

SKRIPSI

STABILISASI CAMPURAN TANAH KOHESIF & ORGANIK TERHADAP KUAT TEKAN BEBAS MENGGUNAKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*

Disusun dan diajukan oleh:

**MUH. TAQIYUDDIN DZAKWAN H
D011 19 1023**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STABILISASI CAMPURAN TANAH KOHESIF & ORGANIK TERHADAP KUAT TEKAN BEBAS MENGGUNAKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*

Disusun dan diajukan oleh

MUH. TAQIYUDDIN DZAKWAN H
D011 19 1023

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 20 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D
NIP 196007301986031003

Pembimbing Pendamping,



Ir. Sitti Hijraini Nur, S.T., M.T.
NIP 197711212005012001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muh. Taqiyuddin Dzakwan H

NIM : D011 19 1023

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Stabilisasi Campuran Tanah Kohesif & Organik Terhadap Kuat Tekan Bebas
Menggunakan Bakteri *Bacillus Subtilis*”

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, November 2024



Yang Menyatakan

Muh. Taqiyuddin Dzakwan H

ABSTRAK

MUH. TAQIYUDDIN DZAKWAN H. *Stabilisasi Campuran Tanah Kohesif & Organik Terhadap Kuat Tekan Bebas Menggunakan Bakteri Bacillus Subtilis* (dibimbing oleh Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D dan Ir. Sitti Hijraini Nur, S.T., M.T.)

Indonesia menjadi negara keempat di dunia dengan lahan gambut terluas. Lahan gambut memiliki sifat fisik dan teknis yang tidak menguntungkan bagi bangunan sipil yang dibangun di atasnya, yang dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan tersebut. Selama beberapa tahun terakhir, perbaikan lahan telah menjadi aspek yang sangat penting karena semakin sulitnya menemukan tanah yang sesuai untuk proyek konstruksi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik tanah kohesif dan tanah organik yang diuji serta mengetahui pengaruh larutan bakteri *Bacillus subtilis* dan waktu pemeraman terhadap nilai kuat tekan melalui pengujian UCT di laboratorium.

Pengujian yang dilakukan mencakup pengujian sifat fisik tanah kohesif dan tanah organik, pengujian kompaksi pada campuran tanah kohesif dan tanah organik, serta pengujian UCT pada campuran tanah kohesif dan tanah organik dengan variasi kandungan tanah organik antara 10% hingga 50%. Pengujian dilakukan baik tanpa distabilisasi maupun dengan distabilisasi menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* sebanyak 6%, dengan periode pemeraman selama 0 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Berdasarkan hasil penelitian, tanah kohesif diklasifikasikan sebagai tanah dengan plastisitas tinggi, dengan kategori MH menurut USCS dan A-7-5 menurut AASHTO. Sementara itu, tanah organik termasuk dalam kategori *peaty muck*. Penambahan larutan bakteri *Bacillus subtilis* telah terbukti meningkatkan kekuatan tekan pada campuran tanah kohesif dan tanah organik. Nilai kekuatan tekan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pemeraman.

Kata Kunci: Tanah organik, *Bacillus subtilis*, Kuat tekan

ABSTRACT

MUH. TAQIYUDDIN DZKAWAN H. *Stabilization of Cohesive & Organic Soil Mixtures on Unconfined Compressive Strength Using Bacillus Subtilis Bacteria* (supervised by Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc.,Ph.D and Ir. Sitti Hijraini Nur, S.T., M.T.)

Indonesia ranks fourth in the world in terms of the largest peatland area. Peatland possesses physical and technical characteristics that are unfavorable for civil structures built upon it, which can lead to damage to these structures. Over the past few years, land improvement has become a highly significant aspect due to the increasing difficulty in finding suitable land for construction projects.

This research was conducted to evaluate the characteristics of the tested cohesive and organic soils, as well as to determine the influence of *Bacillus subtilis* bacterial solution and curing time on the unconfined compressive strength values through UCT testing in the laboratory.

The testing conducted includes testing the physical properties of cohesive and organic soils, compaction testing on the mixture of cohesive and organic soils, as well as UCT testing on the mixture of cohesive and organic soils with variations in organic soil content ranging from 10% to 50%. The testing was performed both without stabilization and with stabilization using 6% *Bacillus subtilis* bacteria, with curing periods of 0 days, 7 days, 14 days, and 28 days.

Based on the research results, cohesive soil is classified as high plasticity soil, categorized as MH according to USCS and A-7-5 according to AASHTO. Meanwhile, organic soil falls under the category of peaty muck. The addition of *Bacillus subtilis* bacterial solution has been proven to enhance the compressive strength of the mixture of cohesive and organic soils. The compressive strength values increase with an increasing curing time.

Keywords: Organic soil, *Bacillus subtilis*, Compressive strength

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tanah dan Klasifikasi.....	5
2.2 Sifat Fisik Tanah	9
2.3 Sifat Mekanik Tanah	14
2.4 Klasifikasi Tanah Organik	17
2.5 Metode Perbaikan Tanah	18
2.6 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	19
2.7 Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Lokasi Penelitian.....	25
3.2 Rancangan Penelitian.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Karakteristik Tanah Asli dan Tanah Organik	34
4.2 Pengujian Kompaksi	39
4.3 Pengaruh Bakteri Pada Campuran Tanah Asli dan Organik Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram Plastis	7
Gambar 2. Diagram Konsistensi Atterberg	13
Gambar 3. Kurva Fase Pertumbuhan Bakteri	21
Gambar 4. (a) Tanah Asli, (b) Tanah Organik, (c) Larutan Bakteri	27
Gambar 5. Komposisi campuran larutan media tumbuh bakteri.....	30
Gambar 6. Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 7. Grafik Grasasi Butiran	35
Gambar 8. Grafik Hubungan Antara Indeks Plastisitas dan Batas Cair.....	36
Gambar 9. Grafik Hubungan Antara Berat Isi Tanah Kering dan Komposisi Tanah Organik dengan Pemadatan Standar	40
Gambar 10. Grafik Hubungan Antara Kadar Air Optimum dan Komposisi Tanah Organik dengan Pemadatan Standar	40
Gambar 11. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan 10% Tanah Organik.....	41
Gambar 12. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan 20% Tanah Organik.....	42
Gambar 13. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan 30% Tanah Organik.....	42
Gambar 14. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan 40% Tanah Organik.....	43
Gambar 15. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan 50% Tanah Organik.....	43
Gambar 16. Grafik Nilai Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah Asli dan Tanah Organik dengan Campuran Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	44

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi USCS tanah berbutir kasar.....	6
Tabel 2. Klasifikasi USCS tanah berbutir halus.....	7
Tabel 3. Klasifikasi AASHTO Tanah Berbutir (<i>Granuler Soil</i>)	8
Tabel 4. Klasifikasi AASHTO Tanah Lanau-Lempung	9
Tabel 5. Berat Jenis Pada Berbagai Tanah.....	11
Tabel 6. Susunan Saringan berdasarkan ASTM	11
Tabel 7. Nilai Indeks Plastisitas dan Ragam Tanah.....	14
Tabel 8. Nilai kekuatan tekan bebas (qu) tanah dengan konsentrasinya.....	17
Tabel 9. Jenis Tanah dengan Kadar Organik	18
Tabel 10. Penelitian Terdahulu Terkait Topik Penelitian	23
Tabel 11. Alat Alat Pengujian Sifat Fisis Tanah.....	25
Tabel 12. Alat Alat Pengujian Sifat Mekanis Tanah.....	27
Tabel 13. Standar Pengujian	28
Tabel 14. Rancangan Pengujian sifat fisis	29
Tabel 15. Rancangan Pengujian Mekanis	29
Tabel 16. Berat Jenis	34
Tabel 17. Rekapitulasi hasil pemeriksaan karakteristik tanah	38
Tabel 18. Klasifikasi Tanah Organik	38

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti/Keterangan
A	Luas
r	Jari-jari
t	Waktu
h	Tinggi
ω	Kadar air
W_s	Berat tanah kering
W_ω	Berat air
W_{wet}	Berat tanah basah
G_s	Berat jenis
γ_s	Berat volume tanah kering
γ_ω	Berat volume air
LL	Batas cair
PL	Batas plastis
SL	Batas susut
PI	Indeks plastisitas
q_u	Kuat tekan
σ	Tegangan
ϵ	Regangan
$CaCO_3$	Kalsium karbonat
$CaCl_2$	Kalsium klorida
NH_3	Ammonia
CO_2	Karbon dioksida
$NaHCO_3$	Natrium bikarbonat
NH_4Cl	Amonium klorida
pH	Derajat keasaman
gr	Gram
kg	Kilogram
%	Persen
$^{\circ}C$	Celsius

cm	Centi meter
ml	Mili liter
kN	Kilo Newton
UCT	<i>Unconfined Compression Test</i>
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
ASTM	<i>American Standard Testing and materials</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi	48
Lampiran 2 Data Hasil Pengujian	50

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “STABILISASI CAMPURAN TANAH KOHESIF & ORGANIK TERHADAP KUAT TEKAN BEBAS MENGGUNAKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. 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 ST., M.Eng.,** selaku Ketua Departemen dan **Bapak Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T.,** selaku Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Bapak Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc.,Ph.D.** selaku dosen pembimbing I dan **Ibu Ir. Sitti Hijraini Nur, S.T., M.T.** selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T, IPU** selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. 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 **Hasanuddin Anwar** dan ibunda **Drg. Rilla Rita Thaib** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik sprituial maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Saudara-saudari tercinta **Delviana Devi, S.Ked, Muh. Fadlul Ammar H., Muh. Ra'id Abqary H., Andi Muh. Yusril, S.T** dan **Andi Aisyah Febriani** yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan rekan **Mahasiswa S1, S2, dan S3** di Laboratorium **Mekanika Tanah**, yang senantiasa berbagi wawasan yang sangat bermanfaat, memberikan semangat, dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini yang akan terkenang sepanjang hayat.

4. Saudara-saudari **Portland 2020** selaku keluarga kedua yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, kebersamaan yang tidak akan terlupakan, dukungan yang tiada henti, semangat, dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Teman-teman **Valzartafin** yang selalu ada memberikan semangat selama penyelesaian tugas akhir ini serta telah menjadi saudara tak sedarah bagi penulis.
6. Seluruh teman-teman **Destroyer** yang menjadi teman seperjuangan serta senantiasa memberikan motivasi, semangat, dan bantuan yang tidak ternilai harganya bagi penulis
7. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas semua dukungan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

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

Gowa, September 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki sekitar 20 juta hektar lahan gambut, menjadikannya urutan keempat terluas di dunia setelah Kanada, Rusia, dan Amerika dalam kategori lahan gambut. Penyebaran lahan gambut di Indonesia terfokus di empat pulau utama, yaitu Sumatera (35%), Kalimantan (32%), Sulawesi (3%), dan Papua (30%). Lahan gambut memiliki sifat fisik dan teknis yang tidak menguntungkan bagi bangunan sipil yang dibangun di atasnya, terutama karena sifat fisik seperti tingkat kadar air yang sangat tinggi, berat volume tanah yang rendah, porositas yang besar, dan kandungan organik yang tinggi. Sifat fisik yang tidak menguntungkan ini secara signifikan memengaruhi perilaku teknis lahan gambut, seperti daya dukung yang sangat rendah dan pemampatan yang besar dan tidak merata, yang seringkali menyebabkan kerusakan pada bangunan sipil yang berdiri di atasnya.

Dalam dunia konstruksi, tanah adalah dasar pondasi yang memiliki peran krusial, terutama dalam pembangunan jalan dan struktur. Namun, kenyataannya adalah tidak semua jenis tanah memiliki karakteristik yang cocok untuk digunakan dalam konstruksi jalan atau struktur. Sifat-sifat dan perilaku tanah adalah faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi. Selama beberapa tahun terakhir, perbaikan tanah telah menjadi aspek yang semakin penting dan harus diperhatikan karena semakin sulitnya mencari tanah yang sesuai untuk proyek konstruksi, seiring dengan pertumbuhan populasi manusia yang terus meningkat.

Stabilisasi tanah merupakan suatu proses teknik yang bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat tanah alami, sehingga tanah tersebut menjadi lebih kokoh dan mampu menahan beban, pergerakan, serta erosi. Proses ini umumnya diperlukan dalam beragam proyek konstruksi, seperti pembangunan jalan, jembatan, landasan pacu bandara, dan proyek infrastruktur lainnya. Metode stabilisasi tanah yang digunakan bervariasi, tergantung pada jenis tanah dan tujuan proyek yang bersangkutan. Salah satu Teknik stabilisasi tanah ialah biogrouting.

Biogrouting adalah sebuah teknik yang digunakan dalam geoteknik untuk menguatkan tanah dengan bantuan mikroorganisme, khususnya bakteri. Teknik ini dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti perbaikan tanah lunak, peningkatan stabilitas lereng, atau pengurangan permeabilitas lapisan tanah. Teknik biogrouting memiliki beberapa keuntungan, termasuk aspek ramah lingkungan karena menggunakan mikroorganisme alami serta kemampuannya untuk memperkuat tanah atau batuan bahkan di lokasi yang sulit diakses. Namun, perlu diingat bahwa teknik ini juga memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan, seperti efektivitasnya yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis tanah atau batuan, jenis bakteri yang digunakan, dan kondisi lingkungan.

Berdasarkan penjelasan di atas, maka akan dilakukan penelitian mengenai stabilisasi sifat mekanis tanah dengan Teknik biogrouting menggunakan bakteri. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah kohesif dan tanah organik dengan kandungan organik tinggi. Sedangkan jenis bakteri *Bacillus subtilis*. Pemilihan metode dan jenis bakteri ini didasarkan pada alasan bahwa bakteri ini bersifat ramah lingkungan dan diyakini memiliki potensi untuk meningkatkan karakteristik tanah pondasi bangunan. Dengan mengaplikasikan bakteri ini, diharapkan dapat meningkatkan kekuatan tanah pondasi, mengurangi tingkat kompresibilitas dan permeabilitas tanah, serta mengurangi variasi volume pengembangan tanah. Adapun judul dari penelitian ini adalah “Stabilisasi Campuran tanah Kohesif & organik terhadap kuat tekan bebas menggunakan bakteri *Bacillus subtilis*”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka beberapa rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh bakteri terhadap kuat tekan bebas campuran tanah kohesif dan tanah organik.
2. Bagaimana pengaruh waktu pemeraman bakteri terhadap nilai kuat tekan bebas campuran tanah kohesif dan tanah organik.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan , maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi karakteristik fisis dan mekanis campuran tanah kohesif dan tanah organik
2. Mengetahui pengaruh stabilisasi tanah dengan teknik *bio-grouting* menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan bebas campuran tanah kohesif dan tanah organik

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan mempunyai manfaat diantaranya :

1. Menyajikan informasi tentang karakteristik fisis dan mekanis campuran tanah kohesif dan tanah organik yang terstabilisasi bakteri.
2. Sebagai bahan pertimbangan bagi para engineer bidang Teknik sipil untuk penerapan dilapangan khususnya pondasi pada tanah dengan nilai daya dukung rendah
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan kepada ilmu pengetahuan tentang stabilisasi tanah

1.5 Batasan Masalah

Batasan dalam penelitian ini dibuat untuk menghindari cakupan penelitian yang lebih luas agar penelitian dapat berjalan efektif, serta dapat mencapai sasaran yang diinginkan. Adapun Batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Pengujian eksperimental laboratorium karakteristik mekanis tanah dengan teknologi biosementasi bakteri meliputi sifat fisik dan mekanis campuran tanah kohesif dan tanah organik yang terstabilisasi bakteri.
2. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah asli dan tanah organik dengan persentase 10-50%
3. Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*.
4. Persentase bakteri yang digunakan yaitu 6% dengan Kultur bakteri yaitu selama 4 hari dan pemeraman selama 0, 7, 14, 28 hari.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu: Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran

Berikut merupakan rincian secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini mengandung uraian tentang informasi secara keseluruhan dari penelitian ini yang berkenaan dengan latar belakang penelitian, rumusan masalah, maksud dan tujuan diadakan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian mengenai dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai uraian tentang metode, bahan, peralatan, cara penelitian serta uraian pelaksanaan penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat uraian tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil-hasil analisis terhadap hasil penelitian yang telah dilakukan yang disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah dan Klasifikasi

Tanah merupakan hasil kombinasi antara mineral dan unsur organik dalam bentuk padat, gas, dan cair. Komposisi tanah terdiri dari sejumlah lapisan partikel yang memiliki beragam karakteristik fisik, mineralogi, dan kimia karena berbagai interaksi yang terjadi antara atmosfer dan hidrosfer, serta akibat dari berbagai faktor lainnya. Partikel-partikel tanah terbentuk dari batuan yang mengalami proses perpecahan yang telah berubah karena pengaruh kimia dan lingkungan, termasuk dampak dari cuaca dan erosi. Susunan partikel-partikel tanah ini teratur secara longgar, menciptakan formasi tanah yang memiliki ruang pori-pori.

Untuk melakukan klasifikasi tanah secara komprehensif, diperlukan sejumlah data yang mencakup berbagai aspek seperti warna, kadar air, kekuatan tekan, dan karakteristik lainnya. Terdapat berbagai sistem klasifikasi tanah yang dapat digunakan sebagai panduan dalam proses mendeskripsikan tanah. Sistem-sistem tersebut antara lain :

1. Metode Umum (General Method)
2. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).
3. USCS (Unified Soil Classification System)
4. USDA (United States Department of Agriculture)
5. Sistem Klasifikasi Tanah Nasional (Dudal & Soeprattohardjo, 1957; Soeprattohardjo, 1961)
6. Sistem FAO/UNESCO.

2.1.1 Klasifikasi USCS

Dalam USCS , suatu tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu:

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$). Simbol kelompok diawali dengan G untuk kerikil

(*gravel*) atau tanah berkerikil (*gravelly soil*) atau S untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir (*sandy soil*). Lebih jelasnya dapat dilihat pada Table 1.

- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$). Adapun symbol pada kelompok ini yaitu M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk Lempung (*clay*) anorganik, O untuk lanau-organik dan lempung-organik dan symbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lainnya dengan kadar organik tinggi. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Table 2.

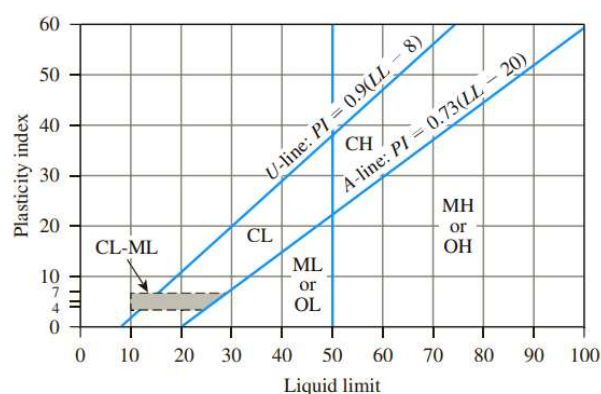
Tabel 1. Klasifikasi USCS tanah berbutir kasar

Klasifikasi Tanah berbutir kasar (<i>coarse-grained soils</i>) yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$)			
Persen tanah lolos saringan no. 4 < 50% (Kerikil)	Persen tanah lolos saringan no 200 < 5%	$Cu \geq 4$ dan $1 \leq Cc \leq 3$	GW
		$Cu < 4$ dan $Cc < 1$ atau $Cc > 3$	GP
	Persen tanah lolos saringan no 200 > 12 %	$PI < 4$ atau Plot PI dan LL, Di bawah garis A (Gambar 1)	GM
		$PI > 7$ dan Plot PI dan LL, Di atas garis A (Gambar 1)	GC
Persen tanah lolos saringan no. 4 > 50% (Pasir)	Persen tanah lolos saringan no 200 < 5%	$Cu \geq 6$ dan $1 \leq Cc \leq 3$	SW
		$Cu < 6$ dan $Cc < 1$ atau $Cc > 3$	SP
	Persen tanah lolos saringan no 200 > 12 %	$PI < 4$ atau Plot PI dan LL, Di bawah garis A (Gambar 1)	SM
		$PI > 7$ dan Plot PI dan LL, Di atas garis A (Gambar 1)	SC

Untuk persentase butiran yang lolos saringan No.200 diantara 5% sampai 12%, maka tanah akan memiliki symbol ganda dan mempunyai sifat plastisitas (GW-GM, SW-SM dan lain-lain)

Tabel 2. Klasifikasi USCS tanah berbutir halus

Klasifikasi Tanah berbutir halus (<i>fine-grained soils</i>) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$)			
Batas cair (LL) < 50% (Plastis rendah)	Plot PI dan LL, Di atas garis A (Gambar 1)	Lempung	CL
	Plot PI dan LL, Di bawah garis A (Gambar 1)	Lanau	ML
	Plot PI dan LL, Berada di daerah OL (Gambar 1)	Organik	OL
Batas cair (LL) > 50% (Plastis tinggi)	Plot PI dan LL, Di atas garis A (Gambar 1)	Lempung	CH
	Plot PI dan LL, Di bawah garis A (Gambar 1)	Lanau	MH
	Plot PI dan LL, Berada di daerah OH (Gambar 1)	Organik	OH
peat (tanah gambut atau tanah organik tinggi)			PT



Gambar 1. Diagram Plastis

2.1.2 Klasifikasi AASHTO

Dalam pengklasifikasian tanah, prosesnya dimulai dengan memproses dari kiri ke kanan pada bagan AASHTO hingga menemukan kelompok pertama yang

memenuhi data pengujian tanah tersebut. Khususnya, untuk tanah yang mengandung bahan butir halus, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi indeks kelompok yang sesuai. Indeks kelompok didefinisikan, sesuai dengan kelompok tanah, yang dapat diklasifikasikan berdasarkan partikel butiran tanah, seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Klasifikasi AASHTO Tanah Berbutir (*Granuler Soil*)

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (<i>Granuler Soil</i>) (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi Ayakan	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisis Ayakan (% lolos)							
No. 10	Maks 50						
N0. 40	Maks 30	Maks 50	Min 51				
N0. 200	Maks 15	Maks 25	Maks 10	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No.40							
Batas Cair (LL)	–	–	Non				
Indeks Plastisitas (PI)	Maks 6	Maks 6	Plastisitas	Maks 40	Maks 41	Maks 40	Min 41
				Maks 10	Maks 10	Min 11	Min 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah kerikil pasir	Pasir Halus	Kerikil dan pasir yang berlanau				
Penilaian sbg bahan tanah dasar	Baik Sekali sampai Baik						

Tabel 4. Klasifikasi AASHTO Tanah Lanau-Lempung

Klasifikasi Umum	Tanah Lanau-Lempung (lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)				
Klasifikasi Kelompok	A4	A5	A6	A7	
				A7-5	A7-6
Analisis Ayakan (% lolos)					
No. 10	—	—	—	—	—
N0. 40	—	—	—	—	—
N0. 200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No.40					
Batas Cair (LL)	Maks 40	Min 41	Maks 40	Min 41	Min 41
Indeks Plastisitas (PI)	Maks 10	Maks 10	Min 11	Min 11	Min 11
Batas Plastisitasnya (PL)	-	-	-	Min 30	Maks 30
Tipe material yang paling dominan	Tanah Berlanau		Tanah Berlempung		
Penilaian sbg bahan tanah dasar	Biasa sampai Jelek				

2.2 Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik atau karakteristik dasar tanah dalam suatu struktur sangat memengaruhi berbagai elemen konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Properti

tanah mencerminkan beragam parameter yang dikenal sebagai indeks fisik tanah atau properti fisik tanah, termasuk tetapi tidak terbatas pada berat jenis, porositas, kadar air, berat volume, angka pori, derajat kejenuhan, derajat kepadatan, derajat kerapatan, analisis butiran, batas cair, batas plastis, batas susut, dan sebagainya. Di sisi lain, parameter seperti koefisien konsolidasi, kohesi, sudut geser dalam, dan lainnya merupakan parameter teknis tanah yang dipengaruhi oleh properti fisik tanah.

2.2.1 Kadar Air dan Derajat Kejenuhan Tanah

Kadar Air (water content) adalah perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat tanah dalam kondisi kering (W_s), yang dinyatakan dalam rumus :

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (1)$$

Hasil uji kadar air berguna untuk menentukan konsistensi perilaku material dan sifat pada tanah kohesif, konsistensi tanah tergantung dari nilai kadar airnya.

2.2.2 Berat Jenis

Berat Jenis yaitu perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air pada temperature 4°C, yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2)$$

Dimana : G_s = Berat Jenis atau Berat Spesifik (Specific Gravity)

γ_s = Berat Volume Tanah Butiran Padat

γ_w = Berat Volume Air

Nilai parameter G_s tidak memiliki satuan. Interval nilai G_s untuk berbagai jenis tanah, berkisar antara 2,58 sampai 2,75. Kecuali untuk jenis tanah humus dan gambut biasanya interval G_s antara 1,25 sampai 1,80 (Darwis, 2018). Nilai berat jenis untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 5. Berat Jenis (G_s) berbagai jenis tanah

Tabel 5. Berat Jenis Pada Berbagai Tanah

Jenis Tanah	Berat Jenis (Gs)
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

2.2.3 Analisis Saringan

Analisis saringan digunakan untuk mengidentifikasi distribusi ukuran partikel kasar (granular) dalam tanah kering dengan cara melakukan proses penyaringan bertingkat pada alat saringan standar yang telah ditetapkan. Susunan saringan berdasarkan standar ASTM (American Standard of Testing Material), dapat dilihat pada Tabel 6 :

Tabel 6. Susunan Saringan berdasarkan ASTM

No. saringan	Diameter Lubang (mm)		No. saringan	Diameter Lubang (mm)
3	6,35		40	0,42
4	4,75		50	0,30
6	3,35		60	0,25
8	2,36		70	0,21
10	2,00		100	0,15
16	1,18		140	0,106
20	0,85		200	0,075
30	0,60			

2.2.4 Analisis Hidrometer

Analisis hidrometer adalah prosedur yang digunakan untuk mengidentifikasi distribusi ukuran butiran dalam tanah yang memiliki butiran halus, atau dalam bagian berbutir halus dari campuran tanah biasa. Sampel tanah yang akan diuji

dengan analisis hidrometer harus mengandung partikel tanah yang dapat melewati saringan No. 200, dan sebelumnya harus dibersihkan dari material organik. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa zat organik yang bukan merupakan bagian dari konsistensi tanah tidak akan memengaruhi hasil analisis hidrometer tersebut. Metode uji hidrometer didasarkan pada hukum Stokes yang mengatur kecepatan pengendapan butiran dalam suspensi larutan.

Beberapa rumus yang digunakan dalam perhitungan analisa hidrometer adalah:

$$R_{cp} = R + \text{temperature correction} + \text{zero correction} \quad (3)$$

Menghitung persentase butiran halus

$$\% \text{ butiran halus} = \frac{a \cdot R_{cp}}{W_s} \times 100\% \quad (4)$$

$$a = \frac{G_s \times 1,65}{(G_s - 1) \times 2,65} \quad (5)$$

Mencari garis tengah butir-butir tanah:

$$D = K\sqrt{l/t} \quad (6)$$

Dimana:

R_{cp} adalah hasil pembacaan alat ukur hydrometer terkoreksi

R adalah hasil pembacaan alat ukur hydrometer

W_s = berat kering contoh tanah

a = koreksi untuk berat jenis dari butiran tanah

K = Rasio kekentalan air yang ditentukan dengan menggunakan grafik

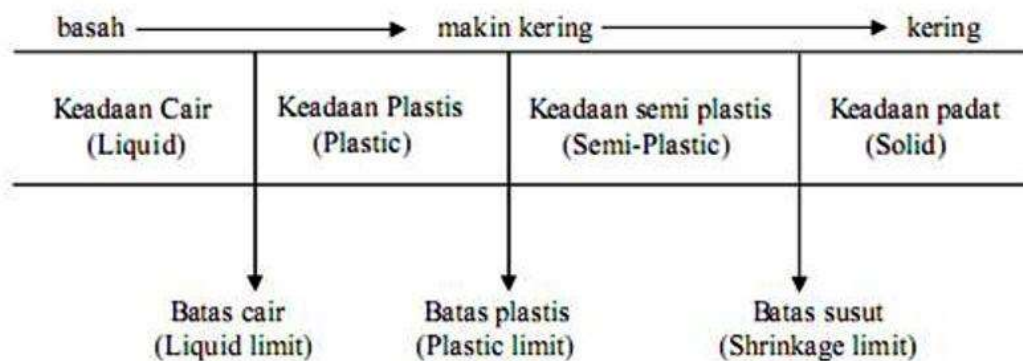
L = Panjang efektif yang ditentukan dengan menggunakan grafik yang diberikan pada gambar sesuai dengan harga R yang bersangkutan.

t = Waktu pembacaan

2.2.5 Batas batas Atterberg

Plastisitas tanah mencerminkan kemampuan tanah untuk mengalami perubahan bentuk pada volume yang tetap tanpa mengalami keretakan atau penghancuran. Diagram konsistensi Atterberg (Gambar 2) sangat dipengaruhi oleh kadar air dan menunjukkan berbagai tingkat kekentalan tanah, termasuk keadaan cair, plastis, semi-padat, dan padat, yang bergantung pada jumlah air dalam tanah. Konsistensi ini dikendalikan oleh gaya tarik antar partikel lempung dalam tanah.

Penentuan nilai batas-batas Atterberg yang sesuai sangat penting dalam proses klasifikasi dan identifikasi jenis tanah.



Gambar 2. Diagram Konsistensi Atterberg

a. Batas Cair

Batas Cair adalah nilai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dengan keadaan plastis tanah, atau nilai batas atas pada daerah plastis.

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (7)$$

Yang mana $\tan \beta = 0,121$ namun beberapa tanah tertentu nilainya tidak sama dengan 0,121.

b. Batas plastis

Batas plastis didefinisikan sebagai nilai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dengan daerah semi padat.

Penentuan nilai batas plastis ini melibatkan sebuah percobaan di mana tanah digulung hingga mencapai diameter 3,2 mm dan mulai menunjukkan retakan. Kadar air tanah pada saat kondisi ini digunakan sebagai nilai "batas plastis" dari tanah tersebut.

c. Batas susut

kedudukan antara zone semi padat dengan zone padat. Pada kondisi ini pengurangan kadar air dalam tanah tidak akan mempengaruhi lagi pengurangan volume pada tanah.

$$SL = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} - \frac{(v_1 - v_2)\gamma_w}{m_2} \right] \times 100\% \quad (8)$$

Yang mana : m_1 = berat tanah basah dalam cawan percobaan (gram)

m_2 = berat tanah kering oven (gram)

v_1 = volume tanah basah dalam cawan percobaan (cm^3)

v_2 = volume tanah kering oven (cm^3)

γ_w = berat volume air (gram/cm^3)

d. Indeks Plastisitas (PI)

Indeks Plastisitas adalah selisih antara batas cair dengan batas plastis pada tanah.

$$PI = LL - PL \quad (9)$$

Indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah, jika nilai PI tinggi maka tanah mengandung banyak lempung, dan jika nilai PI rendah maka tanah mengandung banyak lanau seperti pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai Indeks Plastisitas dan Ragam Tanah

PI	Sifat	Ragam tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
<7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber : dalam buku (Darwis, 2018)

2.3 Sifat Mekanik Tanah

2.3.1 Kompaksi

Pemadatan tanah memiliki tujuan utama dalam perbaikan karakteristik tanah yang ada, terutama dalam konteks pekerjaan seperti urugan atau reklamasi, seperti pembangunan tanggul, subgrade jalan, landasan pacu, bendungan tanah yang diperkuat, dinding tanah, dan proyek-proyek serupa. Selain itu, pemadatan juga sering digunakan untuk menyiapkan area penyimpanan material (stock field) selama pelaksanaan konstruksi. Pada dasarnya, pemadatan tanah adalah langkah yang penting untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan geser tanah, serta memperbaiki karakteristik fisik tanah yang bersangkutan. Secara terinci tujuan dari pemadatan tanah antara lain adalah

1. Meningkatkan daya dukung tanah
2. Meningkatkan kekuatan geser tanah
3. Mengurangi permeabilitas tanah

4. Mengurangi kompresibilitas tanah
5. Mengurangi volume change (perubahan volume) pada tanah sebagai akibat dari perubahan kadar air tanah

Standar pengujian kepadatan tanah yang pertama kali digunakan adalah pengujian standar Proctor (1933). Yang mana hasilnya akan menggambarkan bahwa terdapat satu nilai “kadar air optimum” untuk mencapai “berat volume kering maksimum”

Ada beberapa rumus yang digunakan dalam pengujian ini, diantaranya:

- Menghitung kadar air

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (10)$$

- Menghitung berat volume basah

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V_{mould}} \quad (11)$$

- Menghitung berat kering

$$W_{dry} = \frac{W_{wet}}{1 + (w \times 100)} \quad (12)$$

- Menghitung berat volume kering

$$\gamma_{dry} = \frac{W_{dry}}{V_{mould}} \quad (13)$$

Kepadatan tanah dapat diukur dengan menggunakan nilai berat volume kering yang dapat dicapai, yang disimbolkan sebagai γ_d . Selama proses pemadatan, terjadi sebuah fenomena di mana berat volume kering akan meningkat seiring dengan peningkatan kadar air. Pada kadar air nol ($w=0$), berat volume tanah basah (γ_b) akan sama dengan berat volume tanah kering (γ_d). Namun, jika kadar air secara bertahap ditambahkan dan proses pemadatan tetap dilakukan dengan usaha pemadatan yang konstan, maka berat butiran tanah per satuan volume juga akan meningkat seiringnya.

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

Pada pengujian ini sampel benda uji yang berbentuk silinder akan diberi beban, sehingga mendapatkan nilai kekuatan maksimum tanah tersebut dalam keadaan kuat tekan bebas sampai mencapai keruntuhan dan juga mengukur regangan tanah tersebut akibat tekanan yang diberikan. Setiap material apabila dikenai beban, maka akan mengalami perubahan deformasi atau bentuk. Gaya atau tekanan persatuan luas disebut sebagai stress atau penekanan. Selain stress, perubahan bentuk dalam hal ini dibuktikan dengan perubahan dalam satuan Panjang atau ΔL yang dibandingkan dengan Panjang semula, disebut strain atau regangan ε . Pengujian ini menggunakan mesin tekan untuk menekan benda uji yang dibentuk silinder dari satu arah (uniaksial). Perbandingan antara tinggi dan diameter benda uji mempengaruhi nilai kuat tekan bebas benda uji. (Gogot S. B., 2011)

Berdasarkan standar pengujian ASTM D 2166 mengenai Unconfined Compression strength.

1. Luas penampang benda uji

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (14)$$

2. Kuat tekan bebas

$$qu = \frac{P}{A} \quad (15)$$

3. Regangan

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{h} \times 100\% \quad (16)$$

Tabel 8. Nilai kekuatan tekan bebas (q_u) tanah dengan konsentrasinya

<i>Consistency</i>	<i>q_u (kg/cm²)</i>
<i>Hard</i>	> 4.00
<i>Very Stiff</i>	2.00 – 4.00
<i>Stiff</i>	1.00 – 2.00
<i>Modarate Stiffness</i>	0.50 – 1.00
<i>Soft Soil</i>	0.25 – 0.50
<i>Very Soft soil</i>	< 0.25

Sumber : (Hardiyatmo, 2012)

2.4 Klasifikasi Tanah Organik

Tanah organik adalah jenis tanah permukaan yang mengandung bahan-bahan organik, seperti sisa-sisa lapukan tumbuhan atau hewan. Tanah ini memiliki warna yang gelap, teksturnya lembut, dan cenderung berubah bentuk dengan mudah saat ditekan. Salah satu karakteristik penting dari tanah organik adalah memiliki kekuatan geser yang rendah dan kemampuan untuk mengalami kompresi dengan mudah. Dalam hal struktur, tanah organik cenderung rapuh saat dalam keadaan kering. Bahan organik dalam tanah organik memiliki tingkat kohesi dan plastisitas yang rendah.

Tanah organik (O) merupakan klasifikasi tanah yang didasarkan pada kandungan materi organiknya, di mana tanah ini didefinisikan sebagai tanah yang memiliki kandungan materi organik antara 25% hingga 75%. Selanjutnya, tanah organik ini dibagi lagi menjadi dua kelompok, yaitu OL dan OH, berdasarkan tingkat plastisitasnya. Sistem USCS (United Soil Classification System) mengategorikan tanah menjadi tiga kelompok utama, yakni tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah dengan kandungan organik yang tinggi. tanah berbutir halus dibagi lagi menjadi tiga kelompok berdasarkan kandungan organiknya, sebagaimana terlihat dalam Tabel 9.

Tabel 9. Jenis Tanah dengan Kadar Organik

Material escription	Organik Content (%)		Subheading
Peat	> 75	95-100	Low ash peat
		85-95	Medium ash peat
		75-85	High ash peat
Muck	25 - 75	50-75	Peaty Muck
		25-50	Silty or Clayey Muck
Organik Silt or Clay	< 25	10-25	Highly organik Silt or Clay
		1-10	High organik Silt or Clay

(Sumber: ElMouchi et al., 2021)

2.5 Metode Perbaikan Tanah

Stabilisasi tanah adalah tindakan mencampur tanah dengan bahan tambahan tertentu dengan tujuan untuk meningkatkan karakteristik teknis tanah agar memenuhi standar teknis yang ditentukan. Proses stabilisasi tanah melibatkan pencampuran dengan material tambahan guna mencapai gradasi yang diinginkan, sehingga sifat-sifat teknis tanah dapat ditingkatkan secara signifikan.

Ada 4 cara teknik perbaikan tanah yang umum dipakai, yaitu :

1. Modifikasi secara mekanis (Mechanic Modification)

Metode ini adalah cara yang paling umum digunakan di lapangan dan umumnya mengacu pada proses pemadatan tanah melalui penggunaan gaya eksternal. Peningkatan kepadatan tanah terjadi karena penerapan gaya mekanis dari luar dalam jangka waktu pendek (short term). Proses ini mencakup pemadatan lapisan permukaan melalui metode statis, penggetaran, atau menggunakan roller dan plate vibrators; serta pemadatan dalam melalui heavy tamping di permukaan atau penggetaran hingga kedalaman tertentu.

2. Modifikasi Secara Hidrolis (Hydraulic Modification)

Teknik modifikasi ini umumnya digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi tanah, contohnya dengan menambahkan vertical drain. Dalam proses ini, kadar air pori yang ada dalam tanah dikeluarkan dari tanah melalui saluran atau sumur drain yang telah dibuat. Pada tanah berbutir kasar, hal ini dapat dicapai dengan menurunkan muka air tanah melalui pemompaan dari lubang hasil pengeboran atau parit. Sementara pada tanah berbutir halus, proses ini dapat dicapai

melalui aplikasi gaya luar (preloading) dalam jangka waktu lama (long term) atau melalui penggunaan gaya listrik (electrokinetic stabilization).

3. Modifikasi Secara Fisik dan Kimia (Physical and Chemical Modification)

Modifikasi tanah secara fisik dan kimia merupakan suatu proses stabilisasi tanah yang melibatkan penggunaan bahan tambahan atau aditif yang dapat dicampurkan langsung dengan lapisan permukaan tanah. Aditif-aditif ini mencakup tanah alami dengan kualitas yang lebih baik daripada tanah asli, material butiran (granular material), sisa-sisa produksi, semen, kapur, bitumen, kalsium klorida, dan berbagai bahan kimia lainnya. Ketika aditif ini dimasukkan melalui lubang bor dan diberikan tekanan ke dalam rongga atau pori (void) dalam tanah atau antara tanah dan struktur, proses ini dikenal sebagai grouting.

4. Modifikasi dengan Penambahan Rangka/Tulangan (Modification by Inclusions and Confinement)

Perkuatan tanah dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis material seperti serat, strip, batangan, jalinan, dan lembaran seperti geotekstil. Ini memberikan tambahan ketahanan terhadap kekuatan tarik dalam konstruksi tanah. Penulangan di lokasi (in situ reinforcement) dapat dilakukan dengan cara memasukkan paku dan angker ke dalam tanah. Selain itu, untuk menciptakan struktur penahan tanah yang stabil, juga dapat dilakukan dengan menambahkan material seperti beton, baja, atau menggunakan karung-karung pasir.

Pada suatu waktu tertentu, tanah dapat mengalami proses pemadatan baik secara fisik maupun kimiawi. Salah satu perkembangan terbaru di bidang geoteknik adalah biosementasi, yang melibatkan penerapan aktivitas mikrobiologi untuk meningkatkan sifat rekayasa tanah. Salah satu teknik yang paling umum digunakan dalam biosementasi tanah adalah presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba, dikenal sebagai Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP). Teknik ini memanfaatkan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit (CaCO_3) yang mengikat partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah tersebut.

2.6 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Klasifikasi *Bacillus subtilis*

Kingdom : Procaryorae

Divisi : Firmicutes

Kelas : Schizomycetes

Bangsa (Ordo) : Eubacteriales

Suku (Familia) : Bacillaceae

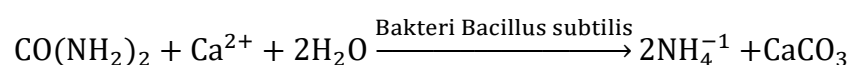
Marga (Genus) : Bacillus

Jenis (Specsies) : Baciilus Subtilis

Bacillus subtilis merupakan bakteri berbentuk batang berukuran 0,5- 2,5 x 1,2-10 mikron, tersusun dalam sepasang atau bentuk rantai, dimana silika meliputi seluruh permukaan sel. Dalam kondisi kritis mampu membentuk spora. Bakteri antagonis *B. subtilis* dapat bertahan pada kondisi lingkungan tertentu, yaitu pada suhu -5°C sampai 75°C, dengan tingkat keasaman (pH) antara 2-8. Pada kondisi yang sesuai dan mendukung, populasinya akan menjadi dua kali banyaknya selama waktu tertentu. Waktu ini dikenal dengan waktu generasi atau waktu penggandaan, yang untuk *B. subtilis* adalah 28,5 menit pada suhu 40°C (Soesanto,2008).

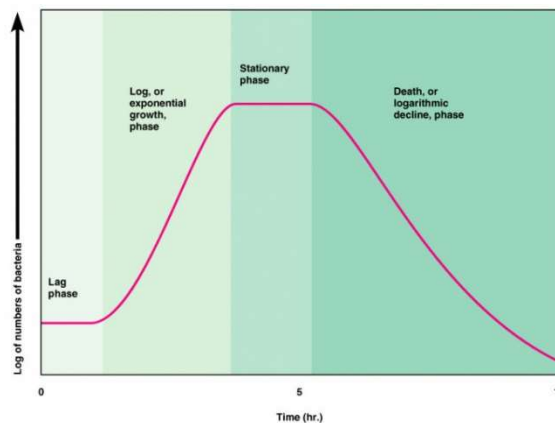
Menurut Holt, et al (2001), *Bacillus* termasuk kedalam kelompok bakteri batang dan kokus pembentuk endospora dengan ciri ciri memiliki bentuk sel batang, motil karena memiliki satu flagel, gram positif, bersifat aerobik, membentuk endospora, memiliki habitat pada tanah, air, lingkungan akuatik, pencernaan hewan (termasuk manusia), beberapa spesies bersifat patogenesis terhadap manusia dan binatang lain. Dalam *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology 9th edition* genus *Bacillus* memiliki karakteristik yang berbeda jika dibandingkan dengan bakteri pembentuk endospora dari genera dengan jenis yang sama.

Bakteri urease akan mengkatalisis urea sehingga melepas ion karbonat, yang selanjutnya akan terikat dengan ion kalsium dari CaCl₂ dan mempresipitasikan kalsium karbonat/calcite (CaCO₃). Kalsit inilah yang mengikat partikel tanah satu sama lain. Sehingga presipitasi kalsium karbonat merupakan proses yang utama dalam teknik biogroutiug. Teknik tersebut bekerja pada tingkat pori-pori yaitu memperbaiki kondisi tanah dengan meningkatkan kekuatan dan kekakuan (stiffness) (Indriani, 2021).



Beberapa penelitian (Gusmawati, N.F dkk. 2009) menyebutkan bahwa presipitasi kalsium karbonat oleh bakteri diakibatkan oleh adanya aktivasi sel bakteri, ion Ca^{2+} dari senyawa CaCl_2 yang ditarik oleh bakteri dari lingkungan dan terdepositkan pada permukaan sel, dan enzim urease yang mengambil urea ke dalam bakteri yang mendekomposisinya dengan ammonia NH_3) dan karbon dioksida (CO_2). Suatu investigasi terhadap kinetika telah mengindikasikan bahwa presipitasi kalsit merupakan fungsi dari konsentrasi sel, kekuatan ionik dan pH media (Mukherjee et al., 2019). Mikroorganisme menarik kation termasuk ion Ca^{2+} dari lingkungan dan terdepositkan pada permukaan sel.

Uji pertumbuhan dilakukan untuk mengetahui pertumbuhan suatu bakteri yang dilihat pada tingkat kekeruhan pada media cair dengan menggunakan incubator dan penggoyang. Kultur mikrobiologi cara memperbanyak mikroba bakteri pada media tertentu yang dilakukan di laboratorium, penelitian yang dilakukan oleh Natsir Djide menemukan bahwa kurva pertumbuhan bakteri terdiri dari beberapa fase yaitu lag, eksponensial, stasioner, dan kematian (Natsir djide 2012). seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva Fase Pertumbuhan Bakteri

- Fase Lag

Dikenal juga sebagai tahap awal (lag phase) atau fase laten. Pada fase ini, bakteri belum melakukan pembelahan sel, bahkan beberapa sel bakteri bisa mati, sehingga hanya sel yang kuat yang bertahan hidup. Ukuran sel membesar karena air imbibisi masuk ke dalam sel. Secara teoritis, keadaan laten atau lag ini

disebabkan oleh bakteri berada dalam lingkungan yang baru, sehingga sel harus beradaptasi dengan lingkungan baru tersebut.

- Fase eksponensial

Fase eksponensial ditandai dengan periode pertumbuhan yang sangat cepat. Setiap sel dalam populasi membelah menjadi dua. Derajat pertumbuhan bakteri pada fase ini sangat dipengaruhi oleh sifat genetik yang diwariskan. Selain itu, derajat pertumbuhan juga dipengaruhi oleh kadar nutrisi dalam media, suhu inkubasi, kondisi pH, dan tingkat aerasi. Ketika populasi mencapai derajat pertumbuhan maksimum, akan terjadi keseimbangan antara jumlah sel yang mati dan jumlah sel yang tetap hidup.

- Fase stasioner

Fase ini terjadi ketika laju pertumbuhan bakteri sama dengan laju kematiannya, sehingga jumlah populasi tetap konstan. Keseimbangan ini disebabkan oleh pembatasan pembelahan sel akibat kurangnya nutrisi dan akumulasi produk beracun yang menghambat proses pembelahan. Fase stasioner ini kemudian diikuti oleh fase kematian, yang ditandai oleh peningkatan laju kematian yang melebihi laju pertumbuhan.

- Fase Kematian.

Pada fase ini jumlah sel yang hidup akan terus menurun dan jumlah kematian yang semakin meningkat yang disebabkan oleh kondisi lingkungan yang semakin memburuk (M. Natsir Djide dan Sartini, 2012)

2.7 Penelitian Terdahulu

Sebelumnya, terdapat beberapa penelitian yang terkait dengan topik ini. Beberapa di antaranya memiliki tujuan serupa, meskipun terdapat perbedaan dalam metode pelaksanaan, objek penelitian, dan variasi persentase material.

Tabel 10. Penelitian Terdahulu Terkait Topik Penelitian

Nama Penulis	Judul penelitian	Hasil penelitian
Ignatius Ega Renaldi ¹ dan Aniek Prihatiningsih (2020)	EFEKTIVITAS PENAMBAHAN CAIRAN ADITIF DALAM PENINGKATAN DAYA DUKUNG TANAH ORGANIK	Berdasarkan penelitian campuran oil menjadi bahan aditif paling efektif dalam meningkatkan nilai uct pada tanah pasir organik yang memiliki kandungan kerrang. Sedangkan pada salah satu tanah lempung kecoklatan, campuran minyak goreng menjadi bahan aditif yang efektif dalam meningkatkan nilai kuat takan bebas
Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, dan Tri Harianto (2017)	Pengaruh penambahan bakteri (<i>Bacillus subtilis</i>) pada tanah lunak terhadap karakteristik kuat tekan	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 dicapai dengan penambahan larutan

		konsentrasi bakteri <i>Bacillus subtilis</i> sebanyak 6% selama 28 hari. Nilai kuat tekan meningkat dari 26 kN/m² menjadi 382,86 kN/m², meningkat sebanyak 15 kali dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan larutan konsentrasi bakteri <i>Bacillus subtilis</i> secara signifikan meningkatkan kuat tekan.
Ruzia Harmi Putra (2021)	Perbaikan kuat tekan bebas tanah gambut menggunakan campuran pasir dan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> dengan Teknik bio-grouting	Dari hasil penelitian menunjukkan nilai tertinggi kuat tekan bebas tanah gambut yang terstabilisasi menggunakan campuran pasir dan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> terjadi pada penambahan bakteri 15% senilai 0,42 kg/cm²