

SKRIPSI

**STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE MICP
TERHADAP PARAMETER GESER LANGSUNG**

Disusun dan diajukan oleh:

**ANDI AMMAR JULTIAR ALAM
D011 19 1009**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE MICP TERHADAP PARAMETER GESER LANGSUNG

Disusun dan diajukan oleh

ANDI AMMAR JULTIAR ALAM
D011 19 1009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 8 November 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc, Ph.D
NIP: 196007301986031003

Pembimbing Pendamping,



Ir. Sitti Hijraini Nur, ST, MT.
NIP: 197711212005012001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Andi Ammar Jultiar Alam
NIM : D011191009
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE MICP TERHADAP
PARAMETER GESER LANGSUNG}

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, 8 November 2023

Yang Menyatakan



Andi Ammar Jultiar Alam

ABSTRAK

ANDI AMMAR JULTIAR ALAM. *STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE MICP TERHADAP PARAMETER GESER LANGSUNG* (Dibimbing oleh Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc, Ph.D dan Ir. Sitti Hijraini Nur, ST, MT)

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki potensi kembang susut yang tinggi diakibatkan oleh perubahan kadar air, biasanya perubahan ini terjadi karena perubahan musim dari penghujan menuju musim kemarau dan kembali lagi ke musim kemarau. Penamilan serta karakter dari tanah ekspansif dapat dilihat oleh kasat mata dan uji laboratorium. Ketika terjadi musim kemarau maka tanah ekspansif akan terlihat menyusut dan mengalami keretakan, sementara pada musim penghujan karakter tanah ekspansif akan terlihat mengembang artinya dimensi atau volume tanahnya menjadi lebih besar dari biasanya. Tidak hanya dengan kasat mata, namun Tanah ekspansif ini memiliki kandungan mineral *montmorillonite*. Mineral *montmorillonite* ini pada tanah ekspansif sangat mempengaruhi kembang susut. Karena tanah ekspansif memiliki daya dukung yang rendah serta kuat geser tanah yang rendah, MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*), yaitu menginduksi tanah dengan mikroorganisme (bakteri) sehingga mampu untuk meningkatkan sifat mekanis tanah ekspansif tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui parameter fisis dan mekanis tanah yang digunakan, mengetahui pengaruh variasi komposisi tanah lanau plastisitas rendah, 70% tanah lempung ekspansif – 30% tanah lanau plastisitas rendah, 50% tanah lempung ekspansif – 50% tanah lanau plastisitas rendah, dan tanah lanau ekspansif terhadap parameter kuat geser langsung, mengetahui pengaruh variasi kultur bakteri dalam penelitian ini menggunakan kultur 3 hari dan 6 hari yang digunakan pada keempat jenis tanah di atas terhadap parameter kuat geser langsung, serta mengetahui variasi konsentrasi bakteri dalam penelitian ini konsentrasi yang digunakan yaitu 6% dan 8% terhadap keempat jenis tanah di atas, terhadap parameter geser langsung. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Hasanuddin. Hasil yang didapatkan adalah bahwa bakteri dengan kultur 3 hari memiliki kuat geser serta kohesi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan bakteri dengan kultur 6 hari, untuk kultur 6 hari bakteri yang optimum terdapat pada penambahan konsentrasi bakteri sebesar 8% untuk tanah lanau plastisitas rendah, dan tanah lempung ekspansif. Sementara untuk tanah campuran, penggunaan bakteri sebesar 6% merupakan penggunaan bakteri yang optimal.

Kata kunci : Tanah Lempung Ekspansif, *Microbially Induced Calcite Precipitation*, Kuat Geser Tanah

ABSTRACT

ANDI AMMAR JULTIAR ALAM. EXPANSIVE SOIL STABILIZATION USING THE MICP METHOD IN DIRECT SHIFTING PARAMETERS (supervised by Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc, Ph.D and Ir. Sitti Hijraini Nur, ST, MT)

Expansive clay soil is a soil that has a high shrinkage potential due to changes in water content, usually this change occurs due to seasonal changes from Rainy to dry season and back again to dry season. Impregnation and character of the expansive soil can be seen by the naked eye and laboratory tests. When the dry season occurs, the expansive soil will look shrinking and cracking, while in the rainy season the character of the expansive soil will look expanded meaning that the dimensions or volume of the soil becomes larger than usual. Not only with the naked eye, but this expansive soil contains the mineral montmorillonite. This montmorillonite Mineral in expansive soil greatly affects shrinkage flowers. Because the expansive soil has a low bearing capacity and low soil shear strength, MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), which induces soil with microorganisms (bacteria) so as to improve the mechanical properties of the expansive soil. This study aims to determine the physical and mechanical parameters of the soil used, determine the effect of variations in the composition of low plasticity silt soils, 70% of expansive clay soils – 30% of low plasticity silt soils, 50% of expansive clay soils – 50% low plasticity silt soil, and expansive silt soil to the parameters of direct shear strength, knowing the effect of bacterial culture variations in this study using 3 days and 6 days culture used in the four types of soil on the parameters of direct shear strength, and knowing the variation of bacterial concentration in this study the concentration used is 6% and 8% of the four types of soil above, to the parameters of direct shear. This research was conducted at the Laboratory of Soil Mechanics Hasanuddin University. The results obtained are that bacteria with 3-day culture have higher shear strength and cohesion compared to the use of bacteria with 6-day culture, for 6-day culture the optimum bacteria is in the addition of bacterial concentration of 8% for low plasticity silt soils, and expansive clay soils. While for mixed soil, the use of bacteria by 6% is the optimal use of bacteria.

Keywords : Expansive Clay Soil, Microbially Induced Calcite Precipitation, Soil Shear Strength

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
DAFTAR PERSAMAAN.....	xxi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xxii
KATA PENGANTAR.....	xxiii
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	 7
2.1 Definisi Tanah dan Klasifikasi Tanah.....	7
2.1.1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur.....	7
2.1.2. Klasifikasi Berdasarkan Pemakaian.....	9
2.2 Kadar Air.....	15
2.3 Berat Jenis.....	15
2.4 Analisa Ukuran Butiran.....	16
2.5 Batas-Batas Atterberg.....	20

2.5.1 Batas Cair atau Liquid Limit (LL).....	21
2.5.2 Batas Plastis (Plastic Limit).....	23
2.5.3 Batas Susut (Shrinkage Limit).....	24
2.6 Pemadatan Tanah (Kompaksi).....	24
2.7 Tanah Lempung Ekspansif.....	27
2.8 Bentonite	32
2.9 Stabilisasi Tanah	33
2.9.1 Tujuan Stabilisasi Tanah	34
2.9.2 Pemilihan Jenis Perbaikan Tanah	35
2.10 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	35
2.11 Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP).....	37
2.11.1 Mekanisme Presipitasi Kalsit.....	38
2.12 Kuat Geser Langsung (<i>Direct Shear</i>).....	39
2.13 Penelitian Terdahulu	41
 BAB III METODE PENELITIAN.....	 46
3.1 Lokasi Penelitian.....	46
3.2 Metode Pengumpulan Data.....	46
3.3 Kerangka Alir Penelitian.....	47
3.4 Material	49
3.4.1 Tanah	49
3.4.2 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	50
3.5 Peralatan Laboratorium.....	51
3.6 Standar Pengujian	52
3.7 Pengujian Karakteristik Tanah.....	53
3.8 Optimalisasi Bahan Stabilisator	54
3.9 Prosedur Pengujian Sampel	55
3.9.1 Uji Sifat Fisis	55
3.10 Proses Pembuatan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	59
3.11 Proses Pembuatan Benda Uji Direct Shear.....	60

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1 Karakteristik Sifat Fisis dan Mekanis Tanah dan Campuran.....	63
4.1.1 Karakteristik Sifat Fisis Tanah dan Campuran.....	63
4.1.2 Klasifikasi Tanah dan Campuran	68
4.1.3 Identifikasi Tanah Ekspansif	69
4.1.4 Karakteristik Sifat Mekanis Tanah	73
4.2 Karakteristik Hasil Pengujian Uji Geser Langsung Variasi Tanah Lanau Plastisitas Rendah, Tanah Campuran, dan Tanah Lempung Ekspansif Terstabilisasi Bacillus Subtilis	83
4.2.1 Variasi Tanah Lanau Plastisitas Rendah, Tanah Campuran, dan Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis Kultur 3 Hari	83
4.2.2 Variasi Tanah Lanau Plastisitas Rendah, Tanah Campuran, dan Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Penambahan Bakteri Bacillus Subtilis Kultur 6 Hari	102
4.3 Perbandingan Stabilisasi Bakteri Bacillus Subtilis Kultur 3 Hari dan 6 Hari....	118
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	127
5.1 Kesimpulan	127
5.2 Saran.....	128
DAFTAR PUSTAKA	130
LAMPIRAN.....	134

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO	11
Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS	14
Tabel 3. Berat Jenis Tanah (Specific Gravity)	15
Tabel 4. Ukuran Saringan dan Bukaan Saringan	16
Tabel 5. Hubungan antara mineral lempung dengan batas cair	23
Tabel 6. Nilai indeks plastisitas dan macam tanah	24
Tabel 7. Hubungan antara mineral lempung dengan indeks plastisitas	24
Tabel 8. Perbedaan pengujian pemadatan Standar dan Modified di Laboratorium	25
Tabel 9. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan	29
Tabel 10. Korelasi nilai fraksi lempung lolos saringan no. 200, LL, dan N uji SPT dengan tingkat pengembangan	29
Tabel 11. Hubungan nilai aktivitas dengan tingkat keaktifan	30
Tabel 12. Klasifikasi potensi pengembangan	31
Tabel 13. Penelitian terdahulu tentang bakteri Bacillus Subtilis	41
Tabel 14. Variasi Tanah Penelitian	49
Tabel 15. Alat yang digunakan dalam pengujian sifat fisis	51
Tabel 16. Alat yang digunakan dalam pengujian sifat mekanis	52
Tabel 17. Standar pengujian sifat fisis tanah	53
Tabel 18. Standar pengujian sifat mekanis tanah	53
Tabel 19. Jenis pengujian dan jumlah benda yang akan diuji	53
Tabel 20. Variasi presentasi komposisi bahan stabilisasi dengan variasi tanah ...	54
Tabel 21. Rekapitulasi hasil pengujian sifat fisis tanah dan campuran	63
Tabel 22. Klasifikasi tanah lempung ekspansif dan lanau PR serta tanah campuran berdasarkan USCS dan AASHTO	68
Tabel 23. Rekapitulasi hasil pengembangan bebas tiap tanah dan tanah campuran	70
Tabel 24. Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung dengan berbagai metode	70
Tabel 25. Rekapitulasi hasil identifikasi tanah ekspansif	72
Tabel 26. Rekapitulasi hasil pengujian Standard Proctor Test (Kompaksi)	73

Tabel 27. Hasil pengujian Direct Shear Test pada tanah sebelum dilakukan stabilisasi.....	76
Tabel 28. Rekapitulasi hasil pengujian karakteristik sifat fisis dan mekanis tanah lanau PR, campuran, dan tanah lempung ekspansif.....	82
Tabel 29. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada Tanah Lanau PR.....	83
Tabel 30. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lanau PR.....	84
Tabel 31. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lanau PR.....	84
Tabel 32. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah tiap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	86
Tabel 33. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	88
Tabel 34. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	88
Tabel 35. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	88
Tabel 36. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	91
Tabel 37. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	92
Tabel 38. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	93

Tabel 39. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	93
Tabel 40. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari pada masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	96
Tabel 41. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	98
Tabel 42. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	98
Tabel 43. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	98
Tabel 44. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	101
Tabel 45. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	103
Tabel 46. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari pada masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	105
Tabel 47. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7,14,28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	107
Tabel 48. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap variasi penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	109

Tabel 49. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7, 14, dan 28 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	111
Tabel 50. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari pada masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada tanah campuran 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	113
Tabel 51. Hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7, 14, dan 28 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	115
Tabel 52. Nilai Kohesi dan Sudut geser dalam tanah terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7,14, dan 28 hari pada tanah campuran 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	117
Tabel 53. Peningkatan Nilai Kohesi Tanah Terstabilisasi (Pemeraman 28 Hari) Terhadap Tanah Tanpa Terstabilisasi	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA).....	9
Gambar 2. Rentang Range dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.	11
Gambar 3. Grafik contoh gradasi butiran tanah.....	17
Gambar 4. Hydrometer yang tersuspensi dalam air yang disebarkan oleh tanah .	18
Gambar 5. Hydrometer ketika tanah mengendap.....	19
Gambar 6. Perbandingan Kadar Air dan Volume Tanah total terhadap Batas Susut, Batas Plastis, dan Batas Cair.	20
Gambar 7. Skema alat uji batas cair.....	22
Gambar 8. Kurva Aliran penentuan batas cair pada tanah.....	22
Gambar 9. Prinsip-prinsip pemadatan.....	26
Gambar 10. Grafik hubungan antara Presentase Tanah dan Aktivitas.....	30
Gambar 11. Bakteri Bacillus Subtilis dilihat dari Mikroskop.....	37
Gambar 12. Presipitasi Kalsit yang digerakkan oleh ureolisis.....	39
Gambar 13. Skema contoh tanah setelah tergeser.....	40
Gambar 14. Lokasi pengambilan sampel tanah	46
Gambar 15. Bagan Alir Penelitian	48
Gambar 16. Bakteri Bacillus Subtilis.....	51
Gambar 17. Alur pembuatan Bakteri Bacillus Subtilis.....	60
Gambar 18. Sampel yang sudah di cetak dan diberikan wrap	62
Gambar 19. Grafik gradasi ukuran butiran untuk Tanah Lanau Plastisitas Rendah	64
Gambar 20. Grafik gradasi ukuran butiran untuk Tanah Lempung Ekspansif	64
Gambar 21. Grafik gradasi ukuran butiran untuk Tanah Campuran 70% Tanah Lempung Ekspansif - 30% Tanah Lanau PR	65
Gambar 22. Grafik gradasi ukuran butiran untuk Tanah Campuran 50% Tanah Lempung Ekspansif - 50% Tanah Lanau PR	65
Gambar 23. Grafik batas cair untuk tanah lanau plastisitas rendah	66
Gambar 24. Grafik batas cair untuk tanah lempung ekspansif	66

Gambar 25. Grafik batas cair untuk tanah campuran 70% tanah lempung ekspansif – 30% tanah lanau PR	67
Gambar 26. Grafik batas cair untuk tanah campuran 50% Tanah lempung ekspansif – 50% Tanah lanau PR.....	67
Gambar 27. Grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi kering Tanah Lanau Plastisitas Rendah	74
Gambar 28. Grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi kering Tanah Lempung Ekspansif.....	75
Gambar 29. Grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi kering 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	75
Gambar 30. Grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi kering 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	76
Gambar 31. Grafik hubungan antara Normal Stress dan Shear Strength Pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	77
Gambar 32. Grafik hubungan antara Normal Stress dan Shear Strength Tanah Lempung Ekspansif.....	78
Gambar 33. Grafik hubungan antara Normal Stress dan Shear Strength 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	78
Gambar 34. Grafik hubungan antara Normal Stress dan Shear Strength 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	79
Gambar 35. Grafik hubungan antara Shear Deformation dengan Shear Stress Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	79
Gambar 36. Grafik hubungan antara Shear Deformation dengan Shear Stress Tanah Lempung Ekspansif.....	80
Gambar 37. Grafik hubungan antara Shear Deformation dengan Shear Stress 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	80
Gambar 38. Grafik hubungan antara Shear Deformation dengan Shear Stress 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	81
Gambar 39. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	84

Gambar 40. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	85
Gambar 41. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	85
Gambar 42. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	87
Gambar 43. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	87
Gambar 44. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	89
Gambar 45. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	89
Gambar 46. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	90
Gambar 47. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lempung Ekspansif	91
Gambar 48. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lempung Ekspansif	92
Gambar 49. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	94
Gambar 50. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	94
Gambar 51. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	95

Gambar 52. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR.....	96
Gambar 53. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR.....	97
Gambar 54. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	99
Gambar 55. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	99
Gambar 56. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	100
Gambar 57. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR.....	101
Gambar 58. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap presentase bakteri kultur 3 hari tiap masa pemeraman pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR.....	102
Gambar 59. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap Penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada tanah lanau plastisitas rendah	104
Gambar 60. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	104
Gambar 61. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	105
Gambar 62. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap bakteri 8% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	106

Gambar 63. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap bakteri 8% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	106
Gambar 64. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	107
Gambar 65. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	108
Gambar 66. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	108
Gambar 67. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lempung Ekspansif	109
Gambar 68. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri 8% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada Tanah Lempung Ekspansif	110
Gambar 69. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 70 % Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	111
Gambar 70. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 70 % Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	112
Gambar 71. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 70 % Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	112
Gambar 72. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada tanah campuran 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau PR	113
Gambar 73. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada tanah campuran 70% Tanah lempung ekspansif – 30% Tanah lanau PR.....	114

Gambar 74. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 7 hari pada 50 % Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	115
Gambar 75. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 14 hari pada 50 % Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	116
Gambar 76. Grafik hubungan tegangan normal dan kuat geser terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari pada 50 % Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	116
Gambar 77. Grafik perubahan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada tanah campuran 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR	117
Gambar 78. Grafik perubahan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri 6% kultur 6 hari tiap masa pemeraman pada tanah campuran 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau PR.....	118
Gambar 79. Rasio perbandingan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah.....	119
Gambar 80. Rasio perbandingan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada Tanah Lempung Ekspansif.....	119
Gambar 81. Rasio perbandingan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	120
Gambar 82. Rasio perbandingan nilai kohesi terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50% Tanah Lanau Plastisitas Rendah	121
Gambar 83. Rasio perbandingan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada Tanah Lanau Plastisitas Rendah	122
Gambar 84. Rasio perbandingan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada Tanah Lempung Ekspansif	123
Gambar 85. Rasio perbandingan nilai sudut geser dalam terhadap penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada tanah campuran 70% Tanah Lempung Ekspansif – 30 % Tanah Lanau PR.....	123

Gambar 86. Rasio perbandingan nilai sudut geser dalam terhadap variasi penambahan bakteri kultur 3 hari dan 6 hari pada tanah campuran 50% Tanah Lempung Ekspansif – 50 % Tanah Lanau PR	124
--	-----

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengujian Sifat Fisis Tanah	134
Lampiran 2. Data Pengujian Sifat Mekanis Tanah	143
Lampiran 3. Data Pengujian Sifat Mekanis (Direct Shear Test) Tanpa Bakteri	147
Lampiran 4. Data Pengujian Sifat Mekanis (Direct Shear Test) Terstabilisasi Bakteri Bacillus Sp Kultur 3 Hari	155
Lampiran 5. Data Pengujian Sifat Mekanis (Direct Shear Test) Terstabilisasi Bakteri Bacillus Sp Kultur 6 Hari	211
Lampiran 6. Dokumentasi Selama Penelitian	237

DAFTAR PERSAMAAN

Kadar Air (2.1).....	15
Kecepatan Pengendapan (2.2).....	19
Diameter Partikel Tanah (2.3).....	20
<i>Plasticity Index</i> (2.4).....	23
Berat Isi Kering Tanah (2.5).....	26
Berat Isi Tanah Jenuh (2.6).....	27
Aktivitas Tanah Cara Skempton (2.7).....	29
Aktivitas Tanah Cara Seed, WoodWard, Lundgren (2.8).....	30
<i>Swell Potential</i> Cara Seed, WoodWard, Lundgren (2.9).....	31
<i>Free Swell Index</i> (2.10).....	31
Tegangan Geser (2.11).....	40
Tegangan Geser Berdasarkan Coloumb (2.12).....	40

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Aktiviti
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
C	Persentase Fraksi Ukuran Lempung (%)
c	Kohesi (kN/m ²)
D	Diameter Partikel Tanah (mm)
G _s	Berat Jenis Tanah
γ_s	Berat Volume Butiran Tanah (gr/cm ³)
γ_w	Berat Volume Air (gr/cm ³)
γ_{dry}	Berat Volume Tanah Kering (gr/cm ³)
γ_{wet}	Berat Volume Tanah Basah (gr/cm ³)
K	Konstanta ($3,6 \times 10^{-5}$)
L	Panjang Efektif (cm)
LL	<i>Liquid Limit/Batas Cair</i> (%)
MICP	<i>Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation</i>
η	Kekentalan Air ($\frac{g.s}{cm^2}$)
PR	Plastisitas Rendah
PL	<i>Plastic Limit/Batas Plastis</i> (%)
PI	<i>Plasticity Index/Indeks Plastisitas</i> (%)
SL	<i>Shrinkage Limit/Batas Susut</i> (%)
SP	Swell Potential (%)
t	Waktu Pengendapan (min)
τ	Tegangan Geser (kN/m ²)
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
v	Kecepatan Pengendapan (cm/s)
w	Kadar Air (%)
σ	Tegangan Normal (kN/m ²)
ϕ	Sudut Geser Dalam (°)

KATA PENGANTAR

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

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

1. **Bapak Prof Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN.Eng.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc., PhD.**, selaku dosen pembimbing I dan **Ibu Ir. Sitti Hijraini Nur, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. **Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Geoteknik Lingkungan 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 **Ratu Alam** dan ibunda **Andi Sriyanti** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu.
2. Rekan-rekan di **Laboratorium Mekanika Tanah** yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.
3. Saudara-saudari **PORTLAND 2020**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2019** yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.
4. Teman-teman **KKD Geoteknik**, yang telah memberikan semangat serta saran dan masukan selama melakukan penelitian.
5. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan, dan dukungan hingga terselesainya skripsi ini.

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

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

Gowa, 8 November 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan lapisan dasar kulit bumi yang digunakan sebuah bangunan konstruksi baik itu Jalan, Jembatan, Gedung, Perumahan dan masih banyak lagi untuk dapat berdiri kokoh di atasnya. Beban konstruksi yang ada di atas tanah akan disalurkan ke dalam tanah sehingga, tanah akan menahan beban konstruksi tersebut. Tentunya daya dukung sangat berpengaruh pada jenis konstruksi apa yang hendak dibuat, dan jenis tanah apa yang bagus untuk dibangunkannya sebuah konstruksi.

Tanah memiliki karakteristik tersendiri, banyak konstruksi gagal atau mengalami kerusakan diakibatkan tidak melakukan identifikasi jenis tanah dan tidak memperhatikan permasalahan awal tanah tersebut. Sehingga, alangkah baiknya agar sebelum dilakukannya proses pembangunan konstruksi di atas tanah, parameter tanah seperti kuat geser tanah perlu diperhatikan dan jenis tanah tersebut harus diketahui.

Tanah lempung ekspansif memiliki permasalahan yang sering dihadapi di berbagai wilayah di Indonesia, hampir seluruh daerah di Indonesia memiliki tanah lempung ekspansif, tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki kemampuan kembang susut yang tinggi akibat adanya perubahan kadar air. Perubahan kadar air ini dipengaruhi oleh perubahan musim, dimana hal tersebut dapat menyebabkan tanah menjadi tidak stabil (Maulana & Hamdhan, 2016). Akibatnya tanah lempung ekspansif memiliki daya dukung rendah dan kuat geser tanah yang kurang memenuhi untuk dibangun sebuah konstruksi di atasnya, untuk dapat meningkatkan daya dukung dan kuat geser tanah pada tanah lempung ekspansif diperlukan stabilisasi tanah.

Stabilisasi tanah merupakan proses perbaikan tanah secara mekanis atau penambahan suatu material tanah secara kimiawi, guna memperbaiki sifat-sifat fisis tanah dan sifat mekanis tanah. Pada proses stabilisasi secara mekanis, umumnya menggunakan alat bantu seperti alat penumbuk dan penggetar,

sementara pada proses stabilisasi kimiawi, umumnya menambahkan *cement*, kapur, abu dan bakteri pada tanah. Namun penggunaan bahan kimia yang berlebihan akan menimbulkan masalah baru, seperti pencemaran dan kerusakan ekosistem di sekitar, sehingga tidak terjadi stabilisasi tanah yang bisa digunakan secara terus menerus (*unsustainable*). Maka dari itu perlu bahan kimia yang ramah lingkungan, sehingga bahan kimia tersebut dapat digunakan untuk stabilisasi tanah secara berkelanjutan (*sustainable*). Salah satunya menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dengan menggunakan metode MICP.

Metode MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) merupakan suatu metode yang melibatkan bakteri tanah dengan kemampuan hidrolisis *urease* sehingga dapat mengendapkan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai bahan perekat antar butir tanah untuk memperkuat struktur tanah itu sendiri. (Aswin, Muhammad, & Lestari, 2019). Dengan metode ini, tanah akan memiliki daya dukung yang tinggi dan meningkatkan kuat geser tanah. Selain menggunakan metode MICP, pada penelitian ini juga menggunakan Tanah Lempung Ekspansif (Bentonite) yang akan dicampurkan dengan tanah jenis kelas rendah (ML), sebagai rekayasa pembuatan tanah lempung ekspansif.

Bentonite merupakan lempung jenis *smektit*, yang komponen utamanya *montmorillonite* sehingga jika tercampur dengan air mengakibatkan pengembangan yang cukup tinggi. (M, Jumaeri, & Triastuti, 2019). Mineral *montmorillonite* merupakan mineral tinggi yang terdapat pada tanah lempung ekspansif.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “*STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE MICP TERHADAP PARAMETER GESER LANGSUNG.*”

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana parameter fisis dan mekanis tanah yang digunakan pada penelitian?

2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terhadap parameter kuat geser langsung tanpa terstabilisasi bakteri *Bacillus Subtilis*?
3. Bagaimana pengaruh variasi kultur bakteri *Bacillus subtilis* terhadap variasi komposisi tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terhadap parameter kuat geser langsung?
4. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi bakteri dengan masa pemeraman terhadap parameter kuat geser tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terstabilisasi *Bacillus Subtilis*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan Rumusan Masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui parameter fisis dan mekanis tanah yang digunakan pada penelitian.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terhadap parameter kuat geser langsung tanpa terstabilisasi bakteri *Bacillus Subtilis*.
3. Mengetahui pengaruh variasi kultur bakteri *Bacillus subtilis* terhadap Variasi komposisi tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terhadap parameter kuat geser langsung.
4. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi bakteri dengan masa pemeraman terhadap parameter kuat geser tanah lanau plastisitas rendah, tanah lempung ekspansif dicampur tanah lanau plastisitas rendah dan tanah lempung ekspansif terstabilisasi *Bacillus Subtilis*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan pada penilitan ini yaitu :

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

1.5 Batasan Masalah

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

1. Penelitian ini adalah penelitian skala laboratorium.
2. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lanau plastisitas rendah yang berlokasi di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan dan tanah lempung ekspansif.
3. pengujian dilakukan terhadap variasi campuran antara tanah lanau plastisitas rendah dengan tanah lempung ekspansif, variasi konsentrasi bakteri, variasi kultur bakteri, dan variasi pemeraman.
4. Penelitian ini hanya menguji sifat-sifat fisis tanah dan mekanis tanah, tidak meneliti unsur senyawa kimia yang ada di dalam tanah tersebut.
5. Sifat sifat fisis dan mekanis tanah yang diuji adalah:
 - a. Pengujian Berat Jenis
 - b. Pengujian Kadar Air
 - c. Pengujian Batas-Batas Atterberg
 - d. Pengujian Analisa Saringan dan Hidrometer
 - e. Pengujian Pemadatan (Kompaksi)
 - f. Pengujian *Direct Shear* (Uji Geser Langsung)

6. Sifat mekanis tanah dengan bahan tambah bakteri *Bacillus Subtilis* yang diuji adalah pengujian kuat geser langsung (*direct shear test*).
7. Presentase berat campuran yang digunakan adalah 100% Tanah Lanau Plastisitas Rendah, 70% Tanah Lempung Ekspansif - 30% Tanah Lanau PR, 50% Tanah Lempung Ekspansif - 50% Tanah Lanau PR, dan 100% Tanah Lempung Ekspansif.
8. Presentase konsentrasi bakteri yang digunakan dalam penelitian ini adalah 6% dan 8% terhadap berat tanah dengan kadar air mula-mula.
9. Kultur bakteri yang digunakan yaitu kultur 3 hari dan kultur 6 hari.
10. Waktu pemeraman setelah pencampuran tanah dengan bakteri *bacillus subtilis* adalah 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dengan kondisi di laboratorium.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah, sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga tugas akhir yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pokok-pokok bahasan dalam bab ini meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan teori-teori dan tinjauan umum yang digunakan untuk membahas dan menganalisa tentang permasalahan dari penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian kuat geser langsung (*direct shear test*).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Tanah dan Klasifikasi Tanah

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

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

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

2.1.1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur

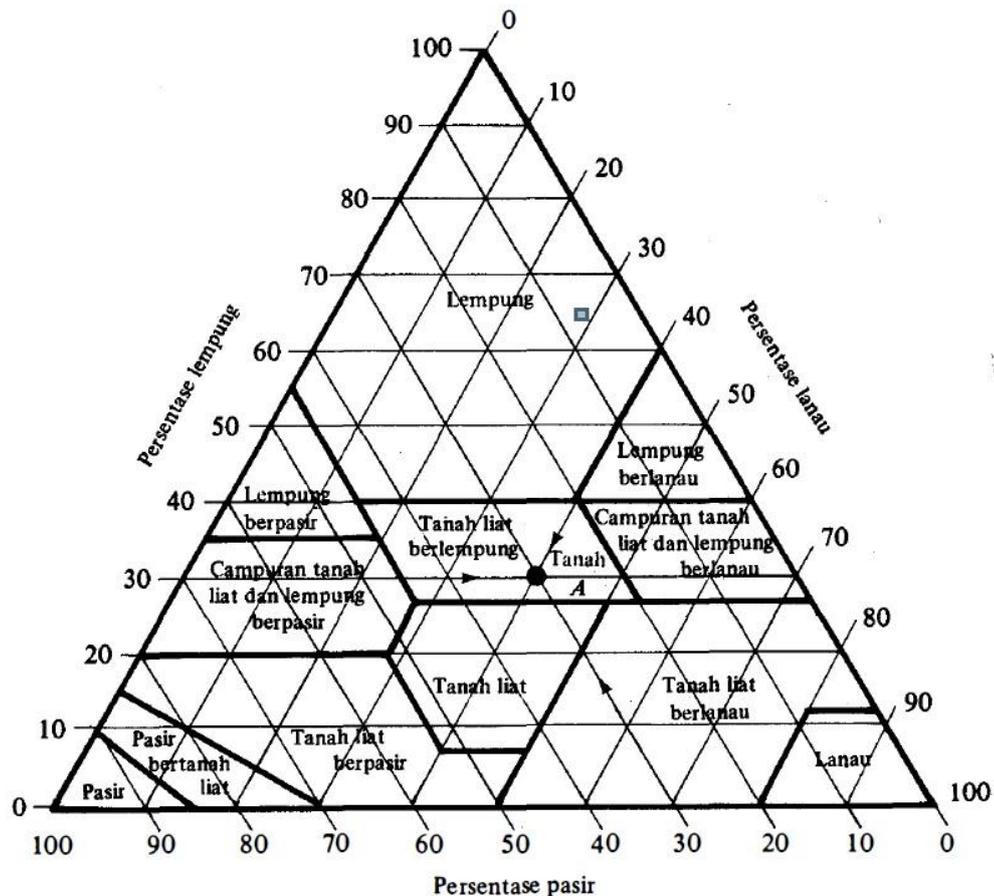
Tanah menurut Bowles (1991) adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari:

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

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

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

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



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

2.1.2. Klasifikasi Berdasarkan Pemakaian

Selain klasifikasi tanah dapat dilihat secara langsung lewat tekstur dan ukuran butiran, klasifikasi tanah dapat ditentukan dengan memperhitungkan sifat plastisitas tanah. Karena, jika hanya dilihat berdasarkan tekstur sistem tersebut dianggap tidak memadai untuk sebagian besar keperluan teknik. Untuk sekarang ada dua buah klasifikasi berdasarkan pemakaian yang selalu dipakai oleh ahli teknik sipil. Klasifikasi tersebut memerlukan perhitungan ukuran butir dan batas-batas Atterberg, dengan sistem yang digunakan adalah Sistem Klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation*

Officials) yang dipakai oleh departemen jalan raya di Amerika, dan Sistem Klasifikasi Unified umumnya lebih disukai oleh para ahli bidang geoteknik.

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

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

a) Ukuran Butir

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

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

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

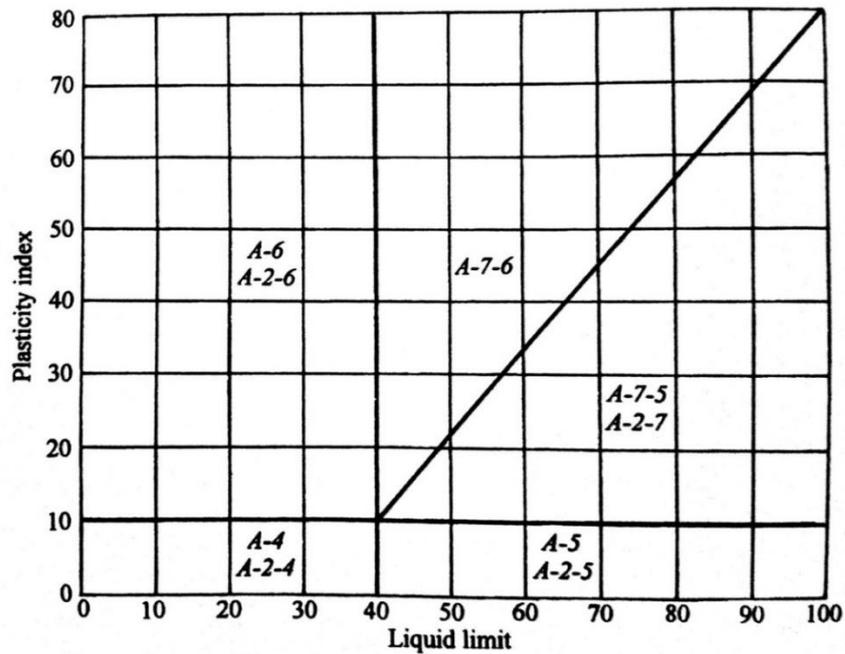
b) Plastisitas

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

c) Batuan (Ukuran ≥ 75 mm)

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

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



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

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO

Klasifikasi Umum	Material Granuler ($< 35\%$ lolos saringan no.200)						
	A-1		A-3	A-2			
Klasifikasi Kelompok	A-1 a	A-1 b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa Saringan (% lolos)							
2,00 mm (no.10)	50 maks	-	-	-	-	-	
0,425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	
0,075 mm (no.200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 Maks 35 maks	
Sifat Fraksi lolos saringan no. 40							
Batas Cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks 41 min	
Indeks Plastisitas (PI)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min 6 min	
Indeks Kelompok (G)	0		0	0		4 maks	
Tipe Material yang pokok pada umumnya	Pecahan Batu, kerikil dan pasir		Pasir Halus	Kerikil berlanau dan berlempung dan pasir			
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						

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

Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

Catatan:

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

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

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

N_p = Nonplastis

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

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

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

Lanau-organik dan lempung organik. Sementara untuk PT digunakan untuk tanah gambut (peat).

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi USCS yaitu:

W = Well Graded (tanah dengan gradasi yang baik)

P = Poorly Graded (tanah dengan gradasi yang buruk)

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

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

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

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

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

Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium		
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		
		Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			Kerikil banyak kandungan butiran halus	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung	
	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau		Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW
			Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	
		Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	<p>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol</p> <p>Batas Cair LL (%) Garis A : $PI = 0,73 (LL - 20)$</p>		
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays")			
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis			
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clays")			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _t	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488			

2.2 Kadar Air

Kadar Air adalah suatu perbandingan antara berat air yang ada di dalam tanah dengan berat tanah itu sendiri dalam keadaan kering, dan dinyatakan dalam persen (%). Menurut SNI 1965-2008, tentang cara uji kadar air tanah dan batuan di Laboratorium dinyatakan dalam Persamaan (2.1) di bawah ini:

$$w = \frac{w_1 - w_2 \text{ (Berat Air)}}{w_2 - w_3 \text{ (Berat Tanah Kering)}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Dimana:

w = Kadar Air (%)

w_1 = Berat Cawan + tanah basah (gram)

w_2 = Berat Cawan + tanah kering oven (gram)

w_3 = Berat Cawan (gram)

Pada pengujian kadar air hasil yang didapatkan tentunya akan berbeda di setiap masing-masing tanah tergantung dari berapa basah tanah yang hendak diuji.

2.3 Berat Jenis

Menurut (Hardiyatmo H. C., 2002) Berat Jenis tanah (G_s) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w). Artinya massa tanah kering yang mengisi ruangan di dalam lapisan tanah. Nilai berat jenis partikel tanah dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Berat Jenis Tanah (*Spesific Gravity*)

Jenis Tanah	Berat Jenis (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Organik	2,62 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,65
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

2.4 Analisa Ukuran Butiran

Analisa ukuran butiran bertujuan untuk mengetahui seberapa besar gradasi butiran yang terkandung di dalam tanah, dengan melakukan uji analisa butiran ini dapat mengetahui tingkat presentase baik itu *gravel*, *sand*, *silt*, dan *clay*, sehingga tanah yang diuji dapat diketahui masuk ke dalam klasifikasi jenis tanah yang seperti apa. Dalam SNI 3423-2008 tentang cara uji analisis ukuran butir tanah, terdapat 2 jenis cara analisa ukuran butir tanah yaitu:

1. Analisa saringan

Analisa saringan digunakan untuk butiran tanah dengan ukuran partikelnya lebih besar dari 0,075 mm, dengan menyusun saringan dari ukuran terbesar sampai dengan saringan ukuran terkecil No. 200 hingga PAN. Saringan yang digunakan umumnya terbuat dari kawat anyaman dengan bukaan persegi, Tabel 4 merupakan nomor saringan dan ukuran bukaan ayakan pada saringan.

Tabel 4. Ukuran Saringan dan Bukaan Saringan

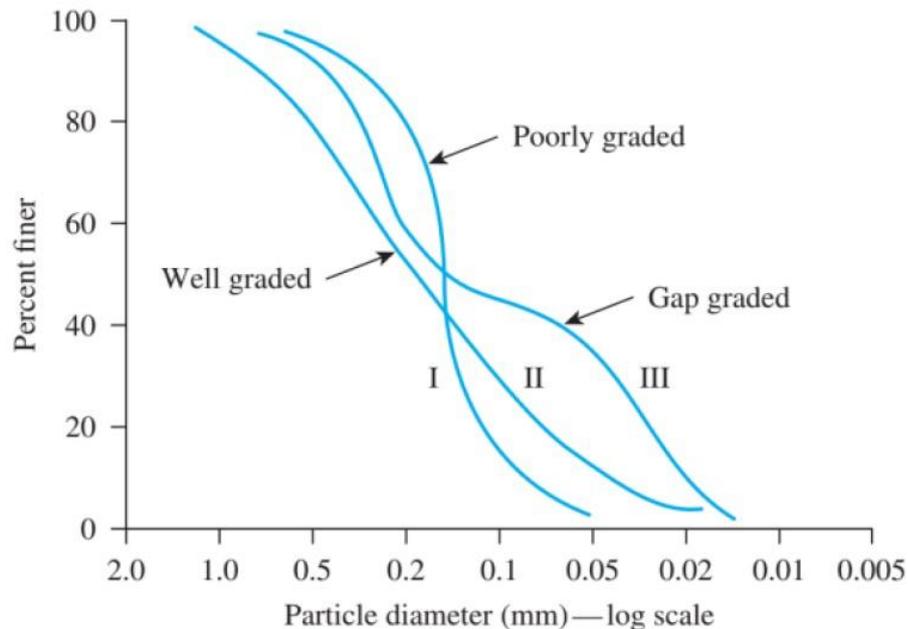
Sieve No.	Opening (mm)	Sieve No.	Opening (mm)
4	4.75	35	0.500
5	4.00	40	0.425
6	3.35	45	0.355
7	2.80	50	0.300
8	2.36	60	0.250
10	2.00	70	0.212
12	1.70	80	0.180
14	1.40	100	0.150
16	1.18	120	0.125
18	1.00	140	0.106
20	0.85	200	0.075
25	0.71	270	0.053
30	0.60	400	0.038

Sumber: (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002)

Pada umumnya satu set saringan yang sering digunakan dalam analisa saringan adalah saringan nomor 4,10,20,40,60,100,200, dan

PAN disusun dari atas hingga bawah, kemudian digetarkan dalam kurun waktu tertentu, lalu hasil dari getaran butiran tanah akan tertahan di masing-masing saringan yang nantinya masing-masing saringan tersebut akan ditimbang beratnya.

Hubungan antara ukuran butiran (mm) dalam skala log, dengan persen lolos butiran akan menghasilkan beberapa hasil gradasi diantaranya *Well Graded* (Gradasi Baik), *Poorly Graded* (Gradasi Buruk), *Gap Graded* (Grafik Seragam) yang di tampilkan dalam Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Grafik contoh gradasi butiran tanah

Sumber : (Das, Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), 1995)

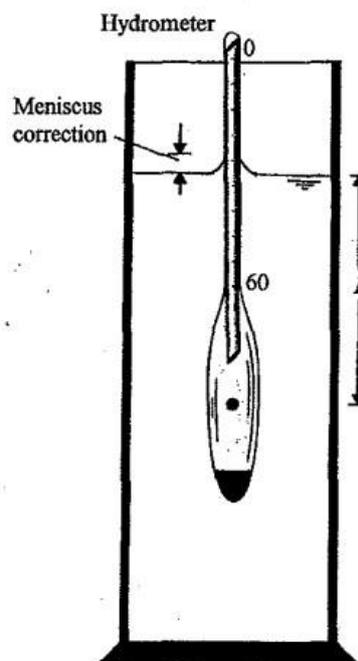
2. Analisa Hydrometer

Analisa Hydrometer digunakan untuk butiran tanah dengan ukuran partikel tanahnya kurang dari 0,075 mm, Menurut (Das, 1995) analisa hydrometer didasarkan pada prinsip sedimentasi (pengendapan) butiran tanah di dalam air. Jika suatu contoh tanah yang dilarutkan dalam cairan,

kecepatan mengendap partikel-partikel tanah akan berbeda-beda tergantung pada berat, bentuk dan ukurannya.

Menurut (Hardiyatmo H. C., 2002) Pada uji hydrometer, tanah benda uji harus dibebaskan dari zat organik, kemudian tanah dilarutkan ke dalam air yang dicampur dengan bahan pendeflokulasi (*deflocculating agent*) yang berupa *sodium hexametaphosphate* atau dikena dengan larutan Calgon, agar partikel-partikel menjadi bagian terpisah antara satu dengan yang lain.

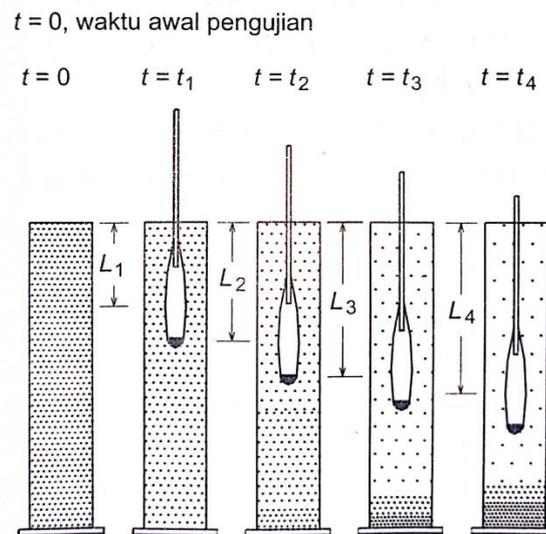
Jika sebuah hydrometer disuspensikan dalam air yang tanahnya terdispersi atau terlarut (Gambar 4), hydrometer tersebut akan tersuspensi dalam air mengukur berat jenis suspensi air tanah pada kedalaman L (Kedalaman Efektif). *Meniscus* adalah batas atas dari cekungan permukaan air dalam pipa. Pada umumnya, batas atas dari *meniscus* dijadikan sebagai patokan pada saat pengambilan bacaan selama *test*.



Gambar 4. Hydrometer yang tersuspensi dalam air yang disebarkan oleh tanah

Sumber : (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002)

Ketika Hydrometer dimasukkan ke dalam larutan suspensi (pada waktu t dihitung dari permulaan sedimentasi). Hydrometer ini mengukur berat jenis larutan di sekitar gelembung hydrometer yang berada pada kedalaman L . Ketika waktu pengujian hydrometer dimulai maka seiring bertambahnya waktu, maka partikel yang lebih besar akan mengendap di luar zona pengukuran dan kedalaman hydrometer juga akan semakin bertambah terlihat pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Hydrometer ketika tanah mengendap

Sumber: (Hardiyatmo H. C., 2002)

Analisa hydrometer dalam penentuan kecepatan pengendapan menggunakan Persamaan (2.2) dari Hukum *Stokes* yaitu:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2 \quad (2.2)$$

Dimana:

v	= kecepatan pengendapan	(cm/s)
γ_s	= berat volume partikel tanah	(g/cm ³)
γ_w	= berat volume air	(g/cm ³)
η	= kekentalan air	($\frac{g \cdot s}{cm^2}$)
D	= diameter partikel tanah	(mm)

Sementara untuk menentukan diameter butiran tanah yang terdispersi di dalam air menggunakan Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$D(mm) = \frac{10}{\sqrt{60}} \sqrt{\frac{18\eta}{(\gamma_s - \gamma_w)}} \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} = A \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} \quad (2.3)$$

Dimana:

D = diameter partikel tanah (mm)

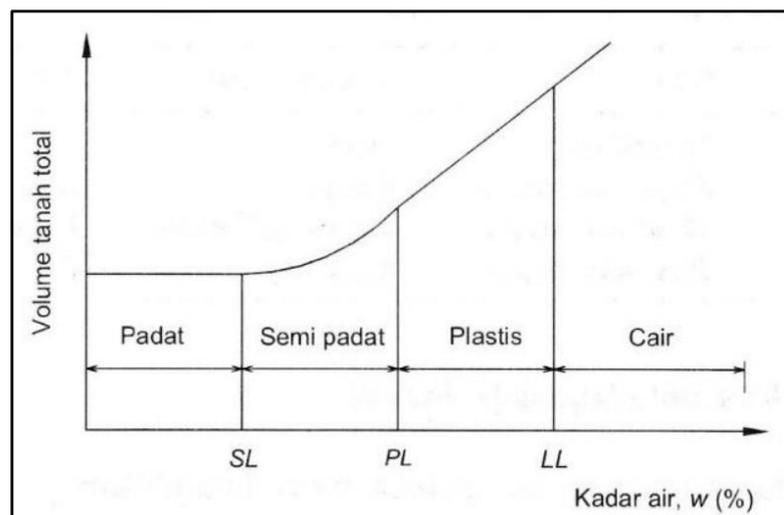
η = kekentalan air ($\frac{g.s}{cm^2}$)

L = Panjang Efektif (cm)

t = waktu pengendapan (min)

2.5 Batas-Batas Atterberg

Batas-batas Atterberg pertama kali diperkenalkan oleh seorang ahli kimia asal swedia Albert Atterberg untuk menentukan sifat atau jenis tanah berdasarkan konsistensi tanah, berupa batas cair (LL), batas plastis (PL), dan batas susut (SL). Menurut (Hardiyatmo H. C., 2002) kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi tanah, konsistensi bergantung pada gaya tarik antar partikel mineral lempung.



Gambar 6. Perbandingan Kadar Air dan Volume Tanah total terhadap Batas Susut, Batas Plastis, dan Batas Cair

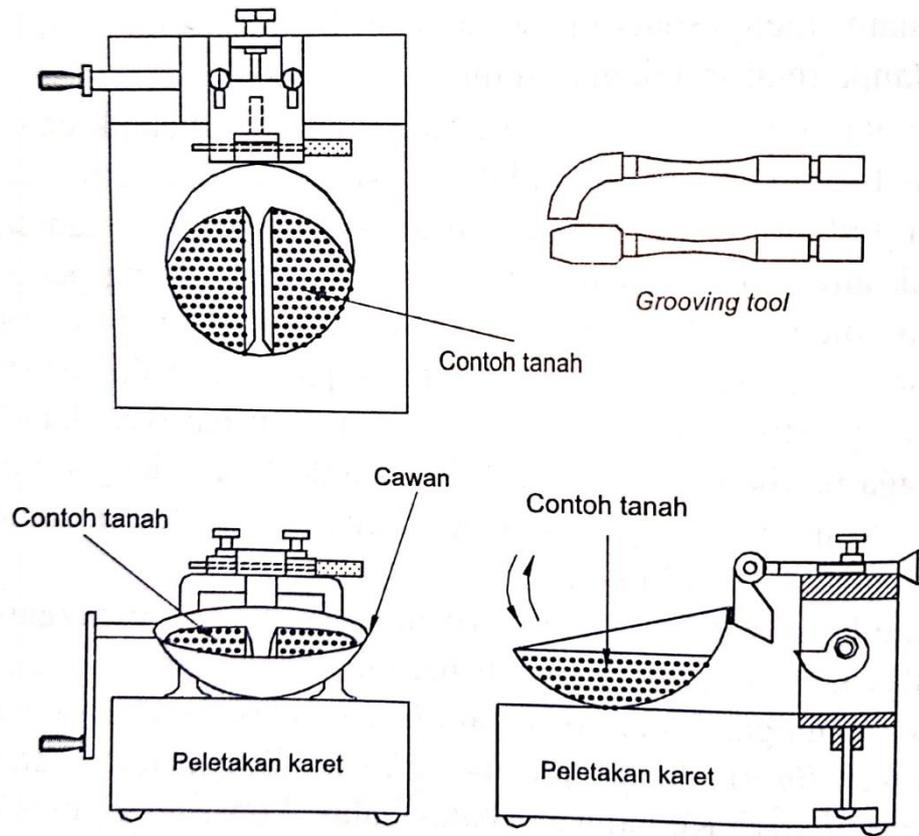
Sumber : (Yudhyantoro, Prayoga, & Maimunah, 2022).

Pada Gambar 6 di atas menunjukkan bahwa apabila tanah jika diberikan air maka akan melewati fase padat, semi padat, plastis, dan cair. Apabila kadar air yang diberikan berlebih akan menimbulkan sifat cair pada tanah dan tentunya volume tanah juga meningkat, sebaliknya, jika air yang diberikan pada tanah itu sedikit atau masih menempati posisi padat dan semi padat maka, volume tanah yang dihasilkan juga sedikit artinya, hubungan antara kadar air dengan volume tanah adalah berbanding lurus. Tidak hanya itu bisa dilihat bahwa kadar air dari liquid limit tidak boleh lebih kecil dari plastis limit, dan kadar air dari plastis limit tidak boleh lebih kecil dari *shrinkage* limit atau batas susut.

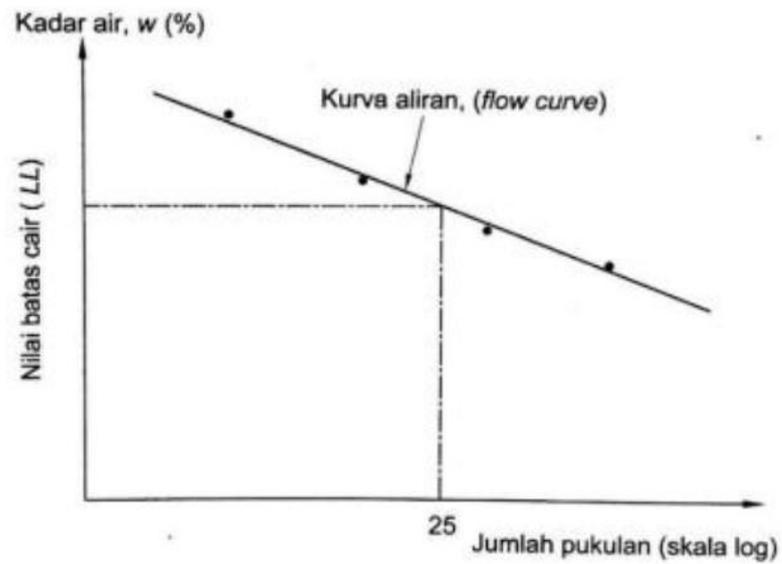
2.5.1 Batas Cair atau Liquid Limit (LL)

Batas cair (LL) adalah keadaan dimana kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair biasanya diuji dengan alat alat Casagrande yang dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah, contoh tanah yang dimasukkan ke dalam cawan kira-kira 8 mm. Alat pembuat alur (*Grooving tool*) dikerukkan di tengah-tengah cawan hingga menyentuh dasarnya. Kemudian, alat diketuk-ketukkan pada landasan dengan tinggi 1 cm. sesudah 25 kali pukulan, kadar air yang dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan didefinisikan sebagai batas cair tanah tersebut.

Karena sulit untuk menentukan kadar air yang dibutuhkan pada batas cair, maka penambahan kadar air pada tanah bisa diambil antara 15 sampai 35 kali pukulan yang artinya mendekati 25 kali pukulan. Kemudian hubungan antara kadar air dengan jumlah pukulan dihubungkan dengan grafik semi logaritmatik yang terdapat pada Gambar 8 di bawah.



Gambar 7. Skema alat uji batas cair
Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)



Gambar 8. Kurva Aliran penentuan batas cair pada tanah
Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

Batas cair suatu tanah juga bergantung pada jumlah dan jenis mineral lempung yang ada terdapat di dalamnya. Tabel 5 di bawah ini adalah kisaran perkiraan untuk batas cair beberapa mineral lempung.

Tabel 5. Hubungan antara mineral lempung dengan batas cair

Clay Mineral	LL (Liquid Limit)
Kaolinite	35-100
Illite	55-120
Montmorillonite	100-800

Sumber: (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002)

2.5.2 Batas Plastis (Plastic Limit)

Batas Plastis (PL) merupakan keadaan dimana kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, ketika tanah dengan diameter 3,2 mm silinder mulai retak apabila digulung.

Indeks plastisitas (PI) merupakan selisih antara batas cair dengan batas plastis seperti pada Persamaan (2.4), indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah.

$$PI = LL - PL \quad (2.4)$$

Keterangan:

PI = Indeks Plastis (%)

LL = Batas Cair (%)

PL = Plastis Limit (%)

Jika tanah memiliki PI yang cukup tinggi maka kategori tanah tersebut masuk ke dalam kategori tanah lempung, dan apabila tanah memiliki PI yang rendah maka kategori tanah tersebut adalah tanah lanau sampai pasir. Tabel 6 di bawah menunjukkan Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, macam tanah, dan kohesi yang diberikan oleh Atterberg. Sementara untuk Tabel 7 di bawah adalah kisaran perkiraan untuk indeks plastisitas beberapa mineral lempung.

Tabel 6. Nilai indeks plastisitas dan macam tanah

PI (Plasticity Index)	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas Rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
7 – 17	Plastisitas Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
> 7	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

Tabel 7. Hubungan antara mineral lempung dengan indeks plastisitas

Clay Mineral	PI (Plasticity Index)
Kaolinite	35-100
Illite	55-120
Montmorillonite	100-800

Sumber: (Das, Soil Mechanics Laboratory Manual, 2002)

2.5.3 Batas Susut (Shrinkage Limit)

Batas susut (SL) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat. Presentase pengurangan kadar air yang selanjutnya tidak mempengaruhi perubahan volume tanah.

Menurut (Hardiyatmo H. C., 2002) batas susut dilaksanakan di laboratorium dengan cawan porselin diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm. bagian cawan dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh, dan dikeringkan dalam oven, setelah keluar dari oven tanah akan mengalami penyusutan, tanpa mengurangi volume tanah. hanya kadar air yang berkurang. volume tanah yang menyusut ditentukan dengan menyelupkan air raksa.

2.6 Pemadatan Tanah (Kompaksi)

Pemadatan tanah adalah proses penggunaan alat dinamik agar tanah lebih padat dan mengeluarkan udara. Jadi, di dalam tanah semakin padat tanah tersebut, maka udara juga semakin menghilang dari tanah. Ada beberapa tujuan mengapa tanah harus dipadatkan, yaitu:

1. Mempertinggi kuat geser tanah,

2. Mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas),
3. Mengurangi sifat permeabilitas,
4. Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air.

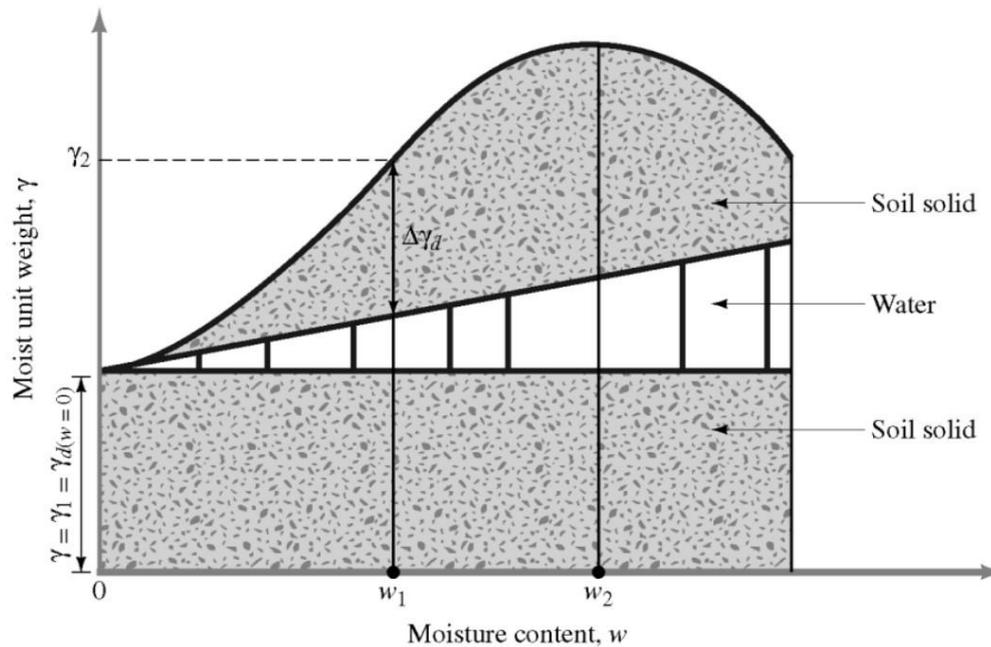
Proses pemadatan tanah tentunya bisa dilakukan di lapangan dan laboratorium. Pada pemadatan di lapangan biasanya menggunakan alat berat seperti pengguling roda baja berbentuk silinder, pengguling ban, dan pengguling kaki domba (*sheeps-foot roller*) dan sebagainya untuk tanah berbutir halus (kohesif). Sedangkan untuk tanah berbutir kasar (non kohesif) biasanya menggunakan alat penggetar, roda baja berbentuk silinder, dan alat penumbuk yang diajtuahkan dengan berat dan jatuh tinggi tertentu.

Pada pemadatan tanah di laboratorium, terdapat dua pengujian yang bisa dilakukan yaitu pemadatan ringan (*Standar Proctor*) dan pengujian pemadatan berat (*Modified or Heavy Proctor*) Perbedaan antara pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 8. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mould, collar (mulut mould), dan palu penumbuk. Tanah yang dimasukkan yaitu 1/3 kemudian dipadatkan, lalu dimasukkan kembali 2/3 sampai 3/3 volume mould untuk pengujian pemadatan dengan *standar proctor*.

Tabel 8. Perbedaan pengujian pemadatan Standar dan Modified di Laboratorium

Keterangan	<i>Standar Proctor</i>	<i>Modified Proctor</i>
Diameter silinder (cm)	10.5	10.5
Tinggi silinder (cm)	11.55	11.55
Volume silinder (cm ³)	944	1000
Jumlah lapisan tanah	3	5
Berat palu penumbuk (kg)	2.5	4.54
Tinggi jatuh palu (cm)	30,5	45,72
Jumlah pukulan setiap lapisan	25	25-27

Sumber : (Wesley, 2012)



Gambar 9. Prinsip-prinsip pemadatan
Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002)

Gambar 9 menjelaskan pada awal pemadatan, berat volume kering bertambah dengan penambahan kadar air, pada saat kadar air nol ($w = 0$), berat volume tanah basah (γ_{wet}) = berat volume tanah kering (γ_{dry}). Ketika kadar air ditambahkan dengan pemadatan yang sama maka, berat butiran tanah padat per satuan volume (γ_{dry}) juga bertambah. Misal pada kadar air w_1 , maka ($\gamma_{wet} = \gamma_{d2}$).

Pada saat kadar air bertambah lagi dan menimbulkan berat lebih besar dari pada w_1 yaitu w_2 (saat kadar air mencapai optimum), kenaikan kadar air akan menimbulkan pengurangan berat volume keringnya. Karena, air mengisi rongga pori yang sebelumnya diisi oleh butiran padat. Kadar air saat berat volume kering mencapai maksimum ($\gamma_{dry\ maks}$) disebut kadar air optimum (w_{opt}).

Hubungan berat volume kering (γ_{dry}) dengan berat volume basah (γ_{wet}) dan kadar air (w), dinyatakan dalam Persamaan (2.5):

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{wet}}{1+w} \quad (2.5)$$

Keterangan:

γ_d = berat isi tanah kering (gram/cm³)

γ_{wet} = berat isi tanah basah (gram/cm³)

w = kadar air (%)

berat volume kering maksimum dinyatakan sebagai berat volume kering dengan tanpa rongga udara atau berat volume tanah jenuh (γ_{zav}), dapat dihitung dengan Persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$\gamma_{zav} = \frac{Gs \cdot \gamma_{wet}}{1 + wGs} \quad (2.6)$$

Keterangan:

γ_{zav} = berat volume tanah jenuh (gram/cm³)

γ_{wet} = berat isi tanah basah (gram/cm³)

w = kadar air (%)

Gs = berat jenis tanah.

2.7 Tanah Lempung Ekspansif

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

Istilah untuk tanah ekspansif dan potensi pengembangan (*swelling potential*) digunakan untuk menunjukkan tanah yang mudah mengalami kembang-susut tersebut. Tanah lempung adalah tanah yang mudah berubah volumenya, terutama yang mengandung mineral *montmorillonite* (Hardiyatmo, 2017).

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

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

1. Visual

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

2. Identifikasi tidak langsung

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

a) Cara Chen (1975)

Beberapa cara dalam melakukan identifikasi tanah ekspansif, ada dua cara yang dikemukakan Chen, yaitu: cara pertama, Chen menggunakan indeks tunggal yaitu *Plasticity Index* (PI) dan cara kedua yaitu menggunakan korelasi antara fraksi lempung lolos saringan no. 200, batas cair (LL), dan nilai N dari hasil uji Standard Penetration Test (SPT) di lapangan.

Tabel 9 di bawah menunjukkan hubungan antara nilai PI dengan potensi pengembangan yang dibagi menjadi 4 bagian, yaitu: potensi pengembangan rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Tanah ekspansif dengan tingkat sangat tinggi yaitu nilai plasticity index > 55%, dan Tabel 10 di bawah menunjukkan korelasi antara nilai fraksi lempung lolos saringan no 200, *Liquid Limit* (LL), N hasil uji SPT (*Standard Penetration Test*) dan tingkat pengembangan yang dibagi menjadi 4 bagian.

Tabel 9. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan

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

Sumber : (Chen, 1975).

Tabel 10. Korelasi nilai fraksi lempung lolos saringan no. 200, LL, dan N uji SPT dengan tingkat pengembangan

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

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

b) Cara Skempton (1953)

Identifikasi lempung ekspansif juga sering dilakukan dengan memperhatikan nilai aktivitasnya, Skempton (1953) mendefinisikan nilai *activity* (A) dengan Persamaan (2.7):

$$A = \frac{PI}{C} \quad (2.7)$$

dimana,

A = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

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

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

Tabel 11. Hubungan nilai aktivitas dengan tingkat keaktifan

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

Sumber : (Skempton, 1953)

c) Cara Seed, Woodward, dan Lundgren

Cara ini menggunakan Persamaan (2.8) activity dari skempton yang dikembangkan menjadi:

$$A = \frac{PI}{C-10} \quad (2.8)$$

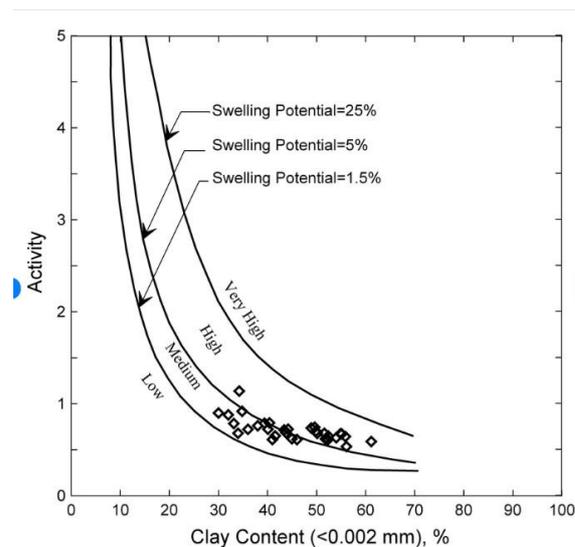
dimana,

A = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

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

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



Gambar 10. Grafik hubungan antara Presentase Tanah dan Aktivitas
Sumber : (Chen, 1975).

Seed, Woodward, dan Lundgren juga mengusulkan hubungan empiris yang lain antara potensi pengembangan dan indeks plastisitas tanah, dengan Persamaan (2.9). Pada Tabel 12 di bawah menunjukkan hubungan antara derajat pengembangan dan potensi pengembangan apabila lebih besar dari 25%, maka derajat pengembangan masuk ke dalam kategori sangat tinggi.

$$SP = 60 K (PI)^{2,44} \quad (2.9)$$

Keterangan,

SP = Swell potential (%)

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

PI = Plasticity indeks (%)

Tabel 12. Klasifikasi potensi pengembangan

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

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

Pengembangan bebas bisa didapatkan menggunakan Persamaan (2.10) berdasarkan Indian *Standard* (IS : 2720 (Part 40) – 1997) yaitu:

$$\text{Free Swell Index, percent} = \frac{Vd - Vk}{Vk} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan,

Vd = Volume contoh tanah yang dibaca dari gelas ukur berisi air suling (ml)

Vk = Volume contoh tanah yang dibaca dari gelas ukur berisi minyak tanah (ml)

3. Identifikasi langsung

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

4. Identifikasi mineralogi

Komposisi mineralogi tanah ekspansif memiliki pengaruh penting pada pembengkakan potensi tanah lempung. Muatan listrik negatif pada permukaan mineral lempung, kekuatan ikatan antar lapisan, dan kapasitas tukar kation semua berpotensi pada pembengkakan tanah lempung. Beberapa cara identifikasi mineralogi dikembangkan dalam penelitian laboratorium untuk menyelidiki sifat-sifat lempung. Chen (1975) membagi penyelidikan ke dalam lima teknik yaitu:

- a) Difraksi sinar x (*x-ray diffraction*),
- b) Analisis beda suhu (*differential thermal analysis*),
- c) Serapan pewarna (*dye absorption*),
- d) Analisis kimia (*chemical analysis*),
- e) Resolusi mikroskop elektron (*electron microscope resolution*).

Beberapa metode di atas biasanya digunakan dalam kombinasi. Menggunakan kombinasi dari metode-metode tersebut, berbagai jenis mineral lempung yang ada di dalam tanah dapat terjadi dan dievaluasi secara kuantitatif (Chen, 1975).

2.8 Bentonite

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

- a) Berkilap lilin umumnya lunak, plastis dan sarang.
- b) Berwarna pucat dengan kenampakan putih, hijau muda jika segar, berwarna krem bila lapuk.
- c) Bila diraba terasa licin seperti sabun.
- d) Bila dimasukkan ke dalam air akan menghisap air sedikit atau banyak.

- e) Bila terkena hujan singkapan bentonite berubah menjadi bubur dan bila kering akan menimbulkan rekahan yang nyata.

Bentonite memiliki beragam manfaat dalam kehidupan sehari-hari yaitu,

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

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

1. Bila laju aliran air lebih cepat dibanding dengan dengan peralutan yang terjadi maka akan terbentuk *gibsit*.
2. Bila laju aliran makin rendah dibanding dengan peralutan yang terjadi maka akan terbentuk *kaolinit*.
3. Bila laju aliran hampir berhenti, suatu reaksi akan terjadi antara kation dengan $AL(OH)_3$ dan silika membentuk *montmorillonite*.

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

2.9 Stabilisasi Tanah

Menurut Nugroho (2008), Stabilisasi tanah adalah usaha untuk memperbaiki sifat-sifat tanah asli agar tanah tersebut sesuai atau memenuhi syarat untuk dipergunakan sesuai fungsinya.

Menurut Winterkorn (1991), stabilisasi tanah adalah istilah untuk metode fisik, kimia, atau biologi yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat tertentu dari tanah agar dapat sesuai dengan tujuan rekayasa yang tepat.

Terdapat dua tujuan dari stabilisasi tanah yaitu, meningkatkan berbagai jenis kapasitas tanah untuk kebutuhan perekayasa konstruksi dan untuk memelihara atau mempertahankan kapasitas tanah yang sudah ada sebelumnya, baik dari luar (*external effect*) ataupun dari dalam (*internal effect*).

Stabilisasi tanah umumnya dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Stabilisasi tanah melalui teknik perbaikan tanah (*Soil Improvement*), yaitu memperbaiki atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan, dengan menggunakan bahan *additive* (kimiawi), pencampuran tanah (*re-gradation*), pengeringan tanah (*dewatering*) atau melalui penyaluran energi baik statis maupun dinamis ke dalam lapisan tanah (fisik).
2. Stabilisasi tanah melalui teknik perkuatan tanah (*Soil Reinforcement*), yaitu memperbaiki atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan, dengan memberikan material sisipan ke dalam lapisan tanah tersebut.

Ditinjau dari pelaksanaan stabilisasi tanah, stabilisasi tanah dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Stabilisasi Kimia, yaitu menambahkan bahan kimia tertentu dengan material tanah, sehingga terjadi reaksi kimia antara tanah dengan bahan pencampuran, diharapkan akan menghasilkan material baru.
2. Stabilisasi Fisik, yaitu mengenakan energi dari beban dinamis atau beban statis ke dalam lapisan tanah, sehingga terjadi perubahan baru dalam massa tanah.
3. Stabilisasi Mekanis, yaitu stabilisasi dengan memasukkan material sisipan ke dalam lapisan tanah sehingga diharapkan mampu meningkatkan karakteristik teknis tanah. contohnya seperti menggunakan *metal strip*, *geotextile woven* maupun *non-woven*, *geogrid*, *vertical drain*, dan lain-lain.

2.9.1 Tujuan Stabilisasi Tanah

Adapun tujuan dilakukannya stabilisasi tanah yaitu:

1. Meningkatkan daya dukung tanah.
2. Meningkatkan kuat geser tanah.
3. Memperkecil kompresibilitas dan penurunan tanah.
4. Memperkecil permeabilitas tanah.
5. Memperkecil potensi kembang-susut pada tanah.
6. Menjamin kelestarian dan sumber daya alam.

2.9.2 Pemilihan Jenis Perbaikan Tanah

Dari sekian penjelasan mengenai jenis-jenis metode stabilisasi tanah, tentunya memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam memilih jenis dan tipe perbaikan tanah yang akan diterapkan dalam setiap Tindakan perbaikan tanah, yaitu:

1. Jenis dan karakteristik tanah, termasuk sifat-sifat kimia dan fisik tanah
2. Jenis dan karakteristik konstruksi yang akan dibangun, terutama beban konstruksi.
3. Parameter tanah yang perlu diperbaiki, sesuai kebutuhan konstruksi.
4. Kedalaman lapisan tanah yang akan diperbaiki.
5. Sifat kimia dan sifat fisik dari bahan *stabilizer* yang akan digunakan.
6. Harga dan bahan *stabilizer* yang akan digunakan, tentunya dikaitkan dengan biaya efisiensi perbaikan.
7. Ketersediaan bahan dan peralatan di lokasi tanah yang hendak diperbaiki.
8. Kondisi lingkungan di sekitarnya (*existing environmental*).

2.10 Bakteri *Bacillus Subtilis*

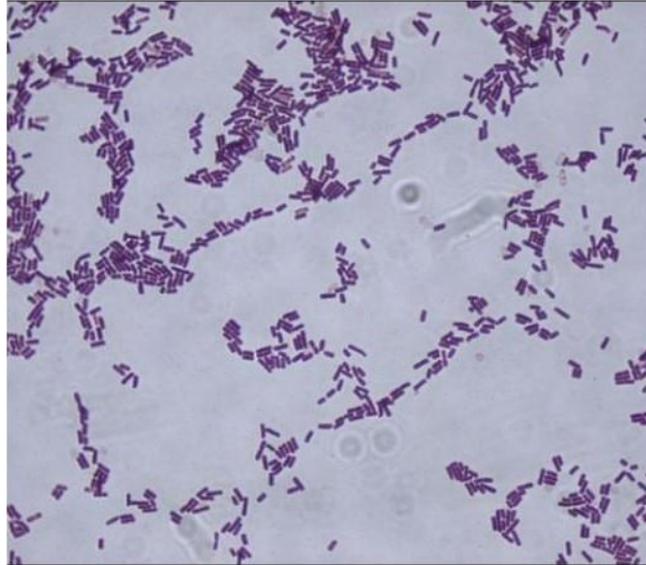
Bakteri *Bacillus Subtilis* adalah bakteri tidak *pathogen* (tidak memiliki sifat yang menyebabkan penyakit pada manusia, hewan dan tumbuhan) yang dapat diisolasi dari tanah dan menghasilkan antibakteri yang mampu menghambat bakteri gram negatif dan gram positif (Awais, Pervez, Yaqub, & Shah, 2010).

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

Menurut Antoni (2019), *Bacillus Subtilis* merupakan bakteri gram positif yang dapat membentuk endospora (sebuah fase yang dilakukan oleh bakteri, untuk memproduksi bentuk pertahanan hidup pada kondisi yang tidak menguntungkan), berbentuk oval dibagian sentra sel. Klasifikasi *Bacillus sp.* Sebagai berikut:

Kingdom : Procaryotae
Divisi : Bacteria
Class : Schizomyceter
Bangsa : Eubacteriales
Familia : Bacillaceae
Genus : *Bacillus*
Species : *Bacillus sp.*

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



Gambar 11. Bakteri *Bacillus Subtilis* dilihat dari Mikroskop
 Sumber : (Hussein, 2019)

2.11 Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)

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

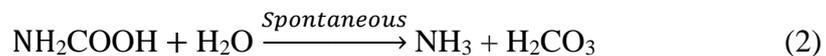
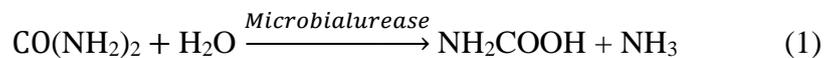
Pada contoh mineralisasi yang dikendalikan secara biologis dijelaskan oleh Barabesi (2007) yang menunjukkan bahwa, mineralisasi CaCO_3 dicapai secara molekuler menggunakan *Bacillus subtilis* (Mujah, Shahin, & Cheng, 2016).

Dalam ilmu geoteknik, *grouting* kimia (*Chemical Grouting*), adalah perbaikan tanah yang paling umum digunakan oleh banyak orang. Namun, teknik ini sering kali menjadi penghambat karena alasannya yang mahal dan membutuhkan banyak sumur injeksi untuk mengolah volume yang besar. *Grouting* kimia secara menerus dapat mengurangi permeabilitas tanah yang dirawat, meningkatkan pH air tanah ke tingkat yang sangat basa, sehingga membuat masalah

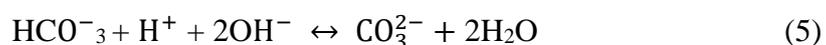
serius pada lingkungan. Oleh karena itu, MICP atau biosementasi hadir, dengan alternatif baru teknologi perbaikan tanah yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, presipitasi kalsit yang diinduksi secara mikroba.

2.11.1 Mekanisme Presipitasi Kalsit

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

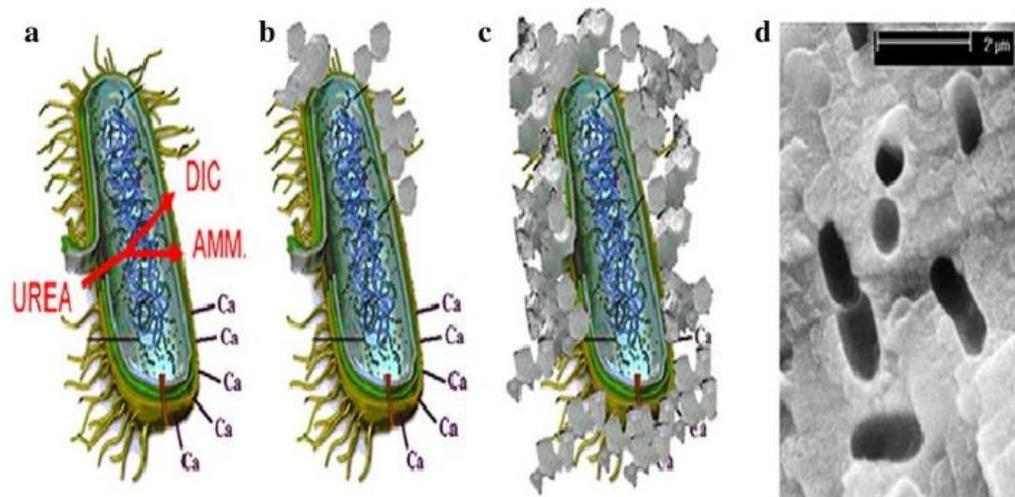


Kedua produk ini NH_3 dan H_2CO_3 selanjutnya diseimbangkan dalam air membentuk bikarbonat (Persamaan 3) dan dua mol ammonium dan dua mol ion hidroksida (Persamaan 4). Ion hidroksida menghasilkan peningkatan pH, yang dapat menggeser kesetimbangan bikarbonat, menghasilkan pembentukan ion karbonat (Persamaan 5). Pergeseran ini kemudian bisa mengendapkan ion logam.



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





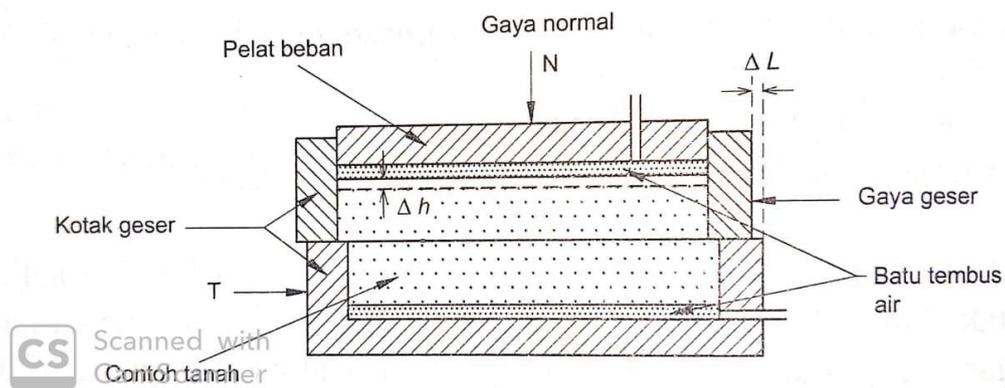
Gambar 12. Presipitasi Kalsit yang digerakkan oleh ureolisis
 Sumber : (Anbu, Kang, & Jae-Seong So, 2016).

2.12 Kuat Geser Langsung (*Direct Shear*)

Dalam perencanaan geoteknik, seperti analisa daya dukung tanah, tegangan dinding penahan tanah, dan kestabilan lereng (*slope stability*) digunakan parameter kuat geser tanah. Menurut Hardiyatmo (2002), kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh:

1. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
2. Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya.

Pengujian geser langsung merupakan pengujian untuk mengetahui nilai kohesi dan sudut geser dalam pada tanah. Pengujian geser langsung menggunakan kotak geser yang terpisah menjadi 2 bagian yang sama, tegangan normal pada benda uji diberikan dari atas kotak geser, untuk memberikan geseran pada tengah-tengah benda uji, tetapi pengaruhnya sangat kecil, hingga dapat diabaikan. (Hardiyatmo H. C., 2002).



Gambar 13. Skema contoh tanah setelah tergeser
 Sumber : (Hardiyatmo H. C., 2002).

Hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya, dinyatakan pada Persamaan (2.11):

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.11)$$

dengan τ adalah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan, dan σ adalah tegangan normal yang terjadi saat kondisi tersebut. Coloumb (1776) mendefinisikan $f(\sigma)$ dengan Persamaan (2.12):

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.12)$$

Keterangan:

τ = tegangan geser (kN/m^2),

c = kohesi tanah (kN/m^2),

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2),

φ = sudut geser dalam tanah ($^\circ$).

2.13 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai stabilisasi tanah dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* yang telah dilakukan, disajikan dalam Tabel 13 di bawah.

Tabel 13. Penelitian terdahulu tentang bakteri *Bacillus Subtilis*

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
Muhammad Saleh Nasution, Yusep Muslih Purwana, dan Bambang Setiawan	Penurunan Permeabilitas Dan Peningkatan Kuat Geser Tanah Lanau Menggunakan Pengaruh Mikrobakteri <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Pseudomonas SP</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mekanis tanah yang telah distabilisasi bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Pseudomonas sp</i> dengan waktu pemeraman 15 hari dan 30 hari serta membandingkan nilai koefisien permeabilitas dan kuat geser tanah asli tanpa bakteri dan tanah yang telah dicampur bakteri. Hasilnya kuat geser tanah lanau dengan campuran bakteri pada waktu pemeraman 15 hari mengalami peningkatan sebesar 38.37 % dan 34.88 % dibandingkan dengan hasil uji tanah lanau tanpa bakteri, sedangkan pada pemeraman 30 hari kuat geser meningkat sebesar 48.88 % dan 59.30 %. Hasil pengujian permeabilitas dengan konsentrasi <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Pseudomonas sp</i> yaitu $1,34 \times 10^{-9}$ m/dt. Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> lebih menguntungkan dibanding dengan <i>pseudomonas sp. Bacillus subtilis</i> lebih efektif dalam	e-Jurnal Matriks Teknik Sipil, Desember 2017, pages 1- 8

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		mengisi rongga dan merekatkan antar partikel tanah hal ini didasari sifat koloni yang berkelompok dan bukan menyebar seperti <i>Pseudomonas sp.</i>	
Angelina Lynda	Karakteristik Kuat Geser Tanah Dengan Metode Stabilisasi Biogrouting Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil stabilisasi tanah yang optimum dengan metode biogrouting yang dimaksud pada penelitian ini, yaitu ketika nilai parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) yang diperoleh merupakan nilai terbesar dari semua perbandingan pencampuran sampel tanah dengan bakteri untuk waktu pemeraman selama 28 hari. Variasi presentase larutan sementasi dan larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> yaitu tanah pasir berlempung + 0 cc larutan sementasi + 0 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> . Tanah pasir berlempung + 2 cc larutan sementasi + 2 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> . Tanah pasir berlempung + 4 cc larutan sementasi + 4 cc larutan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> . Hasil stabilisasi biogrouting bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> yang optimum diperoleh pada sampel tanah dengan 3x injeksi (6cc larutan bakteri dan 6cc larutan	Tugas Akhir Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, 2013

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>sementasi). Dimana nilai kohesi yang diperoleh sebesar 1,192 kg/cm² dan nilai sudut geser dalam sebesar 35.07°. karakteristik mekanis tanah yang mengalami stabilisasi optimum mengalami perubahan parameter kuat gesernya yaitu, terjadi peningkatan nilai kohesi sebesar 297% terhadap nilai kohesi sampel tanah asli. Terjadi peningkatan nilai sudut geser dalam sebesar 6,86% terhadap nilai sudut geser dalam tanah asli.</p>	
<p>Andi Mariani Indriani, dan Gunaedy Utomo</p>	<p>Pengaruh <i>Microbially Induced Calcite Precipitation</i> (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara</p>	<p>Tujuan penelitian ini untuk mengetahui besarnya kohesi dan kuat geser tanah dengan variasi I 95% pasir dan 5% Batubara, variasi II 90% pasir dan 10% Batubara, variasi III 85% pasir dan 15% Batubara. Hasil yang didapatkan dari pengujian Direct Shear pada tanah variasi I menunjukkan terjadi peningkatan nilai kohesi dan nilai sudut geser dalam. Setelah pemeraman 28 hari terjadi peningkatan nilai kohesi dai 17 kPa menjadi 34 kPa sedangkan nilai sudut geser dalam semakin besar dari 31° menjadi 41°. Setelah parameter kohesi dan sudut geser dalam dimasukkan dalam persamaan kuat geser</p>	<p>Journal of Civil Engineering and Vocational Education, Vol 10, Maret 2023, pages 53-60</p>

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		<p>diperoleh nilai kuat geser sebesar 59 kPa atau meningkat 3 kali dibandingkan nilai kuat geser tanah yang tidak distabilisasi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> memberikan efek yang baik terhadap peningkatan nilai kuat geser tanah. Pada tanah terkontaminasi 10% dan 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser masing-masing sebesar 7 kali dan 15 kali dibandingkan tanah yang tidak di stabilisasi.</p>	
<p>Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, dan Tri Harianto</p>	<p><i>A Study on Clay Soil Improvement with Bacillus Subtilis Bacteria as The Road Subbase Layer</i></p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daya dukung tanah lempung dengan plastisitas tinggi yang terstabilisasi bakteri (<i>Bacillus Subtilis</i>). Untuk bakteri yang digunakan adalah bakteri dengan usia kultur 6 hari. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk pengujian California Bearing Ratio (CBR) dan Uji Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compressive Strength) dengan penambahan 2%, 4%, dan 6% menunjukkan bahwa nilai kuat tekan cenderung meningkat dan menurun pada penambahan 8% bakteri. Kurva kuat tekan</p>	<p>International Journal of Geomate, Vol 15, December 2018, pages 114-120</p>

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
		juga mengalami kenaikan seiring dengan waktu pemeraman yaitu 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan bakteri <i>Bacillus Subtilis</i> sebagai bahan stabilisasi meningkatkan daya dukung tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Daya dukung (Unconfined Compressive Strength = 382 kN/m ² dan nilai CBR = 72,33%) menurun pada penggunaan bakteri melebihi 6%	