curing times of 0, 7, 14, and 28 days, bacterial culture time of 3 and 6 days, and bacterial solution concentrations of 4%, 6%, and 8% based on the optimum moisture content of the native soil. The testing was carried out in the Geotechnical Laboratory of the Faculty of Engineering, Hasanuddin University, in Gowa Regency, South Sulawesi Province. The results of the physical and mechanical characteristics testing of the native soil revealed that the soil used was identified as inorganic clay with high plasticity. Classified as CH (Highly Plastic Clay) according to the Unified Soil Classification System (USCS) and A-7-5 according to the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) classification. Based on the research findings, the addition of *Bacillus Subtilis* bacteria to the soil can improve the CBR value of the soil. The optimum of addition of *Bacillus subtilis* bacteria was 6% with a curing time of 28 days which resulted in an increase in the CBR value from the CBR value of the original soil using the method without immersion by 4.80% to 38.65% or an increase of 9.22 times. Meanwhile, the increase in the CBR value from the original soil CBR value using the immersion method was not significant with a value of 3.80% to 5.81% or only an increase of 1.529 times.

Keywords: *Bacillus subtilis*, Stabilizer, CBR.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	vi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah.....	2
I.3 Tujuan Penelitian	2
I.4 Manfaat Penelitian	3
I.5 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Definisi Tanah.....	5
II.2 Klasifikasi Tanah	5
II.3 Tanah Lempung	8
II.4 Perbaikan Tanah Lempung	11
II.5 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	14
II.6 Daya Dukung Tanah	14
II.7 Penelitian Terdahulu	24
BAB III	29
METODOLOGI PENELITIAN	29
III.1 Lokasi dan Wilayah Penelitian	29
III.2 Uji Kultur Bakteri	29
III.3 Rancangan Uji Eksperimental.....	36
III.4 Kerangka Konsep / Alur Penelitian	39
BAB IV	41
SIL DAN PEMBAHASAN	41
1 Karakteristik Sifat Fisik Tanah	41
2 Karakteristik Sifat Mekanis Tanah	44



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
V.1 Kesimpulan	63
V.2 Saran	64



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah.....	16
Gambar 2 Pola keruntuhan tanah a). keruntuhan geser umum, b). keruntuhan geser lokal, c). keruntuhan geser pons.....	24
Gambar 3. Kurva Pertumbuhan Bakteri	30
Gambar 4. Peralatan Pengujian Berat Jenis.....	31
Gambar 5. Peralatan Pengujian Atterberg	32
Gambar 6. Peralatan Pengujian Analisa Saringan	33
Gambar 7. Peralatan Pengujian Hidrometer	34
Gambar 8. Peralatan Pengujian Kompaksi	35
Gambar 9. Peralatan Pengujian Kuat Tekan Bebas	35
Gambar 10. Peralatan Pengujian CBR Laboratorium	36
Gambar 11. Sketsa Benda Uji CBR Lab dan Kuat Tekan Bebas	39
Gambar 12. Bagan Alir Penelitian.....	40
Gambar 13. Diagram klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS.....	43
Gambar 14. Proses pengujian kompaksi.....	44
Gambar 15. Grafik hubungan perubahan kadar air dan berat isi kering tanah asli ...	45
Gambar 16. (a) Sampel Kuat Tekan Bebas yang telah diperam. (b) Proses pengujian Kuat tekan bebas.....	46
Gambar 17. Grafik hubungan tegangan dan regangan pengujian kuat tekan Tanah Asli.....	47
Gambar 18. Grafik nilai kuat tekan tanah asli + bakteri kultur 3 hari.....	48
Gambar 19. Grafik nilai kuat tekan tanah asli + bakteri kultur 6 hari.....	48
Gambar 20. Rekapitulasi nilai UCT optimum tanah asli + Bakteri pemeraman 28 hari	49
21. (a) Proses Pembuatan sampel CBR, (b) Sampel CBR yang telah dibuat dan akan diperam.....	53
22. Proses Pengujian Sampel CBR.....	54



Gambar 23. Grafik Nilai CBR Unsoaked dengan Variasi Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis pada Umur Kultur 3 Hari	55
Gambar 24. Grafik Nilai CBR Unsoaked dengan Variasi Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis pada Umur Kultur 6 Hari.	57
Gambar 25. Perbandingan Nilai CBR rendaman, tanah asli dan Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis pada Umur Kultur 3 Hari	58
Gambar 26. Perbandingan Nilai CBR rendaman, tanah asli dan Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis pada Umur Kultur 3 Hari	60
Gambar 27. Perbandingan Nilai CBR <i>Soaked</i> dan <i>Unsoaked</i> , tanah asli dengan variasi Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> pada Umur Kultur 3 Hari	61



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Klasifikasi tanah sistem Unified.....	6
Tabel 2. Klasifikasi tanah sistem AASHTO.....	7
Tabel 3. Identifikasi di Lapangan Terhadap Konsistensi Tanah	10
Tabel 4. Berat jenis (Gs) berbagai jenis tanah.....	15
Tabel 5. Kekuatan tekan bebas (qu) tanah dengan konsistensinya	22
Tabel 6. Penelitian terdahulu yang dipublikasikan terkait dengan topik penelitian... 24	
Tabel 7. Parameter Uji dan Standar Pengujian Fisik dan Mekanik.....	37
Tabel 8. Total benda uji.....	38
Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tanah	41
Tabel 10. Nilai CBR dengan Variasi Penambahan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> pada Umur Kultur 3 Hari	54
Tabel 11. Nilai CBR dengan Variasi Penambahan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> pada Umur Kultur 6 Hari	56
Tabel 12. Perbandingan Nilai CBR dengan Variasi Penambahan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> pada Umur Kultur 3 Hari.....	58
Tabel 13. Perbandingan Nilai CBR dengan Variasi Umur Kultur 3 dan 6 Hari	59
Tabel 14. Perbandingan Nilai CBR rendaman dan tanpa rendaman dengan Variasi Penambahan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> pada Umur Kultur 3 Hari.	61



DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti/Keterangan
CaCO_3	= Kalsium Karbonat
NaHCO_3	= Natrium bikarbonat
NH_4Cl	= Amonium klorida
CaCl_2	= Kalsium Klorida
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	= Urea
NH_3	= Amonia
MICP	= <i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i>
pH	= Derajat keasaman
G	= Gram
L	= Liter
$^{\circ}\text{C}$	= Celsius
kN	= kilo Newton
ml	= mili liter
Cm	= Sentimeter
%	= Persen
Qu	= Kuat Tekan Bebas
γ_d	= Kepadatan kering
e	= Angka pori
kg	= Kilogram
ϕ	= Sudut geser
Gs	= Berat jenis
ω	= Kadar air
ε	= Regangan
σ	= Tegangan
	= Tinggi
	= <i>Liquid Limit</i> /Batas cair
	= <i>Plastic Limit</i> /Batas Plastik



Lambang/Singkatan	Arti/Keterangan
PI	= <i>Plasticity Indeks/Indeks</i> Plastisitas
SL	= <i>Shrinkage Limit/Batas</i> Susut
C	= Kohesi
Cu	= Cohesi Undrained
LRC	= Kalibrasi alat kuat tekan
LS	= Lintang selatan
BT	= Bujur timur
OMC	= Kadar air optimum
Tf	= Kekuatan geser
ASTM	= <i>American Standard for Testing and materials</i>
AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
SNI	= Standar Nasional Indonesia
UCT	= <i>Unconfined Compression Test</i>
DST	= <i>Direct Shear Test</i>
CBR	= <i>California Bearing Ratio</i>



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan pembangunan saat ini terus berkembang pesat khususnya dalam bidang konstruksi seiring dengan bertambahnya permintaan prasarana gedung perkantoran, perumahan, dan pembangunan jalan untuk menjamin kelancaran sirkulasi barang maupun manusia. Dalam proses pembangunan ini, selain renovasi tidak sedikit juga yang melakukan pembangunan di daerah yang baru sehingga dibutuhkan kondisi atau karakteristik tanah yang baik. Penentuan tanah yang baik adalah sesuatu yang tidak terpisahkan dari sebuah perencanaan atau pembangunan sebuah proyek konstruksi untuk mendapatkan hasil yang baik.

Tanah merupakan material yang memiliki fungsi untuk menyokong / mendukung suatu struktur yang berada di atasnya seperti struktur gedung, jalan, maupun jembatan. Hanya tanah yang memiliki karakteristik teknis (*engineering properties*) baik yang bisa digunakan sebagai material konstruksi (mempunyai karakteristik teknis yang baik).

Tanah mempunyai karakteristik yang berbeda-beda, tanah lempung terutama lempung lunak mempunyai daya dukung sangat kecil sehingga hal tersebut banyak menjadi masalah pada pekerjaan di bidang teknik sipil. Kerusakan struktur bisa terjadi akibat penurunan tanah terutama pada jenis tanah yang memiliki potensi penurunan yang besar seperti lempung lunak.

Oleh sebab itu para perencana harus mengetahui karakteristik tanah pada lokasi dimana akan dibangun suatu konstruksi bangunan. Kerusakan struktur bisa terjadi akibat penurunan tanah terutama pada jenis tanah yang memiliki potensi penurunan yang besar seperti lempung lunak. Tanah dasar yang baik dan stabil merupakan syarat bagi kemampuan konstruksi dalam memikul beban di atasnya.



Usaha-usaha untuk memperbaiki sifat tanah yang mengandung sifat kembang susut besar dapat dilakukan dengan cara stabilisasi. Stabilisasi tanah dapat diartikan sebagai usaha untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah seperti kapasitas dukung, kompresibilitas, permeabilitas, kemudahan dalam pengerjaan, potensi pengembangan dan sensitivitas terhadap perubahan kadar air sehingga dapat memenuhi syarat teknis tertentu (Hardiyatmo, 2012)

Metode perbaikan tanah telah banyak dilakukan baik dengan cara mekanis maupun penggunaan bahan aditif (Bahan kimia). Secara umum yang banyak digunakan untuk stabilisasi tanah dengan cara mekanis yaitu mengatur gradasi butiran tanah dan dilakukan pemadatan tanpa menambah zat tertentu, apabila dengan penambahan aditif kemudian dilakukan pemadatan ini termasuk stabilisasi dengan zat aditif. Untuk tanah lempung lunak salah satu metode stabilisasi yang digunakan yaitu menggunakan metode *grouting* yang tidak ramah lingkungan yang biasanya berupa suspensi (semen, lempung semen, *pozzolan*, *bentonite*, dsb) atau emulsi (aspal, dsb) (Takaendengan et al., 2013)

Mengacu pada latar belakang di atas kami tertarik melakukan penelitian dengan mencari alternatif metode stabilisasi yang ramah lingkungan dengan menggunakan bakteri yang dapat menghasilkan kalsit/kristal kalsium karbonat yang dapat mengubah perilaku butiran material tanah.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik fisik dan mekanis tanah lempung ?
2. Bagaimana pengaruh kultur dan komposisi optimum larutan Bakteri *Bacillus subtilis* untuk stabilisasi tanah lempung ?
3. Bagaimana pengaruh masah curing tanah lempung dengan stabilisasi bakteri *Bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan Bebas dan Nilai CBR dengan metode rendaman dan tanpa rendaman ?

Juan Penelitian

Mengacu pada latar belakang di atas, tujuan penelitian ini adalah:

Mengetahui karakteristik fisik dan mekanis tanah lempung.



2. Mengetahui pengaruh kultur dan komposisi optimum larutan Bakteri *Bacillus subtilis* untuk stabilisasi tanah lempung.
3. Mengetahui pengaruh masa curing tanah lempung dengan stabilisasi bakteri *bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan Bebas dan Nilai CBR dengan metode rendaman dan tanpa rendaman.

I.4 Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi tentang sifat fisik dan mekanis tanah lempung dengan stabilisasi bakteri *Bacillus subtilis*.
2. Memberikan informasi bakteri *Bacillus subtilis* sebagai bahan stabilisasi yang ramah lingkungan dengan kultur dan komposisi yang tepat untuk mendapatkan nilai Kuat Tekan Bebas dan CBR Maksimum.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dalam penelitian pengujian stabilisasi tanah menggunakan bakteri ini untuk menghindari cakupan penelitian yang lebih luas agar penelitian dapat berjalan efektif, serta dapat mencapai sasaran yang diinginkan. Penelitian ini mencakup pengujian eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Dengan uraian sebagai berikut:

1. Material tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lempung yang berasal dari Kab. Gowa.
2. Bahan stabilisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah bakteri *bacillus subtilis* yang didapatkan dari laboratorium Mikrobiologi Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin.



3. Pengujian karakteristik sifat-sifat fisik tanah meliputi
 - a. Pengujian Kadar air
 - b. Pengujian Berat Jenis
 - c. Pengujian batas-batas *atterberg*
 - d. Pengujian gradasi
4. Pengujian Mekanis yang dilakukan adalah uji kompaksi, uji kuat tekan bebas dan uji CBR Laboratorium dengan metode rendaman dan tanpa rendaman.
5. Kultur larutan Bakteri *Bacillus Subtilis* yaitu 3 dan 6 hari, serta Variasi Persentase larutan Bakteri *Bacillus Subtilis* 4%, 6% dan 8% dengan waktu pemeraman 0, 3, 7, 14, dan 28 hari untuk percobaan kuat tekan bebas dan CBR Laboratorium metode rendaman dan tanpa rendaman.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Definisi Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan zat gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat (Das, 1995)

Tanah dapat dibagi atas tiga jenis sifat lekatan yaitu tanah kohesif, tanah non kohesif dan tanah organik yang didefinisikan sebagai berikut:

1. Tanah kohesif adalah tanah yang mempunyai sifat lekatan antara butir-butirnya atau mengandung lempung yang cukup banyak.
2. Tanah non kohesif adalah tanah yang tidak mempunyai atau sedikit sekali lekatan antara butir-butirnya atau hampir tidak mengandung lempung.
3. Tanah organik adalah tanah yang sifatnya sangat dipengaruhi oleh bahan-bahan organik.

II.2 Klasifikasi Tanah

1. Sistem Klasifikasi *Unified* (USCS)

Sistem yang diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 (Tuerah et al., 2017) ini mulanya dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh *The Army Corps of Engineer* selama Perang Dunia II. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

- a) Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*)

1 tanah berpasir.



- b) Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau- organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Tabel 1. Klasifikasi tanah sistem Unified

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Umum
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW Kerikil Bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		Kerikil dengan butiran halus	GP Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			GM Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau
		GC Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	
	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			SP Pasir bergradasi-buruk dan pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		Pasir dengan butiran halus	SM Pasir berlanau, campuran pasir-lanau
			SC Pasir berlempung, campuran pasir - lempung
	Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan Lempung Batas cair 50% atau kurang	ML Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
			CL Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (lean clays)
OL Lanau - organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
Lanau dan Lempung Batas cair lebih dari 50%		MH Lanau anorganik atau pasir halus diatomase, atau lanau diatomae, lanau yang elastis	
		CH Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays)	
		OH Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi	
Tanah - tanah dengan kandungan organik sangat tinggi		PT Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah dengan kandungan organik tinggi	

Sumber: (Das, 1995)



2. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan pada tahun 1929 sebagai *Public Road Administration Classification System*. Sistem ini sudah mengalami beberapa perbaikan; yang berlaku saat ini adalah yang diajukan oleh *Committee on Classification of Materials for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board dalam tahun 1945* (ASTM Standard no D-3282, AASHTO metode M 145)

Dalam sistem ini tanah diklasifikasikan menjadi tujuh kelompok besar yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang termasuk dalam golongan A-1, A-2 dan A-3 termasuk dalam tanah berbutir, dimana 35% atau kurang dari jumlah tanah tersebut lolos ayakan no. 200. Sedangkan tanah yang lebih dari 35% butirannya lolos ayakan no.200 yang masuk dalam golongan A-4, A-5, A-6 dan A-7 adalah tanah lempung atau lanau. A-8 adalah kelompok tanah organik yang bersifat tidak stabil sebagai lapisan struktur jalan raya, maka revisi terakhir oleh AASHTO diabaikan (Sukirman, 1999). Kriteria dalam menentukan golongan tanah dapat diperhatikan dalam tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Klasifikasi tanah sistem AASHTO

Klasifikasi umum	Material granuler (<35% lolos saringan no. 200)						Tanah-tanah lanau-lempung (>35% lolos saringan no. 200)			
	A-1		A-3	A-2		A-4	A-5	A-6	A-7	
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5					A-2-6
Analisis saringan (% lolos)	50 maks		-	-		-	-	-	-	
2,00 mm (no. 10)	-		-	-		-	-	-	-	
0,425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 min	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	
Staf fraksi lolos saringan no. 4)	-		-	40 maks 41 min		40 maks 41 min	40 maks 41 min	40 maks 41 min	40 maks 41 min	
Batas cair (LL)	-		-	10 maks 10 maks	11 min 11 min	10 maks 10 maks	10 maks 10 maks	11 min 11 min	11 min 11 min	
Indeks plastis (PI)	6 maks		np	-		-	-	-	-	
Indeks kelompok (GI)	0		0	0		4 maks	8 maks	12 maks	16 maks 20 maks	
Tipe material yang pokok pada umumnya	pecahan batu, kerikil dan pasir		pasir halus	kerikil berlanau atau berlempung dan pasir		tanah berlanau		tanah berlempung		
Penilaian umum sebagai tanah dasar	sangat baik sampai baik						sedang sampai buruk			

Catatan : Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (FL)
 - jika FL > 30, klasifikasinya A-7-5;
 - jika FL < 30, klasifikasinya A-7-6.
 np = nonplastis



Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

a. Ukuran butir:

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2mm). Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm). Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.

b. Plastisitas:

Tanah berlanau mempunyai indeks plastisitas [*plasticity index* (PI)] sebesar 10 atau kurang. Pasir adalah tanah yang lolos ayakan no.10 (2mm) dan tertahan ayakan no.200 (0.075 mm), Sedangkan lempung mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih dan lolos ayakan no.200. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan- batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Apabila sistem klasifikasi AASHTO dipakai untuk mengklasifikasikan tanah, maka data dari hasil uji dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam Tabel 2 dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan hingga ditemukan angka-angka yang sesuai.

II.3 Tanah Lempung dan Tanah Lanau

a) Tanah Lempung

Lempung adalah jenis tanah yang lunak yang butirannya halus, mempunyai plastisitas yang tinggi dan perubahan kembang susut yang relatif besar, yang dimana ketika kondisi airnya bertambah maka volumenya mengembang dan begitu pula sebaliknya tanah lempung akan menyusut dan pecah-pecah ketika dalam kondisi kering. Plastisitas adalah sifat yang memungkinkan tanah berubah bentuk tanpa perubahan isi dari tanah tersebut. Selain itu tanah lempung juga memiliki sifat yaitu rekatan antara sesama partikel tanah.

Tanah lempung yang dalam keadaan plastis, besar jaringan gaya antara



partikel akan sedemikian hingga partikel bebas untuk relatif menggelincir antara yang satu dengan lainnya, dengan sifat kohesi antara butiran tetap dipelihara. Di alam sangat banyak terdapat tanah berbutir halus yang dalam keadaan plastis.

Ditinjau dari ukuran butirannya, lempung didefinisikan sebagai golongan partikel yang berukuran kurang dari 0.002 mm (Das, 1995). Namun demikian, partikel berukuran antara 0,002 mm sampai 0,005 mm juga masih di golongkan sebagai partikel lempung.

lempung dapat didefinisikan sebagai susunan partikel yang ukurannya kurang dari 0.002 mm (Das, 1995). Menurut Hardiyatmo, (2012b), sifat-sifat yang ada pada tanah lempung adalah ukuran butiran-butiran halusnya $>0,002$ mm, permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler yang tinggi, bersifat sangat kohesif, kadar kembang susut yang tinggi dan proses konsolidasi lambat.

Tanah lempung memiliki sifat dan perilaku yang terlihat pada komposisi mineral, unsur-unsur kimia dan partikel-partikelnya serta pengaruh lingkungan di sekitarnya. Dalam memahami sifat dan perilaku tanah lempung maka diperlukan pengetahuan tentang mineral dan komposisi kimia lempungnya, karena ini merupakan mineralogi yang merupakan faktor utama untuk dapat mengontrol ukuran, bentuk dan sifat serta kimia dari partikel tanah. Tanah lempung memiliki sifat yang khas yaitu apabila dalam keadaan kering dia akan bersifat keras, dan jika basah akan bersifat lunak plastis, dan kohesif, mengembang dan menyusut dengan cepat, sehingga mempunyai perubahan volume yang besar dan itu terjadi karena pengaruh air.

Ada beberapa hal istilah yang perlu dibedakan dalam mempelajari mengenai lempung yaitu:

- a) Penggunaan istilah ukuran lempung, lebih dihubungkan dengan komposisi dari ukuran partikel, yang biasanya berukuran $< 2\mu\text{m}$.
- b) Penggunaan istilah mineral lempung, lebih dihubungkan dengan komposisi ukuran mineral. Ukuran mineral ini lebih spesifik, kadang-kadang ukuran mineral ini $< 2 \mu\text{m}$ dan dapat pula $> 2 \mu\text{m}$, meskipun pada umumnya $< 2 \mu\text{m}$.



Partikel lempung berasal dari pelapukan tanah yang berupa susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel lempung berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus, sehingga lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Terdapat banyak mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Di antaranya terdiri dari kelompok-kelompok: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite*. Terdapat juga kelompok yang lain, misalnya: *chlorite*, *vermiculite*, dan *halloysite* (Hardiyatmo, 2010). Umumnya, terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung.

Menurut Terzaghi dan Peck, (1987) suatu tanah lunak didefinisikan sebagai suatu lempung yang memiliki *unconfined compressive strength* kurang dari 25 kPa dan suatu tanah lunak memiliki tegangan antara 25 sampai 50 kPa. mengkorelasi antara nilai SPT dengan *unconfined compression strength*, yang mengklasifikasikan tanah lempung dengan nilai $N \leq 2$ sebagai tanah sangat lunak, dan untuk N antara 2 – 4 sebagai tanah lunak. Berdasarkan uji lapangan, lempung lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jari tangan menggunakan sifat umum lempung lunak seperti dalam Tabel 3.

Tabel 3. Identifikasi di Lapangan Terhadap Konsistensi Tanah

No.	Konsistensi	Identifikasi di Lapangan
1.	Sangat Lunak	Meleleh di antara jari-jari tangan ketika Diperas
2.	Lunak	Dapat diremas dengan mudah
3.	Sedang	Dapat diremas dengan tekanan jari yang kuat
4.	Kaku	Tidak dapat diremas dengan jari, dapat digencet dengan ibu jari
5.	Sangat Kaku	Dapat digencet dengan kuku ibu jari

(Craig & Susilo, 1989)



h Lanau

ah lanau adalah tanah dengan ukuran mikroskopis sampai dengan sub pis yang sangat halus yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi

penyusun batuan. Lanau adalah bahan yang merupakan peralihan antara lempung dan pasir halus. Kurang plastis dan lebih mudah ditembus air daripada lempung dan memperlihatkan sifat dilatansi yang tidak terdapat pada lempung. Dilatansi adalah sifat yang menunjukkan gejala perubahan isi apabila lanau itu dirubah bentuknya. Lanau adalah material yang butiran-butirannya lolos saringan no.200. Tanah jenis lanau ini dibedakan menjadi 2 kategori, yaitu lanau yang dikarakteristikan sebagai tepung batu yang tidak berkoheisi dan tidak plastis, dan lanau yang bersifat plastis. Sifat-sifat teknis lanau tepung batu lebih mendekati sifat pasir halus. menurut sistem USCS lanau mempunyai ukuran butiran halus <0.075 mm. Lanau yang merupakan butiran halus mempunyai sifat-sifat yang tidak menguntungkan, antara lain;

- Kuat geser rendah, segera sesudah penerapan beban.
- Kapilaritas tinggi.
- Permeabilitas rendah.
- Kerapatan relatif rendah dan sulit dipadatkan.
- Bersifat sangat kohesif, kadar kembang susut (swelling) yang tinggi, dan proses terjadinya konsolidasi lambat.

II.4 Perbaikan Tanah Lempung

1. Stabilisasi tanah lempung (*Soil Stabilization*)

Stabilisasi tanah merupakan usaha perbaikan daya dukung (mutu) tanah yang tidak atau kurang baik. Dapat juga dikatakan bahwa stabilisasi tanah ialah usaha meningkatkan daya dukung dengan mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas) tanah, mengurangi besarnya penurunan tanah yang tidak diinginkan.

Dalam stabilisasi atau *soil improvement* pada tanah lanau plastisitas tinggi umumnya treatment yang diberikan dengan bermacam-macam bahan stabilisasi seperti *ash*, semen, kapur, atau bahan yang mudah ditemukan di berbagai daerah. Stabilisasi untuk tanah dasar jalan dilakukan dengan pemadatan untuk lebih nilai kepadatan (*density*) yang lebih besar, meningkatkan kekuatan



geser, menurunkan angka permeabilitas, mempercepat konsolidasi.

Apabila suatu tanah yang terdapat di lapangan bersifat sangat lepas atau sangat mudah tertekan dan mempunyai indeks konsistensi yang tidak sesuai. Beberapa metode pelaksanaan stabilisasi tanah, yaitu : stabilisasi mekanik, stabilisasi fisik, Stabilisasi kimia.

Stabilisasi mekanik merupakan upaya untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum yang dilakukan dengan menggunakan peralatan mekanis seperti : mesin gilas (*roller*), benda berat yang dijatuhkan (*pounde*). Ledakan (*eksplosif*), tekanan statis dan sebagainya. Stabilisasi mekanik dilakukan tanpa perubahan material baru. Metode ini meningkatkan kekuatan tanah, mengurangi kompressibilitas dan permeabilitas.

Stabilisasi Fisik adalah suatu cara untuk mengubah sifat-sifat tanah dengan memanfaatkan reaksi-reaksi tanah, misalnya : pemanasan (*heating*), Pendingin (*colling*), menggunakan arus listrik, salah satu jenis stabilisasi fisik yang sering dipakai adalah pemanasan.

Stabilisasi kimia adalah menambahkan bahan stabilisasi misalnya semen, kapur, bitumen atau bahan kimia lainnya. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perbaikan yang signifikan, walau demikian, masih ada saja terjadi kelemahan-kelemahan. Hal tersebut mendorong kalangan industri untuk selalu mencari bahan lain yang dapat digunakan sebagai bahan stabilisasi.

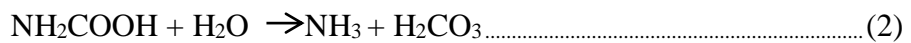
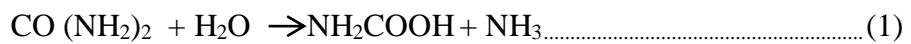
2. Stabilisasi tanah lanau dengan bakteri *Bacillus subtilis*

Salah satu jenis stabilisasi ialah dengan menggunakan mikro organisme yaitu bio stabilisasi, metode ini baik untuk diaplikasikan karena ramah lingkungan. Teknik pemanfaatan mikroba tanah disebut *Microbially Induced Calcit Precipitate* (MICP). Mikroorganisme (bakteri) yang digunakan adalah *Bacillus subtilis* bersama dengan sumber kalsium terlarut yang bila ditambahkan ke dalam tanah dengan penanganan yang tepat akan memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, seperti: kekuatan dan kemudahan dikerjakan (*workability*) dan plastisitas. Beberapa mekanisme identifikasi dimana bakteri dapat menginduksi presipitasi kalsium karbonat, hidrolisis urea, dinitrifikasi, produksi sulfat, dan pengurangan besi.

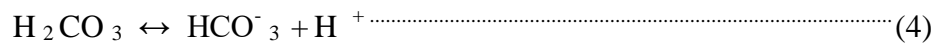
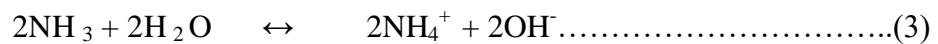


Reaksi pengendapan (presipitasi) merupakan reaksi pembentukan padatan dalam larutan atau dalam padatan lain selama reaksi kimia. Pengendapan juga dapat terjadi adanya difusi dalam padatan, ketika reaksi terjadi dalam larutan cair, padatan terbentuk disebut endapan.

Urea mikroba mengkatalisis hidrolisis urea menjadi amonium dan karbonat. Satu mol urea di hidrolisis secara intraseluler sampai 1 mol amonia dan 1 mol asam karbonat (1), yang secara spontan menghidrolisis untuk membentuk tambahan 1 mol amonia dan asam karbonat (2)



Amonium dan asam karbonat membentuk bikarbonat dan 2 mol ion amonium dan hidroksida dalam air (3 & 4)



Produksi ion hidroksida menghasilkan peningkatan pH₁ yang pada gilirannya dapat mengubah ekuilibrium bikarbonat, menghasilkan pembentukan ion karbonat (5)



Endapan karbonat yang dihasilkan mengendap dengan adanya kalsium sebagai kristal kalsium karbonat (6)



membentuk monolayer kalsit semakin meningkatkan afinitas bakteri ke permukaan tanah, menghasil produksi beberapa lapisan kalsit.



II.5 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Bacillus subtilis merupakan bakteri terbentuk batang berukuran $0,5 - 2,5 \times 1,2-10$ mikron, tersusun dalam sepasang atau bentuk rantai, dimana selika meliputi seluruh permukaan sel. Dalam kondisi kritis mampu membentuk spora. Dapat tumbuh pada suhu maksimum $25-75^{\circ}\text{C}$. Dapat ditemukan di udara, air, tanah, bulu binatang, dan bangkai, pH optimum tumbuh $5,5 - 8,5$. (Brock et al., 1994), mengatakan bahwa *Bacillus* mampu memproduksi enzim *hydrolytic* untuk memecah polisakarida, asam nukleat, dan lemak yang memungkinkan organisme menggunakannya sebagai sumber karbon dan elektron. Selain itu bakteri genus *Bacillus* juga mengandung enzim protease, lipase, amilase, dan selulosa.

Bakteri merupakan organisme mikroskopis rata-rata berdiameter $1,25$ mikrometer (μm). (mikrometer = $1/1000000$ meter). Bakteri yang terkecil adalah *Dialister pneumosintes* dengan Panjang tubuh $0,15 - 0,30 \mu\text{m}$. Ukuran bakteri adalah mikroskopis artinya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop. Bakteri aktif bergerak pada kondisi lembab. Pada keadaan kurang air, bakteri tidak aktif bahkan dapat menyebabkan kematian.

II.6 Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah dapat didefinisikan sebagai sifat yang berkaitan dengan elemen penyusun massa tanah yang ada. Sifat tanah ditunjukkan dengan parameter yang disebut dengan indeks sifat tanah atau indeks sifat-sifat fisik tanah, sifat fisik tanah umumnya terdiri dari beberapa macam seperti berat volume, kadar air, porositas, angka pori, derajat kejenuhan, derajat kepadatan, derajat kerapatan, berat jenis, analisis butiran, batas cair, batas plastis, batas susut dan sebagainya.

Nilai dari sifat fisik tanah didapatkan dari pengujian sampel di laboratorium yang kemudian dihitung menggunakan rumus-rumus dasar sebagai berikut (Hardiyatmo, 2012).



Kadar Air.

Kadar air (*water content*) adalah perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s) di dalam massa tanah, yang dinyatakan

dalam rumus sebagai berikut:

$$w = \frac{w_w}{w_s} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

2. Berat Jenis Tanah

Berat jenis (Gs) didefinisikan sebagai perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada temperatur 4°C yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots (8)$$

Tabel 4. Berat jenis (Gs) berbagai jenis tanah

Jenis Tanah	Berat Jenis (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

Sumber :(Hardiyatmo, 2012)

3. Berat Volume

Berat volume tanah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat butiran tanah dengan volume total tanah. Berat volume tanah dibagi menjadi tiga kategori yakni berat volume basah (γ_b), berat volume kering (γ_d), dan berat volume padat (γ_s) (Bowles, 1984). Adapun persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

Berat volume basah, $\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (9)$

Berat volume kering, $\gamma = \frac{W_s}{V} \dots\dots\dots (10)$

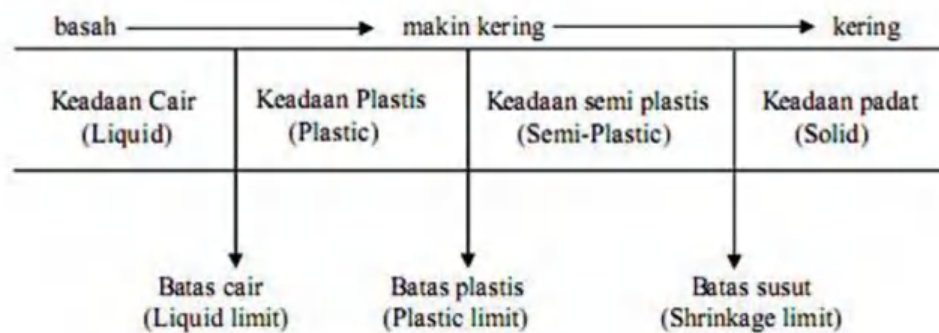
Berat volume padat, $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \dots\dots\dots (11)$

Batas-Batas Atterberg Tanah

Konsistensi tanah sangat dipengaruhi oleh jumlah air yang terkandung



di dalamnya, dimana tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat, dan padat. Batas cair dan batas plastis tidak secara langsung memberi angka-angka yang dapat dipakai dalam perhitungan desain. Tanah yang mempunyai batas cair tinggi biasanya mempunyai sifat-sifat teknis yang buruk, yaitu kekuatannya rendah, kompresibilitasnya tinggi dan sulit dalam pematatannya. Dalam pemeriksaan batas-batas atterberg, terdapat tiga komponen yang akan ditinjau yang terdiri atas; batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas susut (*shrinkage limit*). Batas-batas konsistensi tanah ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah.

a). Batas Cair (*LL*)

Batas Cair didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair bisa juga dituliskan dengan persamaan

$$LL = \omega_N \left[\frac{N}{25} \right]^{\tan \beta} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana,

N = jumlah pukulan untuk menutup celah 0,5 inch (12,7mm)

ω_N = kadar air

$\tan \beta = 0.121$: beberapa tanah tertentu nilainya tidak sama dengan 0.121



b). Batas Plastis (*PL*)

Batas plastis didefinisikan sebagai nilai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dengan daerah semi padat. Nilai batas plastis ini ditentukan dengan percobaan menggulung tanah hingga diameter 3,1 mm (1/8 inchi) dan mulai mengalami retak-retak. Kadar air tanah yang digulung dalam kondisi tersebut merupakan nilai “batas plastis” tanah.

c). Indeks Plastisitas (*PI*)

Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*) adalah perbedaan antara batas cair dan batas plastis suatu tanah (Das, 1998). Indeks Plastisitas (*PI*) dapat dihitung dengan pendekatan rumus sebagai berikut:

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots (13)$$

keterangan:

PI = Indeks Plastisitas

LL= Batas cair pada ketukan 25

PL= Batas plastis

d). Batas Susut (*SL*)

Batas susut dapat didefenisikan sebagai nilai kadar air pada kedudukan antara semi padat dengan padat. Pada kondisi ini pengurangan kadar air dalam tanah tidak akan mempengaruhi lagi pengurangan volume pada tanah. Harus diketahui bahwa apabila batas susut ini semakin kecil, maka tanah akan lebih mudah mengalami perubahan volume, yaitu semakin dikit jumlah air yang dibutuhkan untuk menyusut. Batas susut dapat dihitung dengan pendekatan rumus sebagai berikut:

$$SL = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_2} - \frac{(v_w - v_d)}{m_2} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (14)$$

Dimana:

m_1 = berat tanah basah dalam cawan percobaan (gram)

m_2 = berat tanah kering oven (gram)

v_w = volume tanah basah dalam cawan percobaan (cm^3),



v_d = volume tanah kering oven (cm^3)
 γ_w = berat volume air (gram/cm^3)

5. Analisa Saringan

Ukuran butiran ditentukan dengan melakukan uji saringan tanah melalui satu set saringan dimana lubang-lubang saringan tersebut makin kecil secara berurutan. Berdasarkan hasil uji saringan tersebut maka dapat diketahui jenis tanah. Untuk membedakan antara tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus, kita memakai saringan no. 200:

- Tanah berbutir kasar adalah tanah dimana butiran yang tertahan saringan No.200 dan kandungan fraksinya > 50%.
- Tanah berbutir halus adalah tanah dimana butiran yang lolos saringan No.200 dan kandungan fraksinya > 50%.
-

6. Hidrometer

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan ukuran dan susunan butir (gradasi) yang lolos saringan no.200. Beberapa rumus yang digunakan dalam perhitungan analisa hidrometer adalah:

- $R_{cp} = R + \text{temperature correction} + \text{zero correction} \dots \dots \dots (15)$

Dimana: R_{cp} adalah hasil pembacaan alat ukur hidrometer terkoreksi

R adalah hasil pembacaan alat ukur hidrometer

- Menghitung persentase butiran halus

$$\% \text{ butiran halus} = \frac{a \cdot R_{cp}}{W_s} \times 100\% \dots \dots \dots (16)$$

Dimana: W_s = berat kering contoh tanah

a = koreksi untuk berat jenis dari butiran tanah

$$a = \frac{G_s \times 1,65}{(G_s - 1) \times 2,65} \dots \dots \dots (17)$$

encari garis tengah butir-butir tanah:



$$D = K\sqrt{l/t} \dots\dots\dots (18)$$

Dimana:

K = Rasio kekentalan air yang ditentukan dengan menggunakan grafik

L = Panjang efektif yang ditentukan dengan menggunakan grafik yang diberikan pada gambar sesuai dengan harga R yang bersangkutan.

t = Waktu pembacaan

II.7 Pemadatan Tanah

Material tanah bukan hanya dimanfaatkan sebagai lapisan pendukung konstruksi, tetapi juga tidak jarang digunakan secara langsung sebagai bahan konstruksi. Tanah yang dimanfaatkan sebagai pendukung konstruksi seperti pada subgrade jalan, lapisan dasar pondasi untuk berbagai jenis konstruksi, dan lain-lain. Sedangkan tanah yang digunakan secara langsung sebagai bahan konstruksi seperti *backfill* dinding penahan, *subbase* jalan, material bendung tipe urugan, material tanggul/pematang, dan lain sebagainya. Apabila kondisi tanah kurang baik, maka perlu dilakukan perbaikan, dan metode pemadatan adalah salah satu cara perbaikan tanah yang sering dilakukan, baik untuk tanah yang digunakan sebagai material bangunan maupun tanah yang dimanfaatkan sebagai lapisan dasar pendukung pondasi.

Pada dasarnya pemadatan tanah merupakan salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan geser, serta memperbaiki sifat-sifat fisis pada tanah. Ada beberapa rumus yang digunakan dalam pengujian ini, diantaranya:

- Menghitung kadar air

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (19)$$

- Menghitung kadar air akhir

$$\omega_{akhir} = \omega_{awal} + \left(\frac{\omega_{awal} + \text{penambahan air}}{\text{berat tanah}} \right) \times 100 \quad (20)$$

Menghitung berat volume basah



$$\gamma = \frac{W_w}{V_{mould}} \quad (21)$$

- Menghitung berat kering

$$W_{dry} = \frac{W_w}{1 + \left(\frac{\omega}{100}\right)} \quad (22)$$

- Menghitung berat volume kering

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (23)$$

- Menghitung berat volume total

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} \quad (24)$$

Kepadatan tanah dapat diukur dengan nilai berat volume kering yang dapat dicapai (γ_d). Pada proses pemadatan akan memperlihatkan fenomena bahwa “berat volume kering” akan bertambah seiring penambahan kadar air. Pada kadar air nol ($w = 0$), berat volume tanah basah (γ_b), akan sama dengan berat volume tanah kering (γ_d). Apabila kadar air ditambahkan secara berangsur-angsur dan pemadatan tetap dilakukan dengan nilai usaha pemadatan yang sama, maka berat butiran tanah per satuan volume juga akan bertambah.

II.8 Kuat Tekan bebas

Unconfined Compression Test adalah pengujian laboratorium untuk mengukur seberapa besar kuat dukung tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai tanah tersebut terpisah dari butiran-butirannya dan juga regangan tanah akibat tekanan tersebut.. Metode uji kuat tekan bebas tanah kohesif dimaksudkan untuk menentukan kuat tekan bebas contoh tanah yang memiliki kohesi, baik tanah tidak terganggu (*undisturbed*), dicetak ulang (*remolded*) maupun contoh tanah yang dipadatkan (*compacted*). Dari kuat tekan bebas dapat diketahui kekuatan geser *undrained* (C_u),

akan didapat klasifikasi tanah berdasarkan pada konsistensi tanah pada uji (Wani & Mir, 2021).

Percobaan ini merupakan suatu cara pemeriksaan untuk mendapatkan daya



dukung tanah. Dalam percobaan ini didapatkan kuat tekan bebas dari suatu tanah yaitu besarnya tekanan aksial yang diperlukan untuk menekan suatu silinder tanah sampai pecah atau sebesar 20% dari tinggi tanah mengalami perpindahan bila tanah tersebut tidak pecah. Pada Tabel 4 memperlihatkan kekuatan tekan bebas (q_u) tanah lempung dengan konsistensinya. Pada saat benda uji diberi beban maka luas contoh di bagian tengah akan membesar seiring dengan ditambahkan tegangan. Tegangan aksial berangsur - angsur ditambah sampai benda uji mengalami keruntuhan.

Pada saat keruntuhannya karena $\sigma_3 = 0$, maka :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f \quad (25)$$

Kohesi tanah undrained (c_u) adalah :

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (26)$$

dengan:

σ_1 = tegangan utama mayor/tegangan aksial (kg/cm^2)

σ_3 = tegangan sel (kg/cm^2)

$\Delta\sigma_f$ = tegangan deviator (kg/cm^2)

q_u = kuat tekan bebas (kg/cm^2)

c_u = kohesi tanah undrained (kg/cm^2)

Rumus-rumus yang digunakan untuk pengujian UCT adalah sebagai berikut:

1) Regangan aksial (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{h} \quad (27)$$

2) Tegangan normal rata-rata (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{P}{A_r} \quad (28)$$

3) Luas penampang benda uji rata-rata/ terkoreksi (A_r)

$$A_r = \frac{A_o}{1 - \varepsilon} \quad (29)$$

Dengan :

ε = regangan aksial (%)

σ_r = tegangan normal rata-rata (kg/cm^2)

A_r = luas penampang rata-rata (cm^2)



h = tinggi benda uji semula (cm)

ΔL = deformasi (cm)

P = beban (kg)

A_0 = luas penampang (cm^2)

Tabel 5. Kekuatan tekan bebas (q_u) tanah dengan konsistensinya

Konsistensi	q_u (kg/cm^2)
Keras	> 4.00
sangat kaku	$2.00 - 4.00$
Kaku	$1.00 - 2.00$
Sedang	$0.50 - 1.00$
Lunak	$0.25 - 0.50$
sangat lunak	< 0.25

Sumber : (Hardiyatmo, 2012)

II.9 Pengujian CBR

Pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) ialah salah satu pengujian tanah untuk mengetahui nilai kapasitas dukung tanah dasar (*Subgrade*) khususnya pada konstruksi jalan. Pengujian ini pertama kali dikembangkan oleh *California State Highway Department* sebagai metode untuk mengetahui nilai kekuatan tanah dasar. Kekuatan dan durabilitas konstruksi perkerasan jalan sangat bergantung pada sifat-sifat fisik dan mekanik serta daya dukung tanah dasarnya. Metode pengujian CBR ini kemudian dikembangkan oleh badan badan lain salah satunya ialah *U.S. Army Corps Of Engineers* yang kemudian diberikan nilai CBR yang merupakan perbandingan antara kekuatan tanah dengan kekuatan bahan agregat yang dianggap sebagai standar internasional. Perbandingan tersebut antara lain sebagai berikut:

a. 0,1 inci penetrasi 1000 psi

b. 0,2 inci penetrasi 1500 psi

c. 0,3 inci penetrasi 1900 psi

d. 0,4 inci penetrasi 2300 psi

e. 0,5 inci penetrasi 2600 psi

Nilai CBR dihitung pada harga penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci dengan cara



membagi beban pada penetrasi masing-masing dengan beban sebesar $3 \times 1000 = 3000$ pound dan $3 \times 1500 = 4500$ pound.

II.10 Daya Dukung Tanah

Penurunan akan terjadi pada tanah ketika tanah tersebut mendapat pembebanan di atasnya seperti contoh pondasi. Ketika beban yang diterima oleh tanah semakin besar maka penurunan yang akan terjadi akan semakin besar pula, sehingga penurunan yang terjadi sangat besar. Pada kondisi inilah keruntuhan kapasitas dukung tanah telah terjadi.

Kapasitas dukung tanah atau ultimit (*ultimate bearing capacity*) (q_u) dapat didefinisikan sebagai beban maksimum persatuan luas, dimana tanah masih dapat mendukung beban di atasnya tanpa mengalami keruntuhan.

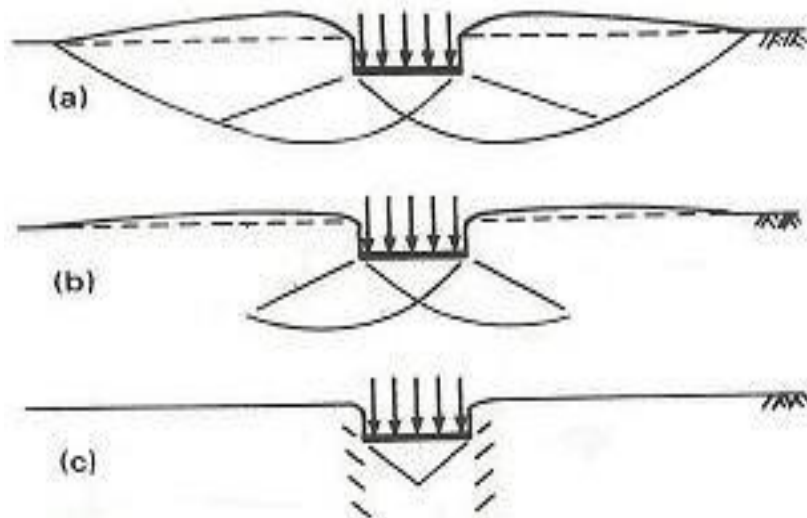
Dimana ;

$$\begin{aligned} q_u &= \text{Kapasitas dukung ultimit (kN/m}^2\text{)} \\ P_u &= \text{Beban Ultimit (kN)} \\ A &= \text{Luas beban (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Analisis keruntuhan kapasitas dukung tanah dilakukan dengan asumsi bahwa tanah berkelakuan sebagai material yang bersifat plastis. Kapasitas dukung tanah dapat menyatakan tahanan tanah terhadap geser untuk melawan penurunan yaitu tahanan geser yang dapat dikerahkan di sepanjang bidang-bidang geser tanah.

Ada tiga macam bentuk keruntuhan yang telah diidentifikasi dalam pembahasan mengenai daya dukung tanah, dari tiga macam keruntuhan tersebut dapat di lihat pada gambar di bawah ini.





Gambar 2 Pola keruntuhan tanah a). keruntuhan geser umum, b). keruntuhan geser lokal, c). keruntuhan geser pons.
sumber (Craig & Susilo, 1989)

II.11 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini. Ada beberapa penelitian yang memiliki tujuan yang mirip namun juga mempunyai beberapa perbedaan seperti metode pelaksanaan, objek penelitian dan variasi persen material. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian ini:

Tabel 6. Penelitian terdahulu yang dipublikasikan terkait dengan topik penelitian.

No	Nama Penulis/ Peneliti dan Tahun	Judul dan sumber	Pokok Persoalan/Hasil Penelitian
1	Chao-Sheng Tang, Li-yang Yin, Ning-jun Jiang, Cheng Zhu, Hao Zeng, Hao Li, Bin Shi (2020)	Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review Environmental Earth Sciences (2020)	Rekomendasi dan faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi tanah menggunakan teknologi stabilisasi tanah berbasis metode MICP (Microbial-Induced carbonate precipitation) <ul style="list-style-type: none"> Spesies dan jenis bakteri yang digunakan adalah Bacillus dan Sporosacina. Hasil kristalisasi karbonat dan aragonit memiliki efek sementasi yang baik dan



No	Nama Penulis/ Peneliti dan Tahun	Judul dan sumber	Pokok Persoalan/Hasil Penelitian
		79:94 DOI: 10.1007/s12665- 020-8840-9	<p>cocok digunakan pada tanah berbutir kasar dan dapat meningkatkan kekuatan tekan tanah</p> <ul style="list-style-type: none"> • Semakin tinggi konsentrasi larutan bakteri yang digunakan maka akan menghasilkan daya sementasi yang lebih besar. • Temperatur optimum yang direkomendasikan adalah 20-40⁰C. Pada temperatur ini, daya sementasi, ketahanan terhadap erosi dan penyerapan air menjadi lebih tinggi. • Faktor pH tidak memiliki pengaruh yang jelas, tetapi dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa pada nilai pH 7-8 diperoleh peningkatan kekuatan tanah paling signifikan sedangkan peningkatan permeabilitas dan penyerapan air secara signifikan diperoleh pada pH>8 • Komposisi dan konsentrasi larutan kalsium asetat yang digunakan sangat efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah. Efisiensi mineralisasi kalsium karbonat dan aktivitas urease diperoleh dengan rasio konsentrasi urea dan kalsium yang digunakan adalah 1.2:1. • Berdasarkan hasil uji sifat morfologi diperoleh ukuran partikel paling efektif berkisar 10-1000 m. Selain itu distribusi ukuran partikel yang merata memberikan efek sementasi yang lebih baik • Teknologi grouting dapat



No	Nama Penulis/ Peneliti dan Tahun	Judul dan sumber	Pokok Persoalan/Hasil Penelitian
			meningkatkan keseragaman ikatan bio-sementasi dalam tanah dengan nilai tekanan yang disarankan 0.1-0.3 bar untuk sampel pasir dan <1.1 untuk sampel tanah liat berlumpur. Tekanan grouting yang berlebihan akan menghancurkan struktur tanah dan mengurangi efek pemadatan.
2	I. R. K. Phang, K. S. Wong, Y. S. Chan and S. Y. Lau (2020)	Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation Towards Tropical Organic Soil Advances in Civil Engineering and Science Technology AIP Conf. Proc. 2020, 020011-1–020011-5; https://doi.org/10.1063/1.5062637	Penerapan teknologi MICP pada tanah organik pada kawasan tropis <ul style="list-style-type: none"> • Bakteri yang digunakan yaitu <i>Lysinibacillus</i> sp yang diperoleh dari Laboratorium riset kimia, Curtin University Malaysia dengan kandungan kelembaban 90-130% dan kandungan organik 60-64%. • Sampel terdiri dari kandungan pasir dan tanah organik dengan 2 jenis perlakuan yaitu tanpa curing dan dengan perlakuan curing selama 3 hari. • Hasil yang diperoleh menunjukkan peningkatan kandungan CaCO₃ pada sampel dapat meningkatkan kekuatan tekan pada sampel yang diberi perlakuan curing.
3	Donovan Mujah, Liang Cheng, and Mohamed A. Shahin, F (2019)	Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Process J. Mater. Civ. Eng.,	Perbedaan kultur bakteri (BC) dan larutan sementasi (CS) untuk mengevaluasi kombinasi BC dan CS yang optimal yang menghasilkan kekuatan tanah tertinggi. Sampel pasir diuji dengan perbedaan kultur bakteri (BC) dan larutan sementasi (CS) untuk



No	Nama Penulis/ Peneliti dan Tahun	Judul dan sumber	Pokok Persoalan/Hasil Penelitian
		2019, 31(4): 04019025 10.1061/(ASCE)M T.1943- 5533.0002660	mengevaluasi kombinasi BC dan CS yang optimal yang menghasilkan kekuatan tanah tertinggi. Ditemukan bahwa untuk kondisi CS yang lebih rendah (0,25 M), BC yang lebih tinggi menghasilkan sampel yang lebih kuat, sedangkan untuk kondisi CS yang lebih tinggi (0,5 M atau 1 M), BC yang lebih rendah lebih dominan dalam meningkatkan kekuatan tanah
4	Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, dan Tri Harianto 2017	Pengaruh penambahan bakteri (<i>Bacillus subtilis</i>) pada tanah lunak terhadap karakteristik kuat tekan Konferensi Nasional Teknik Sipil 11 Universitas Tarumanagara, 26- 27 Oktober 2017	Menentukan karakteristik tanah lunak yang dicampur larutan konsentrasi bakteri <i>Bacillus subtilis</i> dengan melakukan pengujian kuat tekan Unconfined Compression Test (UCT) Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan optimum didapatkan pada penambahan larutan konsentrasi bakteri <i>Bacillus subtilis</i> 6% dengan waktu pemeraman 28 hari. Peningkatan nilai kuat tekan dari 26 kN/m ² menjadi 382,86 kN/m ² atau sebesar 15 kali dari tanah tanpa stabilisasi. Hal ini menunjukkan penggunaan larutan konsentrasi bakteri <i>Bacillus subtilis</i> cukup signifikan meningkatkan nilai kuat tekan.
5	Cheng, L., M. A. Shahin, and D. Mujah. 2017	Influence of Key Environmental Conditions on Microbially Induced Cementation for Soil Stabilization Journal of Geotechnical and Geoenvironmenta l	Bagaimana efek dari beberapa parameter lingkungan utama pada tanah yang dimediasi dengan MICP ureolitik, termasuk dampak konsentrasi urease, suhu, pembilasan air hujan, kontaminasi minyak, dan siklus pembekuanpencairan Hasil penelitian menunjukkan



No	Nama Penulis/ Peneliti dan Tahun	Judul dan sumber	Pokok Persoalan/Hasil Penelitian
		Engineering Volume. 143 (1): 04016083. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001586 .	bahwa pola presipitasi kristal efektif dapat diperoleh pada aktivitas urease rendah dan suhu lingkungan, yang menghasilkan peningkatan tinggi pada nilai (UCS). mikrostruktur dari kristal tersebut menunjukkan kelompok besar yang teraglomerasi mengisi celah antara butiran tanah, menyebabkan untuk pembentukan kristal yang efektif. aktivitas urease rendah dan suhu lingkungan, yang menghasilkan peningkatan tinggi pada kuat tekan tanah
6	Siddhartha Mukherje, R. B. Sahu, Joydeep Muk herjee, 2018	Application of Microbial Induced Carbonate Precipitation for Soil Improvement via Ureolysis Ground Improvement Techniques and Geosynthetics, Lecture Notes in Civil Engineering 1	Mengetahui efektivitas MICP teknik pada tanah berbutir halus seperti lempung atau lempung berpasir dalam memperbaiki gesernya kekuatan Dalam penelitian ini, tiga spesies bakteri aerob alkaliphelic positif urease, yaitu <i>Sporosarcina pasteurii</i> , <i>Bacillus megatarium</i> , dan <i>Morganella morgani</i> digunakan untuk ureolisis dan presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba dapat menghasilkan peningkatan kekuatan tanah yang terukur.

