

TESIS

**PERILAKU MEKANIS TANAH ORGANIK TINGGI
YANG DISTABILISASI DENGAN BAKTERI**

Mechanical Properties of High Organic Soil Stabilized by Bacteria

**NURUL IZMI FUADAH
D012201020**



**PROGRAM MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**PERILAKU MEKANIS TANAH ORGANIK TINGGI
YANG DISTABILISASI DENGAN BAKTERI**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Magister Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ttd.

**NURUL IZMI FUADAH
D012201020**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS**PERILAKU MEKANIS TANAH ORGANIK TINGGI
YANG DISTABILISASI DENGAN BAKTERI****NURUL IZMI FUADAH****D012201020**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

pada tanggal 21 Juni 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Abd Rachman Djamaluddin, M.T
NIP. 195910101987031003

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM
NIP. 197309262000121002

Pembimbing Pendamping



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

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. M. Asad Abdurrahman, ST, MEng, PM
NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Nurul Izmi Fuadah
Nomor mahasiswa : D012201020
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul **“Perilaku Mekanis Tanah Organik Tinggi yang Distabilisasi dengan Bakteri”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T. sebagai Pembimbing Utama dan Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc.,Ph.D sebagai Pembimbing Pendamping. 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 dipublikasikan di Jurnal (Design Engineering, Volume 2023, Issue 01, Halaman 358-370) sebagai artikel dengan judul **“Study of the Unconfined Compressive Strength Characteristics of Organic Soil Stabilized with Bacillus Subtilis Bacteria”**.

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

Gowa, 12 Juli 2023

Yang menyatakan



Nurul Izmi Fuadah

KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sampai saat ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan usulan penelitian tesis yang berjudul “**Perilaku Mekanis Tanah Organik Tinggi yang Distabilisasi dengan Bakteri**”. Tesis ini merupakan syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada semua pihak yang telah banyak membantu dan mendukung demi rampungnya tugas akhir ini, terutama kepada:

1. Suamiku **Ahmad Shidiq Baihaqi**, ananda Syakila Faizzura Baihaqi dan orang tuaku tercinta (Hamzah Yusuf & Saidah Suyuti), serta mertuaku (Abdul Haris & Erlin Sofiyana) yang senantiasa memberikan motivasi serta dukungan penuh dengan sabar dan ikhlas.
2. Bapak Dr. M. Asad Abdurrahman, ST. MEng.PM, selaku ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu penulis selama mengikuti perkuliahan.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T. dan sebagai Pembimbing Utama yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan dalam menyelesaikan penelitian ini.
4. Bapak Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc.,Ph.D. Pembimbing Pendamping yang telah banyak memberikan dorongan semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian tesis ini.
5. Seluruh staf dan pengajar Pascasarjana Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, yang telah mendidik dan memberikan berbagai bekal pengetahuan yang tak ternilai harganya kepada penulis selama mengikuti perkuliahan.
6. Semua teman-teman seperjuangan Pascasarjana Program studi Teknik Sipil angkatan 2020 khususnya mahasiswa S2 Geoteknik serta para laboran dan asisten di Laboratorium Geoteknik Departemen Teknik Sipil, terima kasih atas

bantuan dan dukungannya.

7. Seluruh keluargaku tercinta, terima kasih banyak atas segala dukungan dan kesabarannya.
8. Serta semua orang yang telah mendukung dalam penyusunan ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan 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,

Nurul Izmi Fuadah

ABSTRAK

NURUL IZMI FUADAH. Perilaku Mekanis Tanah Organik Tinggi Yang Distabilisasi dengan Bakteri (dibimbing oleh **Abdul Rachman Djamaluddin, Achmad Bakri Muhiddin**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan bakteri terhadap karakteristik mekanis tanah yang mengandung kadar organik yang tinggi dengan metode biosementasi. Teknik ini menggunakan proses metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit (CaCO_3) yang mengikat partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan tanah. Secara umum, penelitian ini terdiri dari 3 (tiga) tahapan yaitu tahap pertama adalah pembuatan biang bakteri dan pembuatan sampel. Sampel yang diuji terdiri dari kombinasi material tanah asli, tanah organik dan larutan bakteri dengan beberapa variasi perlakuan yaitu variasi waktu pemeraman 0,7,14 dan 28 hari, persentase waktu kultur bakteri 2,4,6 hari dan larutan bakteri 4%,6%,8% serta variasi penambahan kadar material tanah organik 10 hingga 60% terhadap total berat tanah kering. Tahap kedua adalah pengujian sifat fisik tanah asli dan tanah organik. Tahap ketiga adalah pengujian karakteristik sifat mekanik yang terdiri dari uji pemadatan, uji kuat tekan bebas, uji parameter kuat geser. Hasil uji karakteristik fisik tanah diperoleh bahwa tanah asli yang digunakan, diidentifikasi adalah tanah lanau anorganik dengan plastisitas tinggi sedangkan tanah organik yang digunakan mengandung kadar organik sebesar 58.15% dan tergolong material dengan kadar organik tinggi. Berdasarkan hasil uji karakteristik mekanik tanah diperoleh peningkatan kekuatan tekan sebesar 649.95% dan nilai kuat geser sebesar 37.35% pada saat ditambahkan dengan larutan bakteri *Bacillus subtilis*. Nilai optimum ini diperoleh pada kondisi sampel kombinasi antara material tanah asli dan larutan bakteri 6% kultur 4 hari yang diperam selama 28 hari. Hasil ini membuktikan bahwa penambahan bakteri *Bacillus subtilis* sebagai bahan stabilisasi sangat efektif dalam meningkatkan sifat fisik dan mekanis tanah organik.

Kata kunci : *Bacillus subtilis*, Biosementasi, Tanah organik

ABSTRACT

NURUL IZMI FUADAH. Mechanical Properties of High Organic Soil Stabilized by Bacteria (supervised by **Abdul Rachman Djamaluddin, Achmad Bakri Mubiddin**)

This research aims to evaluate the effect of adding bacteria on the mechanical properties of soil with high organic content using biocementation. This technique uses bacterial metabolism to form calcite (CaCO_3) that binds soil particles, thereby increasing soil strength. This study consists of three stages, the first stage involves preparing the bacterial culture and soil samples. The samples tested consist of a combination of silt soil, organic soil, and bacterial solution with several variations of treatment, including curing time of 3,7,14, and 28 days, bacterial culture time of 2,4,6 days, bacterial solution concentration of 4%, 6%, 8%, and organic soil material addition of 10 to 60% of the total weight of dry soil. The second stage involves testing the physical properties of silt and organic soil based on ASTM standards and organic content for the organic soil material. The third stage involves testing the mechanical properties, including the compaction test, unconfined compression strength test, and shear strength parameter test. Based on the physical characteristic test results, the native soil used was identified as inorganic clay with high plasticity, while the organic soil used had an organic content of 58.15% and was classified as high organic material. The mechanical characteristic test results found that adding *Bacillus subtilis* bacterial solution resulted in a 649.95% increase in compressive strength and a 37.35% increase in cohesion. The optimum value was obtained under the condition of a sample combination between native soil material and a 6% bacterial solution with a 4-day culture period, soaked for 28 days. These results prove that the addition of *Bacillus subtilis* bacteria as a stabilization material is highly effective in enhancing the physical and mechanical properties of organic soil.

Keywords : *Bacillus subtilis*, Biocementation, Organic Soil

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian.....	3
I.4 Manfaat Penelitian.....	4
I.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Definisi dan Klasifikasi Tanah	5
II.1.1 Sistem Klasifikasi AASHTO	6
II.1.2 Sistem Klasifikasi Unified (USCS).....	8
II.2 Sifat Fisik Tanah.....	9
II.3 Sifat Mekanis Tanah.....	14
II.3.1 Pemadatan Tanah	14
II.3.2 Kuat Geser Tanah (<i>Direct Shear</i>)	16
II.3.3 Kuat Tekan Bebas (<i>Unconfined Compression Test</i>).....	18
II.4 Karakteristik Tanah Lanau	20
II.5 Karakteristik Tanah Organik	21

II.6	Parameter Uji Sifat Fisik dan Mekanis.....	22
II.7	Stabilisasi Tanah Menggunakan Teknik Biosementasi.....	23
II.8	Pengaruh Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> pada Tanah.....	26
II.9	Penelitian Terdahulu.....	29
BAB III.....		33
METODOLOGI PENELITIAN		33
III.1	Lokasi dan Wilayah Penelitian.....	33
III.2	Rancangan Uji Experimental.....	33
III.2.1	Penyiapan Alat dan Material.....	33
III.2.2	Tahapan pengujian	35
III.2.3	Pembuatan Benda Uji.....	38
III.2.4	Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> serta penumbuhannya	40
III.3	Kerangka Konsep/Alur Penelitian.....	41
BAB IV		43
HASIL DAN PEMBAHASAN		43
IV.1	Karakteristik Sifat Fisik Tanah.....	43
IV.1.1	Karakteristik Tanah Asli	43
IV.1.2	Karakteristik Tanah Organik.....	46
IV.2	Karakteristik Sifat Mekanis Tanah.....	47
IV.2.1	Karakteristik Mekanis Material Tanah Asli.....	47
IV.2.2	Karakteristik Mekanis Tanah Asli dengan Stabilisasi Bakteri.....	50
IV.2.3	Karakteristik Mekanis Material Tanah Asli dan Tanah Organik dengan Stabilisasi Bakteri	61
IV.3	Karakteristik Sifat Mekanis Tanah Organik Stabilisasi Bakteri Curing Udara dan Curing Rendaman	69
BAB V.....		71
KESIMPULAN DAN SARAN		71
V.1	Kesimpulan.....	71
V.2	Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA		73
DAFTAR LAMPIRAN		75

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Batasan-batasan ukuran golongan tanah	6
Tabel 2. Berat jenis (Gs) berbagai jenis tanah	10
Tabel 3. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah	11
Tabel 4. Kekuatan tekan bebas (q_u) tanah dengan konsistensinya	20
Tabel 5. Perbandingan sistem klasifikasi untuk tanah organik dan gambut pada beberapa negara.....	22
Tabel 6. Parameter uji dan standar pengujian fisik dan mekanik.....	23
Tabel 7. Penelitian terdahulu terkait dengan topik penelitian.....	29
Tabel 8. Daftar alat dan gambar pengujian	34
Tabel 9. Rancangan uji eksperimental biosementasi bakteri	36
Tabel 10. Persiapan benda uji tanah asli sementasi bakteri	37
Tabel 11. Persiapan jumlah benda uji campuran tanah asli dan tanah organik sementasi bakteri.....	37
Tabel 12. Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tanah	43
Tabel 13. Kadar organik pada tanah.....	46
Tabel 14. Nilai kuat geser tanah asli stabilisasi bakteri (kN/m^2)	60
Tabel 15. Perbandingan nilai kuat tekan maksimum setiap kondisi sampel	64
Tabel 16. Perbandingan nilai kohesi maksimum setiap kondisi sampel	66
Tabel 17. Perbandingan nilai kuat geser maksimum setiap kondisi sampel	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7	8
Gambar 2. Diagram plastisitas	9
Gambar 3. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah.....	13
Gambar 4. Kurva pertumbuhan bakteri. Kurva pertumbuhan bakteri.....	28
Gambar 5. Sampel tanah stabilisasi, a) tanah lanau; b) tanah organik.....	35
Gambar 6. Sketsa bentuk sampel benda uji, a) Direct Shear; b) UCT.....	37
Gambar 7. Komposisi campuran larutan media tumbuh bakteri.....	40
Gambar 8. Larutan bakteri dalam media B4	41
Gambar 9. Bagan alir penelitian.....	42
Gambar 10. Diagram klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS	45
Gambar 11. Grafik hubungan perubahan kadar air dan berat isi kering tanah asli	48
Gambar 12. Grafik hubungan tegangan dan regangan tanah asli.....	49
Gambar 13. Grafik hubungan nilai tegangan geser dan tegangan normal tanah asli	50
Gambar 14. Grafik nilai kuat tekan tanah asli + bakteri kultur 2 hari.....	51
Gambar 15. Grafik nilai kuat tekan tanah asli + bakteri kultur 4 hari.....	51
Gambar 16. Grafik nilai kuat tekan tanah asli + bakteri kultur 6 hari.....	52
Gambar 17. Rekapitulasi nilai UCT optimum tanah asli + Bakteri pemeraman 28 hari.....	52
Gambar 18. Uji kuat tekan bebas elemen sampel tanah stabilisasi, a) sebelum uji; b) setelah uji.....	52
Gambar 19. Sampel uji kuat geser elemen sampel tanah stabilisasi, a) sebelum uji; b) setelah uji.....	56
Gambar 20. Nilai kohesi tanah asli + bakteri kultur 2 hari.....	57
Gambar 21. Nilai kohesi tanah asli + bakteri kultur 4 hari	57
Gambar 22. Nilai kohesi tanah asli + bakteri kultur 6 hari	58
Gambar 23. Nilai kohesi tanah asli + bakteri pemeraman 28 hari	58
Gambar 24. Nilai sudut geser tanah asli + bakteri Kultur 2 hari.....	59

Gambar 25. Nilai sudut geser tanah asli + bakteri Kultur 4 hari.....	59
Gambar 26. Nilai sudut geser tanah asli + bakteri Kultur 6 hari.....	59
Gambar 27. Nilai kuat geser tanah asli stabilisasi bakteri kultur 2 hari.....	60
Gambar 28. Nilai kuat geser tanah asli stabilisasi bakteri kultur 4 hari.....	61
Gambar 29. Nilai kuat geser tanah asli stabilisasi bakteri kultur 6 hari.....	61
Gambar 30. Grafik rekapitulasi hubungan perubahan kadar air dan berat isi kering tanah organik.....	62
Gambar 31. Grafik rekapitulasi nilai kuat tekan bebas tanah asli dan tanah organik + bakteri optimum 6% kultur 4 hari.....	63
Gambar 32. Grafik rekapitulasi nilai kohesi tanah asli dan tanah organik stabilisasi bakteri.....	65
Gambar 33. Nilai kuat geser tanah organik stabilisasi bakteri dengan waktu pemeraman 28 hari.....	67

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Lampiran A- 1. Berat spesifik mineral-mineral penting	75
Lampiran A- 2. Variasi harga K pada pengujian hydrometer	75
Lampiran A- 3. Sistem Klasifikasi AASHTO.....	76
Lampiran A- 4. Sistem klasifikasi USCS.....	77
Lampiran A- 5. Perbandingan kelompok tanah sistem AASHTO dan USCS	78
Lampiran A- 6. Batasan-batasan ukuran golongan tanah	78

LAMPIRAN B

Lampiran B- 1. Hasil uji pemeriksaan kadar air tanah asli	79
Lampiran B- 2. Hasil uji pemeriksaan berat jenis tanah asli.....	79
Lampiran B- 3. Hasil uji pemeriksaan Atterberg tanah asli.....	80
Lampiran B- 4. Hasil uji analisa saringan tanah asli.....	81
Lampiran B- 5. Hasil uji kompaksi tanah asli.....	82
Lampiran B- 6. Hasil uji kadar organik pada tanah organik	83
Lampiran B- 7. Hasil uji kuat tekan bebas tanah asli.....	84
Lampiran B- 8. Hasil uji kuat geser tanah asli	85
Lampiran B- 9. Rekapitulasi nilai UCT Tanah asli stabilisasi bakteri.....	86
Lampiran B- 10. Rekapitulasi nilai kohesi tanah stabilisasi bakteri	87
Lampiran B- 11. Rekapitulasi nilai kompaksi tanah organik.....	87
Lampiran B- 12. Rekapitulasi nilai kuat tekan tanah asli dan tanah organik stabilisasi bakteri.....	88
Lampiran B- 13. Rekapitulasi nilai kohesi tanah asli dan tanah organik stabilisasi bakteri.....	88

LAMPIRAN C

Lampiran C- 1. Dokumentasi pekerjaan pemadatan standar proctor.....	89
Lampiran C- 2. Dokumentasi pengujian atterberg.....	89
Lampiran C- 3. Dokumentasi bahan pembuatan larutan bakteri	90
Lampiran C- 4. Dokumentasi pekerjaan pembuatan sampel tanah.....	91
Lampiran C- 6. Dokumentasi pengujian mekanis tanah.....	92

DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	=	Arti/Keterangan
CaCO ₃	=	Kalsium Karbonat
NaHCO ₃	=	Natrium bikarbonat
NH ₄ Cl	=	Amonium klorida
CaCl ₂	=	Kalsium Klorida
CO(NH ₂) ₂	=	Urea
NH ₃	=	Amonia
MICP	=	<i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i>
pH	=	Derajat keasaman
gr	=	Gram
l	=	liter
°C	=	Celsius
kN	=	Kilonewton
ml	=	Mili liter
cm	=	Sentimeter
%	=	Persen
qu	=	Kuat Tekan Bebas
γ _d	=	Kepadatan kering
E	=	Angka pori
kg	=	Kilogram
Φ	=	Sudut geser
G _s	=	Berat jenis
ω	=	Kadar air
ε	=	Regangan
σ	=	Tegangan
H	=	Tinggi
LL	=	<i>Liquid Limit</i> /Batas cair
PL	=	<i>Plastic Limit</i> /Batas Plastis
PI	=	<i>Plasticity Indeks</i> /Indeks Plastisitas
SL	=	<i>Shrinkage Limit</i> /Batas Susut

Lambang/Singkatan	Arti/Keterangan
C	= Kohesi
Cu	= Cohesi Undrained
LRC	= Kalibrasi alat kuat tekan
LS	= Lintang selatan
BT	= Bujur timur
OMC	= Kadar air optimum
τ_f	= Kekuatan geser
ASTM	= <i>American Standard 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>

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Tanah merupakan aspek penting dalam bidang rekayasa geoteknik khususnya dalam perencanaan berbagai macam jenis konstruksi. Dalam Ilmu teknik sipil, fungsi utama dari tanah adalah sebagai pondasi dasar atau pendukung pondasi dari sebuah bangunan. Selain itu, tanah juga berfungsi sebagai material bangunan dalam berbagai jenis pekerjaan dalam bidang konstruksi. Sebelum memulai perencanaan konstruksi, langkah awal yang wajib untuk dilakukan adalah melakukan survei tentang kondisi tanah.

Setiap jenis tanah memiliki spesifikasi yang berbeda, sehingga memerlukan perlakuan yang berbeda pula baik secara mekanis dan kimiawi. Adapun masalah yang seringkali dihadapi dalam merencanakan dan melaksanakan pekerjaan konstruksi diantaranya kurangnya informasi mengenai jenis dan sifat tanah, persyaratan kualitas dan nilai parameternya serta kandungan organik dari tanah yang berbeda dapat mempengaruhi tingkat daya dukung terhadap konstruksi yang dibangun. Melihat kondisi sekarang ini, di mana jumlah penduduk semakin meningkat yang menyebabkan ketersediaan lahan yang terbatas dan kebutuhan lahan yang semakin meningkat, terkadang dihadapkan pada satu pilihan untuk membangun suatu bangunan yang telah ditentukan lokasinya, karena pertimbangan lingkungan, pengaturan zona dan pertimbangan ekonomi lainnya, sedangkan lokasi bangunan tersebut memiliki kondisi tanah yang secara geoteknis kurang menguntungkan. Dalam kondisi ini, pilihannya adalah tetap membangun dengan mengindahkan kondisi tanah.

Salah satu alternatif untuk mengatasi hal ini yang paling mudah adalah memindahkan lokasi proyek ke tempat lain, akan tetapi karena pertimbangan tertentu sehingga lokasi tidak bisa dipindahkan, maka alternatif lain yang bisa dilakukan adalah stabilisasi tanah.

Stabilisasi tanah secara prinsip merupakan suatu metode rekayasa tanah yang bertujuan untuk meningkatkan dan/atau mempertahankan sifat-sifat tertentu pada tanah, agar selalu memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan. Stabilisasi tanah dilakukan sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya. Secara umum, stabilisasi tanah

dapat diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) jenis yaitu: stabilisasi kimia, stabilisasi mekanik dan konsolidasi dengan drainase. Stabilisasi secara kimiawi berfokus pada perbaikan tanah dengan cara menambahkan suatu bahan kimia yang mempunyai sifat khusus yang dapat membantu mendapatkan suatu massa tanah yang lebih stabil yaitu berupa pencampuran semen *portland*, kapur, abu batu bara, tras, *zeolite*, dan bakteri. Sedangkan stabilisasi secara mekanik berfokus dalam mengoptimalkan kinerja konstruksi, antara lain: kapasitas daya dukung tanah, kuat geser tanah, penurunan (*settlement*), permeabilitas tanah, dan lain sebagainya, yang mana syarat teknis tersebut selalu dikaitkan dengan jenis dan fungsi konstruksi yang dibangun.

Salah satu jenis tanah yang sering menjadi objek untuk distabilisasi adalah tanah organik. Secara geoteknik, tanah ini merupakan salah satu jenis tanah dengan kondisi yang buruk karena tercampur dengan bahan-bahan organik serta sisa-sisa lapukan tanaman atau hewan. Karakteristik dari tanah organik adalah kadar air yang tinggi, kompresibilitas tinggi, kadar organik tinggi, kuat geser yang rendah, serta kekuatan daya dukung rendah yang mengakibatkan proses konstruksi bermasalah. Jenis tanah yang mengandung kadar organik, sangat jarang digunakan untuk dasar konstruksi karena kondisi tanah yang buruk sehingga kurang menguntungkan.

Beberapa penelitian telah banyak dilakukan terkait metode stabilisasi tanah organik, salah satunya dengan menggunakan mikro-organisme berupa bakteri. Secara prinsip, metode ini melakukan pencampuran bahan kimiawi yaitu mikroorganisme. Seperti penelitian yang dilakukan oleh (Hasriana et al., 2018), (Behzadipour et al., 2020), dan (Samang et al., 2017). Secara umum, hasil penelitian ini, mampu menstabilisasi tanah organik dengan memanfaatkan mikroorganisme yang berasal dari bakteri karena dapat menghasilkan kalsium karbonat yang dapat merubah butiran pasir menjadi batuan pasir, metode ini disebut dengan biosementasi. Hasilnya penambahan bakteri untuk stabilisasi tanah lempung berpasir dengan metode biosementasi berhasil meningkatkan daya dukung tanah. Penggunaan mikroorganisme dianggap sebagai alternatif di tengah maraknya bahan-bahan kimia dan sintesis pada konstruksi sipil karena dengan pemanfaatan mikroorganisme yang berasal dari bakteri dapat menghasilkan kalsit atau kristal

kalsium karbonat yang bisa merubah butiran pasir menjadi batuan pasir, metode ini disebut dengan biosementasi.

Indonesia berada di iklim tropis yang hanya memiliki musim kemarau dan penghujan, memberikan dampak pada perubahan kadar air tanah yang meningkat pada saat musim penghujan dan berkurang pada musim kering. Perubahan kadar air secara terus menerus akan mempengaruhi parameter tanah, yaitu sifat fisik tanah (berat volume kering tanah, kadar air, derajat kejenuhan) dan sifat mekanis tanah (nilai kuat tekan bebas). Hal ini disebabkan tidak semua jenis tanah memiliki ketahanan yang stabil akibat perubahan cuaca dari basah – kering yang tidak menentu.

Berdasarkan uraian di atas, maka akan dilakukan penelitian mengenai stabilisasi sifat mekanik tanah dengan bakteri dengan metode biosementasi. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lanau dan tanah organik dengan kandungan organik yang tinggi sedangkan jenis bakteri yang digunakan adalah *Bacillus subtilis*. Alasan menggunakan metode dan jenis bakteri ini adalah bakteri ini ramah lingkungan dan diyakini dapat memperbaiki karakteristik tanah dengan meningkatkan kekuatan tanah pondasi bangunan, mengurangi kompressibilitas dan permeabilitas, dan mengurangi variasi volume dari pengembangan. Adapun judul dari penelitian ini adalah ***“Perilaku Mekanis Tanah Organik Tinggi yang distabilisasi dengan Bakteri”***.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah, rumusan masalah yang akan dikaji adalah:

1. Bagaimana pengaruh bakteri *Bacillus subtilis* pada karakteristik fisik dan mekanis pada tanah organik tinggi?
2. Bagaimana perilaku mekanis tanah organik tinggi dengan biosementasi bakteri *Bacillus subtilis* dengan curing udara dan curing rendaman?

I.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian dalam tulisan ini adalah:

1. Mengevaluasi karakteristik fisis dan mekanis tanah organik tinggi yang terstabilisasi Bakteri

2. Mengevaluasi perilaku mekanis tanah organik tinggi dengan Biosementasi Bakteri dengan curing udara dan curing rendaman

I.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyajikan informasi tentang perilaku mekanik tanah yang terstabilisasi bakteri.
2. Hasil analisis dapat memberikan kontribusi pengembangan ilmu Geoteknik, khususnya teknologi biosementasi bakteri.
3. Diharapkan dapat meningkatkan kinerja konstruksi sipil pada stabilitas tanah.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dalam penelitian pengujian stabilisasi tanah ini dibuat untuk menghindari cakupan penelitian yang lebih luas agar penelitian dapat berjalan efektif, serta dapat mencapai sasaran yang diinginkan. Penelitian ini mencakup;

- Pengujian eksperimental laboratorium karakteristik mekanis tanah dengan teknologi biosementasi bakteri meliputi sifat fisik dan mekanis tanah organik tinggi yang terstabilisasi bakteri.
- Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lanau dan tanah organik dengan persentase 10-60%.
- Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*.
- Kultur bakteri yaitu selama 2, 4 dan 6 hari serta persentase bakteri yang digunakan yaitu 4%, 6% dan 8% dengan pemeraman 0, 7, 14, 28 hari

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Definisi dan Klasifikasi Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dengan bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan zat gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat (Das et al., 2018)

Tanah mempunyai peran penting yang erat kaitannya dengan perencanaan struktur bangunan karena didirikan langsung diatas tanah. Tanah memiliki spesifikasi dan perilaku yang berbeda untuk setiap jenisnya, sehingga memerlukan perlakuan yang berbeda baik secara mekanis maupun kimiawi agar dapat memenuhi spesifikasi teknis tertentu. Perlakuan tersebut tidak dapat dipisahkan karena berkaitan erat satu sama lain (Dhani et al., 2021).

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.

Tanah terbentuk melalui proses pelapukan fisik dan kimiawi. Ukuran dari bagian penyusun batuan yang telah lapuk pun dapat berkisar dari yang terkecil (*Koloid*) hingga yang terbesar (*Boulders*). Ini menyiratkan bahwa semua unsur pelapukan dari batuan tidak dapat disebut tanah. Menurut ukuran butirannya, partikel tanah diklasifikasikan sebagai kerikil, pasir, lanau dan lempung.

Sistem klasifikasi tanah digunakan untuk mengelompokkan tanah-tanah sesuai dengan perilaku umum dari tanah pada kondisi fisis tertentu. Kebanyakan klasifikasi tanah menggunakan indeks pengujian yang sangat sederhana untuk memperoleh karakteristik tanahnya. Karakteristik tersebut digunakan untuk menentukan kelompok klasifikasinya. Umumnya klasifikasi didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari analisis saringan (percobaan sedimentasi) dan

plastisitasnya (Hardiyatmo, 2012)

Beberapa sistem klasifikasi yang umum digunakan dalam bidang teknik sipil yang telah dikembangkan *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, *U.S. Department of Agriculture (USDA)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, dan oleh *U.S. Army Corps of Engineers* dan *U.S. Bureau of Reclamation* yang kemudian menghasilkan apa yang disebut sebagai Unified Soil Classification System (USCS). Pada saat sekarang sistem Unified (USCS) telah diterima di seluruh dunia, sistem ini telah dipakai pula oleh *American Society of Testing and Material (ASTM)*. Batasan-batasan ukuran golongan tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Batasan-batasan ukuran golongan tanah

Soil Classification System	Grain size (mm)			
	Gravel	Sand	Silt	Clay
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2-0.06	0.06-0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2-0.05	0.05-0.002	<0.002
American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO)	76.2-2	2-0.075	0.075-0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S Bureau of Reclamation)	76.2-4.75	4.75-0.075	Fine-grained (i.e. silt and clay) <0.0075	

(Sumber: Hardiyatmo, 2012)

Saat ini, dua sistem klasifikasi yang biasanya digunakan untuk mempertimbangkan distribusi ukuran partikel dan batas *atterberg* yaitu sistem klasifikasi *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* dan *Unified Soil Classification System*. (Das et al., 2018)

II.1.1 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

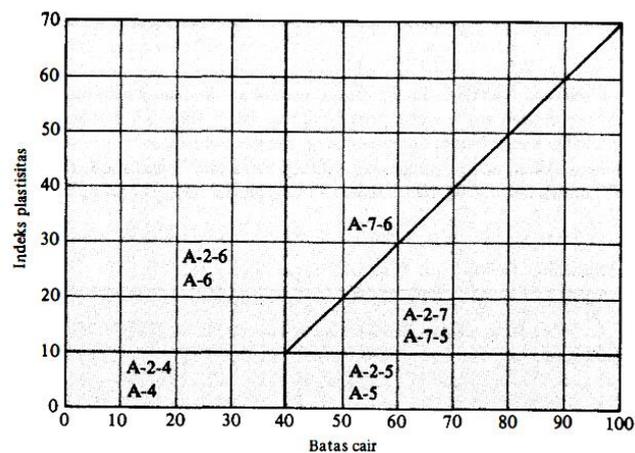
M 145). Dalam sistem ini tanah diklasifikasikan menjadi tujuh kelompok besar yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang termasuk dalam golongan A-1, A-2 dan A-3 termasuk dalam tanah berbutir, dimana 35% atau kurang dari jumlah tanah tersebut lolos ayakan no. 200. Sedangkan tanah yang lebih dari 35% butirannya lolos ayakan no.200 yang masuk dalam golongan A-4, A-5, A-6 dan A-7 adalah tanah lempung atau lanau. Kriteria dalam menentukan golongan tanah dapat diperhatikan dalam lampiran 2 Klasifikasi Tanah berdasarkan sistem AASHTO.(L Braja et al., 1998)

Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

1. Ukuran butir:
 - a. Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2mm).
 - b. Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm).
 - c. Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.
2. Plastisitas:

Tanah berlanau mempunyai indeks plastisitas (*plasticity indeks*, 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.
3. 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 Lampiran A-3 dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan hingga ditemukan angka-angka yang sesuai. Gambar 1 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair (*liquid limit*, LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.



Gambar 1. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7

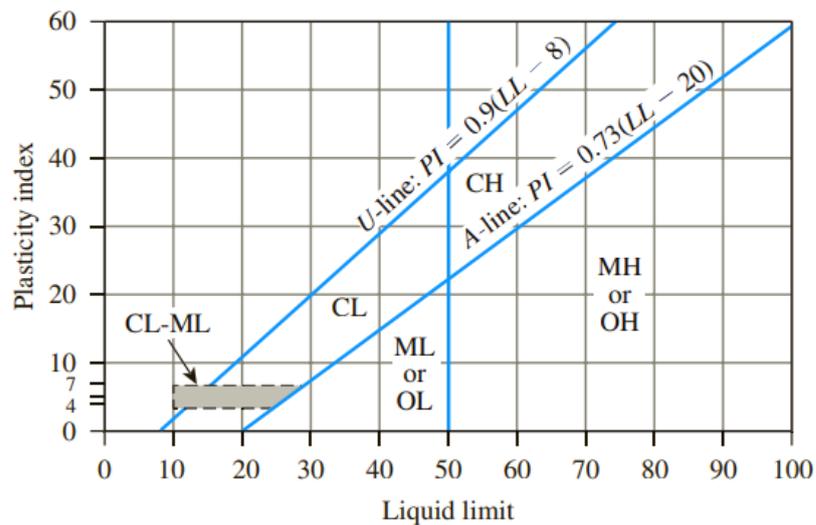
(Sumber : Das et al., 2018)

II.1.2 Sistem Klasifikasi Unified (USCS)

Sistem yang diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 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:

- 1.) 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*) atau tanah berpasir.
- 2.) 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.

Kriteria dalam menentukan golongan tanah dapat diperhatikan dalam Lampiran A-4 Klasifikasi Tanah berdasarkan sistem USCS. Untuk penentuan simbol kelompok berdasarkan hubungan batas cair dan indeks plastisitas ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram plastisitas

II.2 Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik atau properti tanah dasar pada suatu konstruksi sangat mempengaruhi berbagai elemen konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Properti tanah ditunjukkan dengan berbagai parameter yang disebut dengan indeks properti atau indeks sifat-sifat fisik tanah, 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.

1. 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:

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

dengan: w = Kadar Air, W_w = Berat air, W_s = Berat tanah kering

2. Berat jenis tanah

Berat jenis atau Berat spesifik (Specific Gravity) yaitu perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada temperatur 4°C yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Pada Tabel 2 memperlihatkan berat jenis (G_s) pada berbagai jenis tanah.

Tabel 2. Berat jenis (G_s) berbagai jenis tanah

<i>Type of Soil</i>	<i>Specific Gravity (G_s)</i>
<i>Gravel</i>	2.65 – 2.68
<i>Sand</i>	2.65 – 2.68
<i>Inorganic Soil</i>	2.62 – 2.68
<i>Organic Clay</i>	2.58 – 2.65
<i>Inorganic Clay</i>	2.68 – 2.75
<i>Humus</i>	1.37
<i>Peat</i>	1.25 – 1.80

(Sumber : Hardiyatmo, 2012)

3. Angka Pori

Angka pori adalah perbandingan antara rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Semakin besar nilai angka pori maka daya dukung tanah semakin kecil. Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

dengan: e = Angka pori, V_v = Volume pori, V_s = volume butir padat

4. Porositas

Porositas (*porosity*) adalah perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V). Nilai porositas dapat dinyatakan dalam satuan persen (%) atau dalam satuan desimal. Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4)$$

5. Derajat kejenuhan

Derajat kejenuhan (S) adalah perbandingan antara volume air (V_w) dengan volume total rongga pori (V_v). Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \% \quad (5)$$

Apabila tanah dalam kondisi jenuh air, maka nilai $S = 1$ (100%), jika tanah

dalam keadaan kering maka nilai derajat kejenuhannya adalah 0 (0%). Nilai derajat kejenuhan ini dapat digunakan untuk mengklasifikasi konsistensi tanah yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah

<i>Soil Consistency</i>	<i>Degree of Saturation (S)</i>
<i>Dry Soil</i>	0.00
<i>Slightly damp soil</i>	>0 – 0.25
<i>Moist soil</i>	0.26 – 0.50
<i>Very moist soil</i>	0.51 – 0.75
<i>Wet Soil</i>	0.76 – 0.99
<i>Saturated soil</i>	1.00

(Sumber :Hardiyatmo, 2012)

6. Pemeriksaan ukuran butiran dan hidrometer

a.) Pemeriksaan ukuran butiran

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%.

b.) Pemeriksaan 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:

$$\bullet R_{cp} = R + \text{temperature correction} + \text{zero correction} \quad (6)$$

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

R adalah hasil pembacaan alat ukur hidrometer

- Menghitung persentase butiran halus

$$\% \text{ butiran halus} = \frac{a \cdot R_{cp}}{W_s} \times 100\% \quad (7)$$

Dimana: W_s = berat kering contoh tanah

α = koreksi untuk berat jenis dari butiran tanah

$$a = \frac{G_s \times 1,65}{(G_s - 1) \times 2,65} \quad (8)$$

- Mencari garis tengah butir-butir tanah:

$$D = K\sqrt{l/t} \quad (9)$$

Dimana:

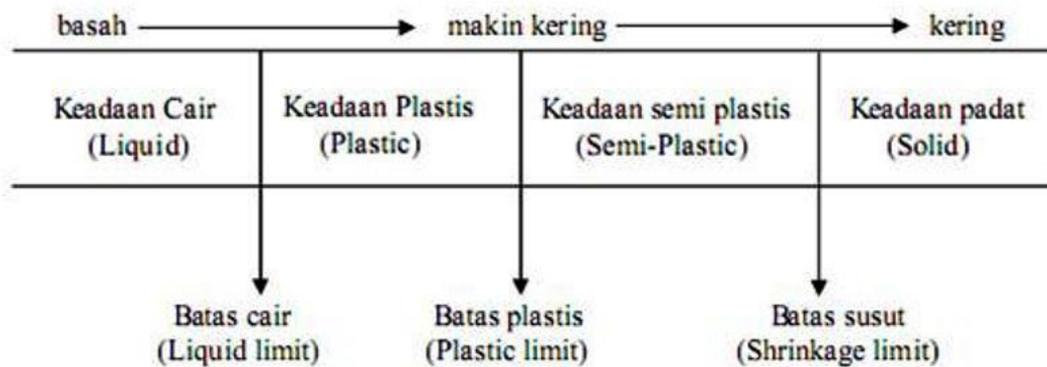
K = Rasio kekentalan air yang ditentukan dengan menggunakan grafik

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

t = Waktu pembacaan

7. Batas-batas *Atterberg*

Konsistensi tanah sangat dipengaruhi oleh kadar air, 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 atau desain. Yang diperoleh dari percobaan Atterberg limit ini adalah gambaran secara garis besar akan sifat-sifat tanah yang bersangkutan. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat-sifat teknis yang buruk, yaitu kekuatannya rendah, kompresibilitasnya tinggi dan sulit dalam pematatannya. Untuk macam-macam tanah tertentu Atterberg limit dapat dihubungkan secara empiris dengan sifat-sifat lainnya, misalnya dengan kekuatan geser atau *compression index* dan sebagainya. 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 3.



Gambar 3. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah.

a.) Batas Cair (LL)

Batas Cair adalah nilai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dengan keadaan plastis tanah, atau nilai batas atas pada daerah plastis. Definisi LL dalam uji laboratorium adalah kadar air dimana celah sampel tanah yang dibuat dengan alat pengukur (*grooving tool*) di mangkuk *casagrande* menutup selebar 12,7 mm (0,5 Inch) ketika mangkuk *casagrande* dijatuhkan dari ketinggian 1cm sebanyak 25 kali dengan kecepatan penjatuhan 2 ketukan per detik (120 rpm). Untuk mencari batas cair (LL) digunakan rumus :

$$LL = \omega_N \left[\frac{N}{25} \right]^{\tan \beta} \quad (10)$$

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:

$$PI = LL - PL \quad (11)$$

keterangan:

PI = Indeks Plastisitas

LL= Batas cair pada ketukan 25

PL= Batas plastis

d.) Batas Susut (SL)

Batas susut adalah 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:

$$SL = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_2} - \frac{(v_w - v_d)}{m_2} \right] \times 100\% \quad (12)$$

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)

II.3 Sifat Mekanis Tanah

Sifat mekanis tanah merupakan sifat perilaku dari struktur massa tanah yang dikenai suatu gaya atau tekanan yang dijelakan secara teknis mekanis dengan tujuan memperbaiki sifat sifat tanah.

II.3.1 Pematatan 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

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (13)$$

- Menghitung kadar air akhir

$$\omega_{akhir} = \omega_{awal} + \left(\frac{\omega_{awal} + \text{penambahan air}}{\text{berat tanah}} \right) \times 100 \quad (14)$$

- Menghitung berat volume basah

$$\gamma = \frac{W_w}{V_{mould}} \quad (15)$$

- Menghitung berat kering

$$W_{dry} = \frac{W_w}{1 + \left(\frac{\omega}{100} \right)} \quad (16)$$

- Menghitung berat volume kering

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (17)$$

- Menghitung berat volume total

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} = (\gamma_d) \times 1 + \left(\frac{\omega}{100} \right) \quad (18)$$

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.3.2 Kuat Geser Tanah (*Direct Shear*)

Kekuatan geser tanah adalah kekuatan tanah untuk melawan pergeseran yang terjadi di dalam tanah. Apabila tegangan normal tanah melampaui kuat geser tanah, maka akan terjadi ke longSORAN. Kuat geser tanah diperlukan untuk berbagai macam persoalan praktis terutama untuk menghitung daya dukung tanah, tegangan tanah terhadap dinding penahan tanah dan kestabilan lereng. Uji geser langsung (*direct shear*) merupakan pengujian yang sederhana dan langsung.

Pengujian dilakukan dengan menempatkan contoh tanah ke dalam kotak geser. Kotak ini terbelah, dengan setengah bagian yang bawah merupakan bagian yang tetap dan bagian atas mudah bertranslasi.

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar seperti ini, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh:

- Kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan pematatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan vertikal yang bekerja pada gesernya.
- Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan vertikal pada bidang gesernya. Kekuatan geser dapat diukur langsung dengan pemberian beban konstan vertikal (normal) pada sampel dan pemberian gaya geser tertentu dengan kecepatan konstan dan perlahan-lahan untuk menjaga tegangan air pori tetap nol hingga tercapai kekuatan geser maksimum.
- Kekuatan geser tanah tak jenuh dapat dihitung dengan rumus:

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (19)$$

keterangan:

τ_f = Kekuatan Geser

σ = Tegangan total pada bidang geser

u = Tegangan Air Pori

c = Kohesi

ϕ' = Sudut Geser

- Kekuatan geser tanah dapat diartikan sebagai gaya lawan atau perlawanan yang dilakukan oleh butiran tanah terhadap desakan atau tarikan. Apabila tegangan

normal tanah melampaui kuat geser tanah, maka tanah akan mengalami kegagalan atau kelongsoran. Berdasarkan pengertian ini, ketika terjadi pembebanan pada tanah akan ditahan oleh kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah serta gesekan antar butiran tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya. Adapun Coulomb (1776) mendefinisikan $f(\sigma)$ sebagai:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (20)$$

keterangan:

τ = Kekuatan Geser

σ = Tegangan total pada bidang geser

c = Kohesi

ϕ = Sudut Geser

Kuat geser sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- Tekanan efektif atau tekanan antar butir.
- Kemampuan partikel atau kerapatan
- Saling keterkuncian antar partikel: jadi, partikel-partikel yang bersudut akan lebih saling terkunci dan memiliki kuat geser yang lebih tinggi ϕ yang lebih besar daripada partikel-partikel yang bundar seperti pada tebing-tebing.
- Sementasi partikel, yang terjadi secara alamiah atau buatan. - Daya tarik antar partikel atau kohesi
- Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah dalam hal ini berupa gerakan lateral tanah. Deformasi ini terjadi akibat kombinasi keadaan kritis pada tegangan normal dan tegangan geser yang tidak sesuai dengan faktor aman dari yang direncanakan. Nilai ini didapat dari pengujian *Direct Shear Test*. Kohesi yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya tanah pada umumnya digolongkan sebagai berikut:

- Tanah berkohesi atau berbutir halus (misal lempung)
- Tanah tidak berkohesi atau berbutir kasar (misal pasir)
- Tanah berkohesi-gesekan, ada c dan ϕ (misal lanau)

Pada pengujian tertentu, tegangan normal dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Tegangan Normal } (\sigma) = \frac{P}{A} \quad (21)$$

Dimana;

σ = Tegangan Normal (kg/cm²)

P = Gaya Normal (kg)

A = Luas Permukaan bidang geser (cm²)

Pada saat melakukan percobaan, nilai tegangan geser didapat dengan menghitung gaya geser yang didapat dari pembacaan maksimum *load ring dial* setelah dikalikan dengan nilai kalibrasi proving ring (LRC), kemudian gaya geser tersebut dibagi dengan luas *shear box*.

$$\text{Tegangan Geser } (\tau) = \frac{G \times \text{Kalibrasi Proving Ring}}{A} \quad (22)$$

Dimana;

τ = tegangan geser (kg/cm²)

G = gaya geser dari pembacaan maksimum *load ring dial*

A = luas penampang *shear box*

- Sudut Geser Dalam

Kekuatan geser dalam mempunyai variabel kohesi dan sudut geser dalam. Sudut geser dalam bersamaan dengan kohesi menentukan ketahanan tanah akibat tegangan yang bekerja berupa tekanan lateral tanah. Nilai ini juga didapatkan dari pengujian *Direct Shear Test*.

II.3.3 Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*).

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).

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 :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f \quad (23)$$

Kohesi tanah undrained (c_u) adalah :

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad (24)$$

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)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{h} \quad (25)$$

2) Tegangan normal rata-rata (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{P}{A_r} \quad (26)$$

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

$$A_r = \frac{A_o}{1 - \varepsilon} \quad (27)$$

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)

P_a = beban normal (kg)

ΔL = deformasi (cm)
 P = beban (kg)
 A_0 = luas penampang (cm^2)
 N = Pembacaan dial beban (div)

Tabel 4. Kekuatan tekan bebas (q_u) tanah dengan konsistensinya

<i>Consistency</i>	<i>q_u (kg/cm^2)</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)

II.4 Karakteristik Tanah Lanau

Tanah lanau adalah tanah dengan ukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis 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.5 Karakteristik Tanah Organik

Tanah organik dianggap sebagai salah satu dari sebagian besar tanah yang bermasalah karena kompresibilitasnya yang tinggi dan kekuatan geser yang rendah pada regangan kecil. Penggolongan tanah organik berdasarkan indeks propertinya berguna untuk tahap desain awal pada pekerjaan proyek konstruksi. Terdapat 2 indeks properti utama yang digunakan untuk menilai sifat fisik tanah organik, yaitu : kadar air, kadar organik dan kadar serat. Tanah organik dibedakan dari kandungan airnya yang relatif tinggi. Kandungan organik termasuk komponen karbon dan mudah terbakar. (ElMouchi et al., 2021)

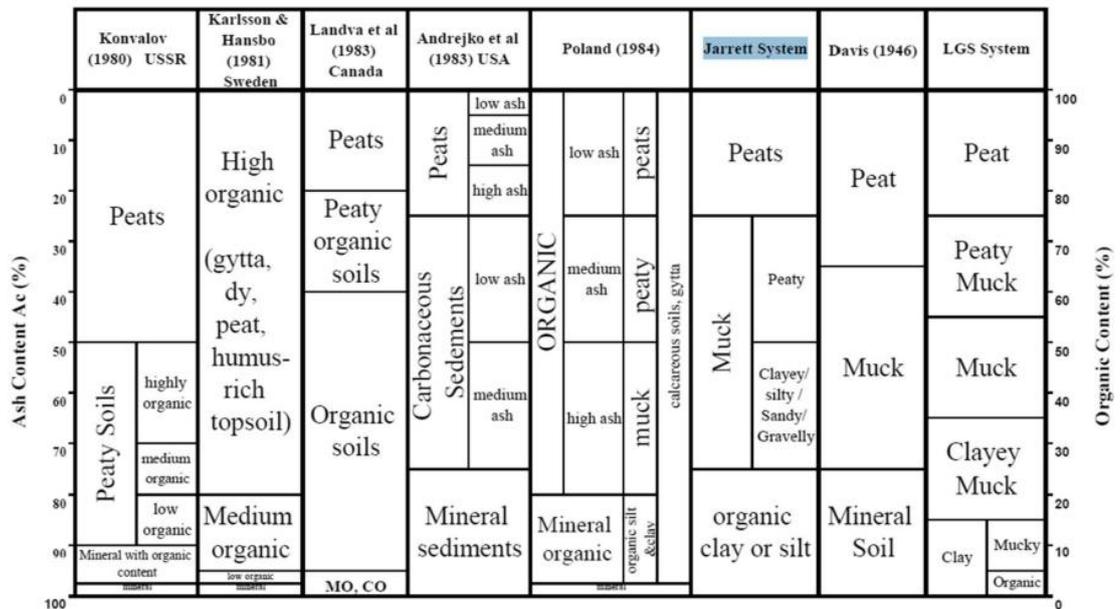
Tanah organik dikenal dengan kadar air yang tinggi, rasio rongga awal yang tinggi, kerapatan curah yang rendah, permeabilitas awal yang tinggi, kompresibilitas yang tinggi, dan kekuatan geser yang rendah pada regangan kecil.

Tanah organik (O) adalah tanah yang dikelompokkan sedemikian berdasarkan kandungan organiknya, dimana didefinisikan sebagai tanah yang memiliki kandungan organik 25% hingga 75%. Selanjutnya, tanah organik ini dikelompokkan lagi menjadi kelompok OL dan OH berdasarkan tingkat plastisitasnya. Sistem USCS membagi tanah menjadi tiga kelompok utama: tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus dan tanah dengan kandungan organik yang tinggi. Lebih jauh dalam Panduan ini tanah berbutir organik diklasifikasikan dalam beberapa kelompok, sebagaimana terlihat dalam Tabel 5.

Salah satu ciri khas tanah organik adalah kandungan airnya yang tinggi. Kandungan air yang tinggi disebabkan oleh rongga pori yang besar, yang dibentuk oleh struktur serat yang meningkatkan daya tarik molekul air. kandungan organik, kerapatan curah, berat jenis, kompresibilitas dan parameter kekuatan geser dapat diperoleh dengan menggunakan korelasi yang tersedia dengan mengukur kadar air. (Phang et al., 2018)

Tanah organik pada umumnya memiliki dua komponen utama; komponen organik, dan komponen mineral. tanah organik mirip dengan tanah mineral. Sampel tanah organik yang mewakili dikeringkan dalam oven pada suhu 110 C, dan berat air yang dikeluarkan dari sampel basah dibagi dengan berat sampel kering memberikan kandungan air (sesuai ASTM D2974-14). Komponen organiknya mengandung karbon dan mudah terbakar. (Adnan Ibrahim et al., 2018)

Tabel 5. Perbandingan sistem klasifikasi untuk tanah organik dan gambut pada beberapa negara



(Sumber : ElMouchi et al., 2021)

Kandungan organik pada tanah organik memainkan peran penting dalam klasifikasi tanah organik dan sifat mekaniknya. Semakin tinggi kandungan organiknya, semakin tinggi kadar air, angka pori, dan kompresibilitas.

Pengukuran kandungan organik memerlukan pengukuran kandungan abu (komponen mineral yang tidak mudah terbakar) terlebih dahulu. Menurut ASTM D2974-14, kadar abu sampel tanah organik didefinisikan sebagai persentase berat zat yang tersisa setelah membakar sampel yang dikeringkan dengan oven dalam tungku pada suhu $440^{\circ}\pm 40^{\circ}\text{C}$ sehubungan dengan berat oven yang dikeringkan.

Setelah itu, kadar organik ditentukan dengan mengurangkan persentase kadar abu dari seratus persen. Penentuan kadar abu tanah organik juga disebut sebagai kehilangan nyala dalam literatur. Metode kehilangan pengapian memiliki beberapa unsur kesalahan; karena mineral tambahan dapat terbakar selama pengujian.

II.6 Parameter Uji Sifat Fisik dan Mekanis

Sifat fisik tanah yaitu sifat yang berhubungan dengan elemen penyusunan massa tanah, sedangkan sifat mekanis tanah merupakan sifat perilaku dari struktur massa tanah yang dikenai suatu gaya atau tekanan. Uji laboratorium untuk mengetahui sifat-sifat fisik yang meliputi kadar air, batas-batas atterberg, berat

jenis, dan analisa saringan, sedangkan uji sifat mekanis meliputi uji pemadatan, uji kuat tekan, dan uji kuat geser. Berikut Tabel parameter uji dan standar pengujian fisik dan mekanis.

Tabel 6. Parameter uji dan standar pengujian fisik dan mekanik

No	Type of testing	Standards	
		ASTM	SNI
1	Sieve Analysis	C-136-06	SNI 03-1968-1990
2	Atterberg Limit		
	a. Liquid Limit (LL)	D-423-66	SNI 03-1967-1990
	b. Plastic Limit (PL)	D-424-74	SNI 03-1966-1990
	c. Plasticity Indeks (PI)	D-4318-10	SNI 03-1966-2008
3	Spesific Gravity (Gs)	D-162	SNI 03-1964-1990
4	Saturated Unit Weight (γ_{sat})	D-2216-98	SNI 03-1743-1989
5	Water Content (ω)	D-2216-98	SNI 03-1965-1990
6	Dry Unit Weight (γ_{dry})	D-854-72	SNI 03-1970-2008
7	Porosity (e)	D-854-72	SNI 03-2473-1991
8	Porosity (n)	D-7063-11	SNI 13-3604-1994
9	Degree of Saturation (Sr)	D-854-72	SNI 03-2812-1992
10	Unconfined compressive strength (q_u)	D-633-1994	SNI 03-6887-2002
11	Direct Shear Test (Cu)	D-3080	SNI 03-3420-1994
12	Proctor Test	D-698	SNI 03-1742-1989

II.7 Stabilisasi Tanah Menggunakan Teknik Biosementasi

Secara garis besarnya Stabilisasi Tanah dapat dibedakan atas dua macam, yakni: (1) Stabilisasi tanah melalui teknik perbaikan tanah (*soil improvement*); (2) Stabilisasi tanah melalui teknik perkuatan tanah (*soil reinforcement*). Teknik perbaikan tanah adalah merupakan tindakan stabilisasi tanah dengan memperbaiki karakteristik tanah yang asli, hingga memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan oleh konstruksi, seperti peningkatan daya dukung dan kuat geser tanah, penurunan kompresibilitas tanah, peningkatan atau penurunan permeabilitas tanah, dan lain sebagainya. Sedangkan teknik perkuatan tanah adalah bentuk- bentuk rekayasa yang dilakukan agar terjadi aksi komposit antara tanah dengan material sisipan, sehingga dihasilkan berbagai jenis kapasitas pada tanah sesuai yang dikehendaki (kepentingan konstruksi). Contoh teknik perkuatan tanah antara lain ; perkuatan tebing atau perkuatan tanah dasar dengan material sisipan dari metal strip atau geosyntetic, pembuatan lapis separator dalam tanah dengan menggunakan material

sisipan dari geomembrane, dan lain sebagainya (Panguriseng, 2017). Tujuan dari stabilisasi tanah adalah untuk mengikat dan menyatukan agregat material yang ada sehingga membentuk struktur jalan atau pondasi jalan yang padat.

Menurut *Bowles*, 1979, beberapa tindakan yang dilakukan untuk menstabilisasikan tanah adalah sebagai berikut : meningkatkan kerapatan tanah, menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan/atau tahanan gesek yang timbul, menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan/atau fisis pada tanah, menurunkan muka air tanah (drainase tanah), mengganti tanah yang buruk.

Stabilisasi tanah adalah upaya yang dilakukan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah. Metode stabilisasi yang banyak digunakan adalah stabilisasi mekanis dan stabilisasi kimiawi. Stabilisasi mekanis adalah salah satu metode untuk meningkatkan daya dukung tanah dengan cara perbaikan struktur dan perbaikan sifat-sifat mekanis tanah, sedangkan stabilisasi kimiawi yaitu menambah kekuatan dan kuat dukung tanah dengan jalan mengurangi atau menghilangkan sifat-sifat teknis tanah yang kurang menguntungkan dengan cara mencampur tanah dengan bahan kimia. Adapun metode-metode stabilisasi yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Stabilisasi Tanah secara Mekanis

Dalam metode ini, stabilisasi dapat dicapai melalui proses fisik dengan mengubah sifat fisik tanah di lapangan. Salah satu proses fisik yang dapat dilakukan yaitu pemadatan tanah (Makusa, 2012). Tanah hasil stabilisasi secara mekanis akan mengalami peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap beban yang bekerja di atasnya. Hal ini disebabkan karena adanya kaitan dan geseran antara butiran tanah kasar dengan butiran tanah halus. Kestabilan tanah hasil stabilisasi mekanis akan tercapai setelah dilakukan pemadatan.

2. Stabilisasi Tanah secara Kimiawi

Dalam stabilisasi kimiawi terjadi reaksi antara bahan stabilisasi dengan tanah. Stabilisasi dilakukan dengan cara penambahan bahan stabilisasi yang dapat mengubah sifat kurang menguntungkan dari tanah. Bahan stabilisasi yang dapat digunakan di antaranya semen *portland*, kapur, abu batubara (*fly ash*), aspal, dan lain-lain. Metode ini biasanya digunakan pada tanah berbutir halus. Pemilihan jenis

bahan tambah untuk stabilisasi dilakukan berdasarkan distribusi ukuran butir tanah.(Afrin, 2017)

Stabilisasi tanah dapat dilakukan secara mekanis maupun menggunakan bahan-bahan aditif (zat kimia) biasa disebut sebagai bahan stabilisator. Secara mekanis stabilisasi tanah dilakukan dengan mengatur gradasi butiran tanah kemudian dilakukan proses pemadatan, sedangkan stabilisasi yang menggunakan bahan aditif dapat dilakukan dengan menambah bahan aditif kemudian dilakukan pemadatan (Mujah et al., 2017).

Adapun pekerjaan yang dapat dilakukan untuk mendukung tindakan-tindakan di atas tersebut, yaitu sebagai berikut:

1. Mekanis, pemadatan dengan berbagai jenis peralatan mekanis sejenis mesin gilas (roller), benda-benda berat yang dijatuhkan, eksplosif, tekanan statis, pembekuan, pemanasan dan lainnya.
2. Pencampuran, menambahkan kerikil pada tanah kohesif, menambahkan lempung pada tanah berbutir kasar, mencampur bahan kimia seperti semen Portland, gamping, abu batu bara, klorida, limbah pabrik-pabrik kenas, dan lainnya.
3. Suntikan (*grouting*), suatu injeksi dari campuran larutan. Bahan tambah, hasil olahan pabrik yang bila ditambahkan ke dalam tanah dengan perbandingan yang tepat akan memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, seperti kekuatan, tekstur, kemudahan dikerjakan (*workability*) dan plastisitas. Stabilisasi dengan bahan tambah juga sering disebut stabilisasi kimiawi yang bertujuan untuk memperbaiki sifat teknis tanah dengan mencampur tanah dengan menggunakan bahan tambah dengan perbandingan tertentu.

Sementasi merupakan suatu proses pencampuran suatu bahan tambah ke dalam rongga, rekah dan retakan tanah/batuan, yang mana cairan tersebut dalam waktu tertentu akan menjadi padat secara fisika maupun kimiawi

Biosementasi merupakan salah satu cabang baru yang berkembang di bidang geoteknik yang berhubungan dengan penerapan aktivitas mikrobiologi untuk meningkatkan sifat rekayasa dari tanah. Salah satu proses yang paling umum digunakan untuk mencapai bio-sementasi tanah adalah melalui presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba atau *microbially induced calcite precipitation* (MICP). Teknik ini menggunakan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk

kalsit (CaCO_3) yang mengikat partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah.

Kristal kalsium karbonat (CaCO_3) yang terbentuk dari teknologi ini akan menjadi jembatan antara butiran pasir sehingga menyebabkan proses sementasi, dan mengubah pasir menjadi batuan pasir. Secara alami, proses ini memerlukan waktu hingga jutaan tahun. Oleh karena itu digunakan bakteri untuk mempercepat proses pembentukan kalsit dengan memanfaatkan proses presipitasi karbonat hasil aktivitas metabolisme bakteri.

II.8 Pengaruh Bakteri *Bacillus subtilis* pada Tanah

- **Klasifikasi *Bacillus subtilis***

Kingdom : Procaryorae

Divisi : Firmicutes

Kelas : Schizomycetes

Bangsa (Ordo) : Eubacteriales

Suku (Familia) : Bacillaceae

Marga (Genus) : Bacillus

Jenis (Specsies) : Baciilus Subtilis

- **Sifat dan Morfologi**

Bacillus subtilis merupakan bakteri 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. Dapat tumbuh pada suhu maksimum 25-75°C. Dapat ditemukan di udara, air, tanah, bulu binatang atau bangkai, pH optimum tumbuh 5,5-8,5 (Cheng et al., 2016). Selanjutnya (Mujah et al., 2019) mengatakan bahwa Bacillus mampu memproduksi enzim hydrolytic untuk memecah polisakarida, asam nuklea dan lemak yang memungkinkan organisme menggunakannya sebagai sumber karbon dan elekron. Selain itu bakteri genus Bacillus juga mengandung enzim protease, lipase, amilase, dan sellulose. Menurut (Mahawish et al., 2018), bakteri genus Bacillus termasuk bakteri pengurai dan mampu memanfaatkan komponen bahan organik yang berbeda-beda seperti selulosa, hemiseiulosa, tepung, pectin, khitin, protein dan asam nukleat. Selanjutnya dijelaskan bahwa Bacillus termasuk bakteri denitrifikasi, juga

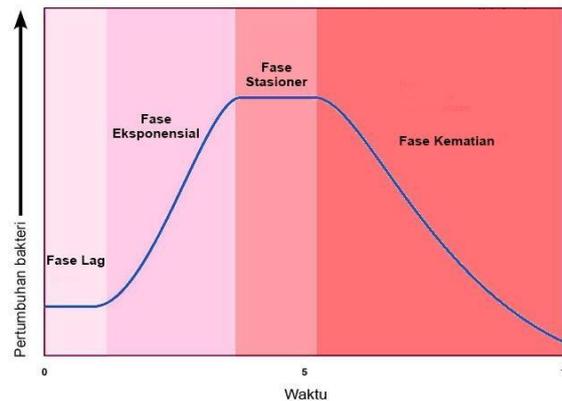
tergolong bakteri amonifikasi (Jeong et al., 2017) mampu mengurai penumpukan senyawa nitrogen.

Bakteri urease akan mengkatalisis urea sehingga melepas ion karbonat, yang selanjutnya akan terikat dengan ion kalsium dari CaCl_2 dan mempresipitaskan Kalsium Karbonat/Kalsit (CaCO_3). Kalsit inilah yang mengikat partikel tanah satu sama lain. Sehingga presipitasi kalsium karbonat merupakan proses yang utama dalam teknik biogrouting. Teknik tersebut bekerja pada tingkat pori-pori yaitu memperbaiki kondisi tanah dengan meningkatkan kekuatan dan kekakuan (stiffness) serta sedikit mempengaruhi permeabilitas. Berikut reaksi / proses yang terjadi saat presipitasi kalsium karbonat oleh bakteri pada tanah.



Peran bakteri dalam menstabilkan tanah tersebut pada saat proses presipitasi kalsium karbonat, beberapa penelitian (Gusmawati, N.F dkk. 2009) menyebutkan bahwa presipitasi kalsium karbonat oleh bakteri diakibatkan oleh adanya aktiviras 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 bakteri dilakukan untuk mengetahui sifat pertumbuhan suatu jenis bakteri melalui kurva pertumbuhan yang ditandai dengan kekeruhan pada media cair dengan bantuan alat penggoyang (shaker) dan inkubator. Kultur mikrobiologi (*Culture*) adalah metode memperbanyak mikroba pada media kultur dengan pembiakan di laboratorium yang terkendali. Uji laju pertumbuhan bakteri dilakukan untuk mengetahui sifat pertumbuhan bakteri melalui kurva pertumbuhan bakteri. Media kultur biasanya terdiri dari bahan-bahan yang dapat mendukung pertumbuhan bakteri seperti nutrien dan garam, serta kondisi lingkungan yang optimal seperti suhu dan kelembaban yang sesuai. Kurva pertumbuhan bakteri dibuat untuk mengetahui fase pertumbuhan bakteri yaitu fase lag, eksponensial, stasioner, dan kematian (Sharma et al., 2021) yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva pertumbuhan bakteri. Kurva pertumbuhan bakteri

- Fase Lag (Penyesuaian)

Fase lag adalah fase penyesuaian bakteri dengan lingkungannya yang baru. Durasi berlangsungnya fase ini bervariasi dan ditentukan dari komposisi media, pH, suhu, aerasi, jumlah sel, dan sifat fisiologis. Ketika sel telah menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya, barulah sel mulai membelah hingga mencapai populasi maksimum. Fase itu kemudian dinamakan fase logaritma atau fase eksponensial.

- Fase Logaritma/Eksponensial

Fase logaritma atau eksponensial ditandai dengan periode pertumbuhan yang terbilang cepat. Setiap sel dalam populasi membelah menjadi dua. Derajat pertumbuhan bakteri pada fase ini sangat dipengaruhi oleh sifat genetik yang diturunkan. Derajat pertumbuhan juga dipengaruhi oleh kadar nutrisi dalam media, suhu inkubasi, kondisi pH, dan aerasi. Ketika populasi yang dihasilkan oleh derajat pertumbuhan sudah maksimum, akan terjadi keseimbangan antara jumlah sel mati dan jumlah sel hidup.

- Fase Stasioner

Fase ini terjadi ketika laju pertumbuhan bakteri sama dengan laju kematiannya, sehingga jumlah populasi organisme ini akan tetap. Keseimbangan ini terjadi karena adanya pengurangan derajat pembelahan sel akibat kadar nutrisi yang tidak cukup dan akumulasi produk yang beracun bagi sel sehingga mengganggu proses pembelahan. Fase stasioner kemudian dilanjutkan dengan fase kematian yang ditandai oleh peningkatan laju kematian yang melebihi laju pertumbuhan.

- Fase Kematian

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, fase kematian terjadi ketika laju kematian lebih tinggi dari laju pertumbuhan. Beberapa faktor yang memengaruhinya adalah suhu, kelembaban, cahaya, zat kimia, dan nutrisi.

II.9 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. Pada Tabel 7 dilampirkan beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian ini:

Tabel 7. Penelitian terdahulu terkait dengan topik penelitian

No	Author's name/year	Title and source	Research Results
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) 79:94 DOI: 10.1007/s12665-020-8840-9	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 cocok digunakan pada tanah berbutir kasar dan dapat meningkatkan kekuatan tekan tanah • 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

No	Author's name/year	Title and source	Research Results
.			<ul style="list-style-type: none"> • 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 μm. Selain itu distribusi ukuran partikel yang merata memberikan efek sementasi yang lebih baik • Teknologi grouting dapat 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)	<p style="text-align: center;">Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation Towards Tropical Organic Soil</p> <p style="text-align: center;">Advances in Civil Engineering and Science Technology AIP Conf. Proc. 2020, 020011-1–020011-5; https://doi.org/10.1063/1.5062637</p>	<p>Penerapan teknologi MICP pada tanah organik pada kawasan tropis</p> <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

No	Author's name/year	Title and source	Research Results
			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., 2019, 31(4): 04019025 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002660	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 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.	Influence of Key Environmental Conditions on	Bagaimana efek dari beberapa parameter lingkungan utama pada tanah yang dimediasi dengan MICP

No	Author's name/year	Title and source	Research Results
.	(2017)	Microbially Induced Cementation for Soil Stabilization Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Volume. 143 (1): 04016083. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001586 .	ureolitik, termasuk dampak konsentrasi urease, suhu, pembilasan air hujan, kontaminasi minyak, dan siklus pembekuanpencairan Hasil penelitian menunjukkan 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 Mukherjee, (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.