

D. Material	40
E. Standar Pengujian.....	41
F. Pengujian Sampel	42
G. Proses Pembuatan	43
H. Proses Pencampuran Sampel.....	45
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	48
A. Karakteristik Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Asli	48
B. Karakteristik Hasil Pengujian Geser Langsung terhadap Penambahan Kultur Murni Mikroba (Bakteri Bacillus Subtilis) pada Tanah Sedimen. ...	56
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	80
A. Kesimpulan.....	80
B. Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA.....	82
LAMPIRAN.....	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur Oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA)	8
Gambar 2. Skema Pengujian Geser Langsung.....	31
Gambar 3. Bagan Alir Penelitian.....	39
Gambar 4. Tanah Asli	40
Gambar 5. Bakteri Bacillus Subtilis	41
Gambar 6. Kurva pertumbuhan bakteri.....	43
Gambar 7. Urea dan CaCl_2	44
Gambar 8. Campuran Bakteri Bacillus Subtilis	45
Gambar 9. Campuran tanah sedimen, bakteri, dan air	46
Gambar 10. Sampel dalam ring pencetak.....	46
Gambar 11. Sampel yang sudah dicetak	47
Gambar 12. Grafik persentase ukuran butir tanah asli.....	49
Gambar 13. Grafik hasil pengujian batas cair tanah asli	50
Gambar 14. Penggolongan Klasifikasi Tanah Asli menurut Sistem USCS	52
Gambar 15. Grafik hubungan kadar air dengan berat isi kering hasil kompaksi pada tanah asli.....	53
Gambar 16. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser	55
Gambar 17. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 4% pada tiap masa pemeraman.....	60
Gambar 18. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 6% pada tiap masa pemeraman.....	60
Gambar 19. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 8% pada tiap masa pemeraman.....	60
Gambar 20. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 10% pada tiap masa pemeraman.....	61
Gambar 21. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 12% pada tiap masa pemeraman.....	61

Gambar 22. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 0 hari.....	62
Gambar 23. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 3 hari.....	62
Gambar 24. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 7 hari.....	62
Gambar 25. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 14 hari.....	63
Gambar 26. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 21 hari.....	63
Gambar 27. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 28 hari.....	63
Gambar 28. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 4% tiap masa pemeraman	66
Gambar 29. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 6% tiap masa pemeraman	67
Gambar 30. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 8% tiap masa pemeraman	67
Gambar 31. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 10% tiap masa pemeraman	68
Gambar 32. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 12% tiap masa pemeraman	68
Gambar 33. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 0 hari	69
Gambar 34. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 3 hari	69
Gambar 35. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 7 hari	69
Gambar 36. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 14 hari	70
Gambar 37. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 21 hari	70
Gambar 38. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 28 hari	70
Gambar 39. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 4% tiap masa pemeraman	71

Gambar 40. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 6% tiap masa pemeraman	71
Gambar 41. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 8% tiap masa pemeraman	72
Gambar 42. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 10% tiap masa pemeraman	72
Gambar 43. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 12% tiap masa pemeraman	73
Gambar 44. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 0 hari.....	73
Gambar 45. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 3 hari.....	74
Gambar 46. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 7 hari.....	74
Gambar 47. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 14 hari.....	75
Gambar 48. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 21 hari.....	75
Gambar 49. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 28 hari.....	76
Gambar 50. Grafik Perubahan nilai kohesi pada variasi penambahan bakteri tiap masa pemeraman	76
Gambar 51. Grafik Perubahan nilai sudut geser dalam tanah pada variasi penambahan bakteri tiap masa pemeraman.....	77
Gambar 52. Grafik peningkatan nilai sudut geser akibat penambahan bakteri terhadap tanah sedimen.....	77
Gambar 53. Diagram rasio peningkatan nilai sudut geser penambahan bakteri terhadap sudut geser tanah sedimen.....	78

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem Klasifikasi AASHTO	11
Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem Klasifikasi AASHTO (Lanjutan).....	12
Tabel 3. Sistem Klasifikasi USCS	14
Tabel 4. Sistem Klasifikasi USCS (Lanjutan)	15
Tabel 5. Nilai berat jenis partikel tanah	24
Tabel 6. Standar Pengujian.....	41
Tabel 7. Klasifikasi tanah untuk lapisan tanah dasar jalan raya (Sistem Klasifikasi AASHTO)	51
Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Tanah Asli.....	55
Tabel 9. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 0 Hari	57
Tabel 10. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 3 Hari	57
Tabel 11. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 7 Hari	58
Tabel 12. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 14 Hari	58
Tabel 13. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 21 Hari	59
Tabel 14. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 28 Hari	59
Tabel 15. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 0 hari.....	64
Tabel 16. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 3 hari.....	64
Tabel 17. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 7 hari.....	65

Tabel 18. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 14 hari.....	65
Tabel 19. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 21 hari.....	65
Tabel 20. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 28 hari.....	66
Tabel 21. Rekapitulasi perhitungan campuran sampel	86

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tanah merupakan komponen yang sangat penting dalam dunia konstruksi karena menjadi faktor penentu keberhasilan suatu pembangunan konstruksi, namun ketersediaan tanah untuk konstruksi besar seperti timbunan jalan membutuhkan jumlah tanah yang cukup besar, sedangkan persediaan tanah dengan daya dukung yang baik terkadang terbatas. Salah satu alternatif untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan memanfaatkan tanah buangan (tanah sedimen) untuk dimanfaatkan menjadi tanah timbunan. Tanah sedimen merupakan tanah yang terbentuk dari endapan hasil pelapukan batuan yang diendapkan di lokasi lain oleh proses alam misalnya air, angin, dan lain-lain. Salah satu contoh tanah sedimen dapat ditemukan di lokasi Bendungan Bili-bili, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Tanah sedimen pada lokasi ini ketersediaannya cukup banyak dan belum dimanfaatkan secara umum, sehingga dapat diteliti untuk pemanfaatannya yaitu kestabilan terhadap pengaruh gaya luar terhadap daya dukung tanah sedimen tersebut. Salah satu cara untuk menambah daya dukung tanah seperti tanah sedimen dapat dilakukan dengan cara stabilisasi. Stabilisasi dapat dilaksanakan dengan menambah sesuatu bahan atau komposit tertentu untuk menambah kekuatan pada tanah. Tujuan dari stabilisasi tanah yaitu untuk meningkatkan kemampuan daya dukung tanah dalam menahan serta

meningkatkan stabilitas tanah. Teknik perbaikan tanah memiliki prinsip dasar bahwa kapasitas tanah yang kurang baik (dalam berbagai aspek), dapat diperbaiki melalui peningkatan sifat-sifat (properties) dari pada tanah, sesuai dengan tujuan perbaikan yang diinginkan. Jika yang diinginkan adalah peningkatan daya dukung dan kuat geser tanah, maka beberapa parameter tanah perlu diperbaiki, seperti berat volume tanah (γ), kohesi tanah (c), sudut geser dalam tanah (Φ). Selain itu, prinsip-prinsip dalam konsep pembangunan berkelanjutan (sustainable development), yaitu pembangunan hanya akan dapat berkelanjutan dan sumberdaya alam akan dapat pula dimanfaatkan oleh generasi yang akan lahir di kemudian hari, apabila aspek perlindungan terhadap lingkungan hidup tetap menjadi prioritas dalam setiap tahapan perencanaan, pelaksanaan, dan pengoperasian infrastruktur yang dibangunnya. Untuk itu maka penerapan teknik-teknik perbaikan tanah harus senantiasa dilengkapi dengan pertimbangan kelestarian lingkungan hidup, sehingga tujuan stabilisasi tanah bukan hanya semata-mata terpusat pada pencapaian syarat teknis, namun juga harus memenuhi syarat-syarat keamanan lingkungan hidup (environment safe) mencari alternative metode stabilisasi yang ramah lingkungan, yaitu dengan pemanfaatan mikroorganisme yang berasal dari mikroba. Sehingga penelitian ini bermaksud melihat pengaruh bakteri bacillus subtilis sebagai bahan stabilisasi tanah sedimen terhadap kuat geser tanah.

B. Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang diatas, berikut ini merupakan rumusan masalah yang akan dibahas :

1. Bagaimana parameter fisis dan mekanis tanah sedimen yang digunakan pada penelitian?
2. Bagaimana pengaruh variasi campuran bakteri bacillus subtilis terhadap karakteristik tanah sedimen?
3. Bagaimana pengaruh masa pemeraman terhadap peningkatan parameter kuat geser tanah sedimen terstabilisasi bakteri bacillus subtilis?

C. Tujuan Penelitian

Adapun beberapa tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik tanah sedimen yang akan digunakan dalam penelitian.
2. Mengetahui pengaruh variasi campuran bakteri bacillus subtilis terhadap karakteristik tanah sedimen tersebut.
3. Mengetahui pengaruh masa pemeraman terhadap peningkatan nilai parameter kuat geser tanah sedimen terstabilisasi bakteri bacillus subtilis.

D. Batasan Masalah

Batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah sedimen yang berasal dari Bendungan Bili-bili, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.
2. Pengujian dilakukan terhadap variasi penambahan bahan stabilisasi bakteri bacillus subtilis.
3. Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium dan bukan pada skala lapangan.
4. Sifat fisis dan mekanis yang diteliti adalah:
 - Pengujian Berat Jenis
 - Pengujian Batas-batas Atterberg
 - Pengujian Analisa Saringan dan Hidrometer
 - Pengujian Pemadatan (kompaksi)
 - Pengujian Kuat Geser Langsung (Direct Shear)
5. Persentase berat campuran yang di uji adalah 4%, 6%, 8%, 10%, 12% terhadap berat tanah dengan kadar air mula-mula.
6. Waktu pemeraman setelah pencampuran tanah dengan bakteri adalah 0,3,7,14,21, dan 28 hari dengan kondisi laboratorium.

E. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disusun agar pembahasan lebih terarah dan tetap menjurus pada pokok permasalahan dan kerangka isi. Dalam tugas akhir ini sistematika penulisan disusun dalam lima bab yang secara berurutan menerangkan hal-hal sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahap demi tahap prosedur pelaksanaan penelitian serta cara pengolahan data hasil penelitian. Termasuk juga kerangka alir penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menerangkan tentang kesimpulan beserta saran yang diperlukan untuk penelitian lebih lanjut dari tugas akhir ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian dan Klasifikasi Tanah

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah berguna sebagai bahan bangunan pada berbagai macam pekerjaan teknik sipil, disamping itu tanah berfungsi juga sebagai pendukung pondasi dari bangunan. Jadi seorang ahli teknik sipil harus juga mempelajari sifat-sifat dasar dari tanah, seperti asal usulnya, penyebaran ukuran butiran, kemampuan mengalirkan air, sifat pemampatan bila dibebani (compressibility), kekuatan geser, kapasitas daya dukung terhadap beban, dan lain-lain (Das, 1995).

Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca (Hardiyatmo, 2001).

Adapun pengelompokan jenis tanah dalam praktek berdasarkan campuran butir menurut (Santosa, 1996) yaitu :

- a. Tanah berbutir kasar adalah tanah yang sebagian besar butir-butir tanahnya berupa pasir dan kerikil.
- b. Tanah berbutir halus adalah tanah yang sebagian besar butir-butir tanahnya berupa lempung dan lanau.
- c. Tanah organik adalah tanah yang cukup banyak mengandung bahan-bahan organik.

Sedangkan berdasarkan sifat lekatannya, tanah dikelompokkan menjadi :

- a. Tanah kohesif yaitu tanah yang mempunyai sifat lekatan antara butir-butirnya (mengandung lempung cukup banyak).
- b. Tanah Non Kohesif adalah tanah yang tidak mempunyai atau sedikit sekali lekatan antara butir-butirnya (hampir tidak mengandung lempung misalnya pasir).

Terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang di dasarkan pada tekstur dan pemakaian, yaitu :

A.1 Sistem Klasifikasi Berdasarkan Tekstur

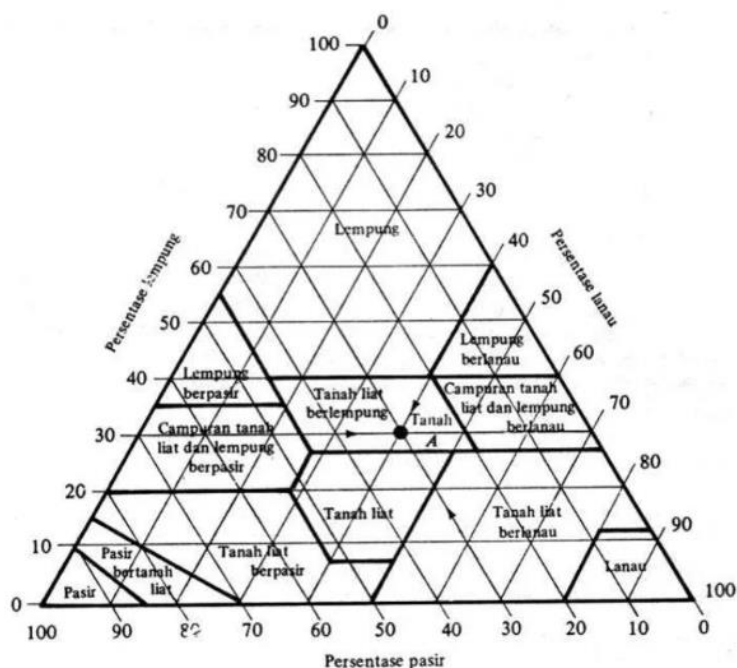
Dalam arti umum, yang dimaksud dengan tekstur tanah adalah keadaan permukaan tanah yang bersangkutan. Tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir yang ada di dalam tanah. Beberapa sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah telah dikembangkan sejak dulu oleh berbagai organisasi guna memenuhi kebutuhan mereka sendiri, beberapa

dari sistem-sistem tersebut masih tetap dipakai sampai saat ini seperti 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:

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

Sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah yang dikembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika (USDA) dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur Oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA)

Sumber : Das, 1995

Sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur adalah relatif sederhana karena ia hanya didasarkan pada distribusi ukuran butiran tanah saja. Dalam kenyataannya, jumlah dan jenis dari mineral lempung yang dikandung oleh tanah sangat mempengaruhi sifat fisis tanah yang bersangkutan. Oleh karena itu, kiranya perlu untuk memperhitungkan sifat plastisitas tanah, yang disebabkan adanya kandungan mineral lempung, agar dapat menafsirkan ciri-ciri suatu tanah. Karena sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tidak memperhitungkan sifat plastisitas tanah, dan secara keseluruhan tidak menunjukkan sifat-sifat tanah yang penting, maka sistem tersebut dianggap tidak memadai untuk sebagian besar dari keperluan teknik.

A.2 Sistem Klasifikasi Berdasarkan Pemakaian

Pada saat sekarang ada lagi dua buah sistem klasifikasi tanah yang selalu dipakai oleh para ahli teknik sipil. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Sistem-sistem tersebut adalah Sistem Klasifikasi AASHTO dan Sistem Klasifikasi Unified. Sistem klasifikasi AASHTO pada umumnya dipakai oleh departemen jalan raya di semua negara bagian di Amerika Serikat. Sedangkan sistem klasifikasi Unified pada umumnya lebih disukai oleh para ahli geoteknik untuk keperluan-keperluan teknik yang lain.

A.2.1 Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan dalam tahun 1929 sebagai Public Road Administration Classification System. Sistem ini sudah

mengalami beberapa perbaikan, versi yang saat ini berlaku adalah yang diajukan oleh Committee on Classification of Materials for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board dalam tahun 1945 (ASTM Standard no D-3282, AASHTO metode M 145). Sistem klasifikasi AASHTO yang dipakai saat ini diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Tanah di mana lebih dari 35% butirannya lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

a. Ukuran butir

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

b. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas (plasticity index (PI)) sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih.

c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Apabila sistem klasifikasi AASHTO dipakai untuk mengklasifikasikan tanah, maka data dari hasil uji dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan hingga ditemukan angka-angka yang sesuai. Tabel 1 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair (liquid limit, LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7. Klasifikasi tanah berdasarkan system klasifikasi AASHTO dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan no200)						
	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
Analisis ayakan no. 200 (%lolos)							
No. 10	Maks 50		Min 51				
No. 40	Maks 30	Maks 50	Maks 10				
No. 200	Maks 15	Maks 25		Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan no. 40							
Batas cair (LL)				Maks 40	Min 41	Maks 40	Min 41
Indeks Plastis (PI)		Maks 6	NP	Maks 10	Maks 10	Min 11	Min 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai tanah dasar	Baik sekali sampai baik						

Tabel 2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem Klasifikasi AASHTO (Lanjutan)

Klasifikasi umum	Tanah Lanau-Lempung (lebih dari 35% dari seluruh tanah lolos ayakan no. 200)			
Klasifikasi kelompok	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6'
Analisis ayakan no. 200 (%lolos) No. 10 No. 40 No. 200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan no. 40 Batas cair (LL) Indeks Plastis (PI)	Maks 40 Maks 10	Min 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai tanah dasar	Biasa sampai jelek			

Sumber : Das, 1995

Untuk mengevaluasi mutu (kualitas) dari suatu tanah sebagai bahan lapisan tanah dasar (subgrade) dari suatu jalan raya, suatu angka yang dinamakan indeks grup (group index, GI) juga diperlukan selain kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Harga GI ini dituliskan di dalam kurung setelah nama kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Indeks grup dapat dihitung dengan memakai persamaan seperti di bawah ini:

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01(F - 15) (PI - 10) \quad (1)$$

di mana:

F = persentase butiran yang lolos ayakan No. 200

LL = batas cair (liquid limit)

PI = indeks plastisitas

A.3 Sistem Klasifikasi Unified

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande dalam tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh The Army Corps of Engineers selama Perang Dunia II. Dalam rangka kerja sama dengan United States Bureau of Reclamation tahun 1952, sistem ini disempurnakan. Pada masa kini, sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik. Sistem Klasifikasi Unified diberikan dalam Tabel 3. 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. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.

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

W = well graded (tanah dengan gradasi baik)

P = poorly graded (tanah dengan gradasi 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. Untuk klasifikasi yang benar, faktor-faktor berikut ini perlu diperhatikan :

1. Persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 (ini adalah fraksi halus)
2. Persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40
3. Koefisien keseragaman (uniformity coefficient, C_u) dan koefisien gradasi (gradation coefficient, C_c) untuk tanah di mana 0 - 12% lolos ayakan No. 200.
4. Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah di mana 5% atau lebih lolos ayakan No. 200). Bilamana persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 adalah antara 5 sampai dengan 12%, simbol ganda seperti GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW-SM, SW-SC, SP-SM, dan SP-SC diperlukan.

Sistem klasifikasi Unified dapat dilihat pada tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Sistem Klasifikasi USCS

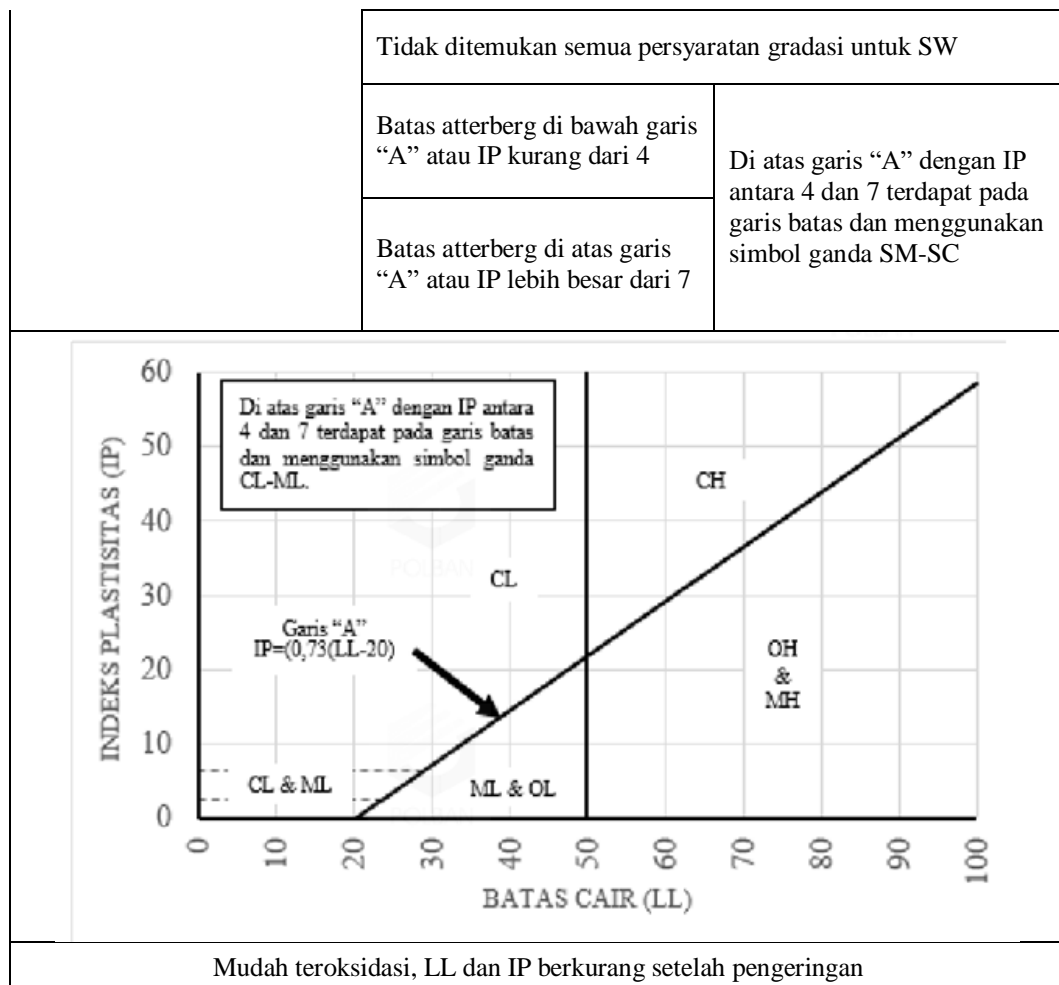
Pembagian Jenis		Nama Jenis	Simbol
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari setengah materialnya lebih kasar dari ayakan no 200	Kerikil Lebih dari setengah fraksi kasar kasar dari ayakan no 4	Kerikil bersih, (tanpa atau sedikit mengandung bahan halus)	Kerikil, kerikil campur pasir bergradasi baik tanpa atau dengan sedikit pasir halus. Gw
		Kerikil dengan bahan halus (banyak mengandung bahan halus)	Kerikil, kerikil campur pasir bergradasi buruk tanpa atau dengan sedikit pasir halus. GP
		Kerikil dengan bahan halus (banyak mengandung bahan halus)	Kerikil lanauan, kerikil campur pasir atau lanau. GM
		Kerikil dengan bahan halus (banyak mengandung bahan halus)	Kerikil lempungan, kerikil campur pasir atau lempung. GC

	Pasir Lebih dari setengah fraksi kasai halus dari ayakan no 4	Pasir bersih (tanpa atau sedikit mengandung bahan halus)	Pasir, pasir kerikilan bergradasi baik tanpa atau dengan sedikit bahan halus	SW
			Pasir, pasir kerikilan bergradasi buruk tanpa atau dengan sedikit bahan halus	SP
		Pasir dengan bahan halus (banyak mengandung bahan halus)	Pasir kelanauan, pasir campur lanau.	SM
			Pasir kelepungan, pasir campur lempung.	SC
Tanah Berbutir Halus Lebih dari setengah materialnya lebih halus dari ayakan no 200	Lanau dan Lempung	Batas cair kurang dari 50 %	lanau organik dan pasir sangat halus, tepung batu, pasir halus kelanauan atau kelepungan atau lanau kelepungan sedikit plastis.	ML
			Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung kerikilan, lempung pasiran, lempung lanauan, lempung humus.	CL
			Lempung organik dan lempung lanauan organik dengan plastisitas rendah.	OL
		Batas cair lebih dari 50 %	Lempung anorganik, tanah pasiran halus atau tanah lanauan mengandung mika atau diatome lanau elastis.	MH
			Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung expansif	CH
			Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi, lanau organik.	OH
		Tanah Organik		Gambut dan tanah organik lainnya.

Sumber : Hendarsin, 2000

Tabel 4. Sistem Klasifikasi USCS (Lanjutan)

KRITERIA KLASIFIKASI LABORATORIUM		
Tentukan persentase kerikil dan pasir dari kurva pembagian butir, berdasarkan pada persentase bahan halus (fraksi lebih halus dari ayakan No. 200). Tanah berbutir kasar diklasifikasikan sebagai berikut :	<p>Kurang dari 5% Lebih dari 12% 5% sampai 12%</p> <p>GW, GP, SW, SP GM, GC, SM, SC</p> <p>pada garis batas</p>	
	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ <p>lebih besar dari 4</p>	
	$Cu = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ <p>antara 1 dan 3</p>	
	Tidak ditemukan semua persyaratan gradasi untuk GW	
	<p>Batas atterberg di bawah garis "A" atau IP kurang dari 4</p>	Di atas garis "A" dengan IP antara 4 dan 7 terdapat pada garis batas dan menggunakan simbol ganda GM-GC
	<p>Batas atterberg di atas garis "A" atau IP lebih besar dari 7</p>	
$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $Cu = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ <p>lebih besar dari 6 antara 1 dan 3</p>		



Sumber : Hendarsin, 2000

B. Karakteristik Tanah Lanau

Tanah lanau pada umumnya terbentuk dari kristal kuarsa yang pecah seukuran pasir. Terkadang tanah lanau juga disebut debu pada beberapa Pustaka. Endapan yang mengapung di permukaan air maupun tenggelam biasanya dibentuk oleh material tanah lanau. Pemecahan secara alami melibatkan pelapukan batuan dan regolit secara kimiawi maupun pelapukan secara fisik melalui embun beku (frost) haloclasty. Proses utama melibatkan abrasi, baik padat (oleh glesler), cair (pengendapan sungai),

maupun oleh angin. Di wilayah-wilayah setengah kering produksi lanau biasanya cukup tinggi. Lanau yang terbentuk secara glasial (oleh glesler) dalam Bahasa Inggris kadang-kadang disebut rock flour atau stone dust. Secara komposisi mineral, lanau tersusun dari kuarsa felspar. Sifat fisika tanah lanau umumnya terletak diantara sifat tanah lempung dan pasir. Selain itu tanah lanau merupakan tanah berbutir halus yang berukuran lebih kecil dari 0,074 mm (No. 200). Lanau terdiri dari dua jenis yaitu lanau anorganik (inorganik silt) yang merupakan tanah berbutir halus dengan plastisitas kecil mengandung butiran kuarsa sedimen yang kadang disebut tepung batuan (rockflour) dan tanah lanau organik (organik silt) tanah agak plastis berbutir halus dengan campuran partikel-partikel bahan organik terpisah secara halus, warna tanah bervariasi dari abu-abu terang ke abu-abu sangat gelap. Lanau adalah tanah berbutir halus yang mempunyai batas cair dan indeks plastis terletak di bawah garis A dan lempung berada di atas garis A. Kelompok ML dan MH adalah tanah yang diklasifikasikan sebagai lanau pasir, lanau lempung atau lanau anorganik dengan plastisitas relatif rendah. Juga termasuk tanah jenis butiran lepas, bubuk batu, tanah yang mengandung mika juga beberapa jenis lempung (Darwis, 2017).

C. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah pada prinsipnya adalah untuk perbaikan mutu tanah yang kurang baik. Menurut Bowles (1986) apabila suatu tanah yang terdapat di lapangan bersifat sangat lepas atau mudah tertekan, atau apabila ia mempunyai indeks konsistensi yang tidak sesuai, permeabilitas yang terlalu tinggi, atau sifat lain yang tidak diinginkan sehingga tidak sesuai untuk suatu proyek pembangunan, maka tanah tersebut harus distabilisasikan. Stabilisasi dapat terdiri dari salah satu tindakan berikut :

1. Meningkatkan kerapatan tanah.
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan tahanan gesek yang timbul.
3. Menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan fisis pada tanah.
4. Menurunkan muka air tanah (drainase tanah).
5. Mengganti tanah yang buruk

Sementara itu, menurut Ingles dan Metcalf (1972), stabilisasi tanah dapat dilakukan dengan metode, yaitu :

1. Cara mekanis

Perbaikan tanah dengan menggunakan cara mekanis yaitu perbaikan tanah

tanpa penambahan bahan-bahan lainnya. Stabilisasi mekanis biasanya dilakukan dengan menggunakan peralatan mekanis seperti mesin gilas, penumbuk, peledak, tekanan statis dan sebagainya. Tujuan stabilisasi ini

adalah untuk mendapatkan tanah yang berdaya dukung baik dengan cara mengurangi volume pori sehingga menghasilkan kepadatan tanah yang maksimum. Metode ini biasanya digunakan pada tanah yang berbutir kasar dengan fraksi tanah yang lolos saringan nomor 200 ASTM paling banyak 25%.

2. Cara fisik

Perbaikan tanah dengan cara fisik yaitu dengan memanfaatkan perubahan-perubahan fisik yang terjadi seperti hidrasi, absorpsi/penyerapan air, pemanasan, pendinginan, dan menggunakan arus listrik.

3. Cara kimiawi

Perbaikan tanah dengan cara kimiawi adalah penambahan bahan stabilisasi yang dapat mengubah sifat-sifat kurang menguntungkan dari tanah. Metode stabilisasi ini biasanya digunakan untuk tanah yang berbutir halus. Pencampuran bahan kimia yang sering dilakukan adalah dengan menggunakan semen, kapur, abu batubara dan sebagainya. Stabilisasi tanah dilakukan untuk mengubah sifat-sifat dari material yang ada dan kurang baik menjadi material yang memiliki sifat yang lebih baik sehingga stabilisasi ini dapat memenuhi kebutuhan perencanaan konstruksi yang diinginkan.

Pemilihan stabilisasi yang digunakan selalu didasarkan atas respon dari tanah tersebut terhadap stabilisasi yang digunakan. Sifat-sifat dari suatu jenis tanah, sangat mempengaruhi dalam penentuan jenis stabilisasi tanah tersebut. Secara umum ada 4 (empat) karakteristik utama tanah atau sifat

tanah yang harus dipertimbangkan sehubungan dengan masalah stabilisasi tanah, yaitu :

a. Stabilitas volume tanah

Perubahan volume tanah berkaitan erat dengan kadar airnya.

Banyak jenis

tanah lempung yang mengalami susut dan kembang (shrink and swell) karena kepekaan terhadap perubahan kadar airnya. Perubahan kadar air ini biasanya terjadi sejalan dengan perubahan musim di wilayah tersebut. Untuk lempung yang ekspansif, bila hal ini terkontrol maka akan terjadi depormasi dan retak-retak pada permukaan jalan. Untuk mengukur volume yang terjadi biasanya diadakan percobaan swelling potensial dilaboratorium. Namun percobaan di laboratorium belum tentu menunjukkan perubahan yang terjadi di lapangan, karena perubahan volume di lapangan kemungkinan akan lebih kecil akibat adanya pengaruh permeabilitas yang rendah. Masalah ini biasanya diatasi dengan waterproofing dengan berbagai macam bahan seperti bitumen, tar dan lain-lain. Cara lain adalah dengan menstabilisasi pressure dari lempung.

b. Kekuatan

Perubahan beban eksternal yang terjadi umumnya adalah berhubungan dengan perubahan volume karena adanya gayainternal yang diakibatkan oleh perubahan kadar air. Banyak percobaan dan praktek di lapangan yang membuktikan hal ini, kecuali pada tanah organik dimana stabilisasi hanya meningkatkan volume tanpa terjadi peningkatan kekuatan.

Pada umumnya parameter yang digunakan untuk mengetahui kekuatan tanah adalah dengan percobaan parameter kuat geser dan daya dukung tanah. Hampir semua jenis stabilisasi berhasil mencapai tujuan ini, namun pada tanah organik hal ini sulit dicapai, jadi lapis tanah organik (top soil) sebaiknya tidak digunakan sebagai material yang harus di stabilisasi, melainkan disingkirkan. Pelaksanaan pemadatan yang baik sampai sekarang masih stabilisasi yang diterapkan. Sehingga hampir semua jenis stabilisasi bertujuan untuk meningkatkan stabilitas volume sekaligus meningkatkan kekuatan tanah.

c. Permeabilitas

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesa dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga pori. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya, sehingga air dapat mengalir dari titik dengan tinggi energi tinggi ke titik dengan titik energi yang lebih rendah. Untuk tanah, permeabilitas dilukiskan sebagai sifat tanah yang mengalirkan air melalui rongga pori tanah. Untuk lempung, permeabilitas yang terjadi disebabkan sistem micropore (sistem pori-pori mikro) dan kapasitasnya. Masalah utama akibat besarnya permeabilitas umumnya adalah timbulnya tekanan air pori dan terjadi aliran perembesan (seepage flow). Sedangkan pada tanah lempung, permeabilitas tinggi biasanya diakibatkan karena pelaksanaan pemadatan yang kurang baik. Karena itu masalah ini dapat diatasi dengan

pembuatan sistem drainase, pelaksanaan pemadatan dan stabilisasi yang baik.

d. Durabilitas

Durabilitas adalah daya tahan bahan konstruksi terhadap cuaca, erosi dan kondisi lalu lintas di atasnya. Durabilitas yang buruk dapat menimbulkan masalah baik pada tanah alami maupun tanah yang distabilisasi. Dampak yang ditimbulkan tidak terlalu berpengaruh pada struktur perkerasan tetapi lebih banyak terjadi pada permukaan sehingga biaya pemeliharaan jalan cenderung meningkat. Pada tanah yang distabilisasi, durabilitas yang buruk biasanya diakibatkan oleh pemilihan jenis stabilisasi yang salah, bahan stabilisasi yang tidak cocok atau karena masalah cuaca. Percobaan untuk mengetahui ketahanan material terhadap cuaca dan kondisi lalu lintas sampai sekarang masih sulit dihubungkan dengan keadaan sebenarnya di lapangan.

D. Bakteri Bacillus Subtilis

Bacillus subtilis adalah bakteri gram-positif yang berbentuk batang dan katalase-positif. Pada awalnya bakteri ini dinamai *Vibri subtilis* oleh Christian Gottfried Ehrenberg dan nama bakteri ini diubah oleh Ferdinand Cohn menjadi *Bacillus subtilis* pada tahun 1872 (*subtilis* adalah bahasa Latin yang berarti 'baik'). Sel *Bacillus subtilis* biasanya berbentuk batang,

dengan panjang sekitar 4-10 mikrometer (μm) dan berdiameter 0,25-1,0 μm . Bakteri lain dari genus *Bacillus* yaitu *Bacillus subtilis* ini dapat membentuk endospora, guna bertahan hidup dalam kondisi lingkungan yang sekalipun dari suhu dan pengeringan. *Bacillus subtilis* adalah anaerob fakultatif dan telah dianggap sebagai aerob obligat sampai pada tahun 1998. *Bacillus subtilis* memiliki banyak flagela, sehingga memberikan kemampuan untuk bergerak cepat didalam cairan. Bakteri *Bacillus subtilis* terbukti sangat mudah dalam memanipulasi genetic dan telah banyak diambil sebagai pilihan untuk dijadikan organisme model untuk bahan penelitian di laboratorium, terutama dari sporulasi yang merupakan contoh sederhana dari diferensiasi seluler. Pada hal popularitas dalam organisme model laboratorium, *Bacillus subtilis* juga sering dianggap sebagai ekuivalen gram-positif dari *Escherichia coli*, suatu bakteri gram-negatif.

D.1 Klasifikasi *Bacillus Subtilis*

Menurut Bergey's Manual of Systematic Bacteriology 2nd edition (2001) dalam Madigan, et al. (2000) *Bacillus* memiliki jenjang klasifikasi sebagai berikut:

Kingdom: Bacteria

Phylum: Firmicutes

Class: Bacilli

Order: Bacillales

Family: Bacillaceae

Genus: *Bacillus*

D.2 Karakteristik Bacillus Subtilis

Bacillus masuk kedalam kelompok bakteri batang dan kokus yang membentuk endospora dengan ciri-ciri mempunyai bentuk sel batang, motil yang memiliki satu flagel, gram positif, bersifat aerobik, membentuk endospore, memiliki habitat pada lingkup tanah, air, lingkungan akuatik, juga pencernaan hewan (termasuk manusia), beberapa spesies bersifat patogenesitas terhadap manusia dan hewan lain (Holt et al.,2000).

Didalam Bergey's Manual of Determinative Bacteriology edisi ke sembilan, genus Bacillus memiliki karakteristik yang berbeda apabila dibandingkan dengan bakteri pembentuk endospora dan genera sejenis.

E. Berat Jenis Tanah

Berat jenis partikel (specific gravity) tanah (G_s) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada suhu 40C (Hardiyatmo, 1992).

Nilai berat jenis partikel tanah dapat dilihat pada Tabel 5 berikut :

Tabel 5. Nilai berat jenis partikel tanah

Jenis Tanah	Berat Jenis (G_s)
Kerikil	2.65-2.68
Pasir	2.65-2.68
Lanau tak organik	2.62-2.68
Lanau organik	2.58-2.65
Lempung tak organik	2.68-2.75
Humus	1.37
Gambut	1.25-1.80

Sumber : Hardiyatmo (1992)

F. Batas-batas Atterberg

Hardiyatmo (2012) memaparkan bahwa suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel mineral lempung dalam tanah. Istilah plastisitas menggambarkan kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak atau remuk.

Bergantung pada kadar air, tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Konsistensi bergantung pada gaya tarik antara partikel mineral lempung.

Terdapat 3 macam batas-batas atterberg, yaitu:

a. Batas cair (Liquid Limit)

Batas cair didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair biasanya ditentukan dari uji casagrande (Hardiyatmo, 2012). Muntohar (2009) menjelaskan jika pada kondisi cair, tanah memiliki kekuatan yang sangat rendah dan terjadi deformasi yang sangat besar. Namun sebaliknya, kekuatan tanah menjadi sangat besar dan mengalami deformasi yang sangat kecil dalam kondisi padat.

b. Batas plastis (Plastic Limit)

Batas plastis didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah

plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung (Hardiyatmo, 2012).

c. Batas susut (Shrinkage Limit)

Batas susut didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah (Hardiyatmo, 2012).

G. Analisa Ukuran Butir

Sifat-sifat tanah bergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh karena itu, analisis ukuran butir tanah merupakan pengujian yang sangat sering dilakukan (Hardiyatmo, 2012).

Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan. Terdapat dua metode untuk mengetahui distribusi ukuran partikel, yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer.

a. Analisis saringan

Penyaringan merupakan metode yang biasanya secara langsung untuk menentukan ukuran partikel dengan didasarkan pada batas-batas bawah ukuran lubang saringan yang digunakan. Batas terbawah saringan adalah ukuran terkecil untuk partikel pasir (Muntohar, 2009).

b. Analisis hidrometer

Muntohar (2009) menjelaskan proses penyaringan tidak dapat digunakan untuk tanah berbutir halus, seperti lanau dan lempung karena ukuran partikelnya sangat kecil berupa koloid (colloid). Sehingga untuk tanah berbutir halus, digunakan metode analisis hidrometer. Bila contoh tanah terdipersi di dalam air, partikel-partikel mengendap dengan kecepatan yang berbeda-beda bergantung pada ukuran, berat, dan bentuk serta kekentalan (viscosity) air. Partikel yang lebih besar akan mengendap lebih cepat diikuti dengan partikel-partikel yang lebih kecil.

H. Pemadatan Tanah (Kompaksi)

Pemadatan tanah adalah suatu proses memadatkan partikel tanah sehingga terjadi pengurangan volume udara dan volume air dengan memakai cara mekanis. Pemadatan dilakukan bila tanah dilapangan membutuhkan perbaikan untuk mendukung konstruksi di atasnya, atau tanah akan digunakan sebagai bahan timbunan. Maksud dari pemadatan tanah adalah sebagai berikut;

1. menambahkan nilai kuat geser tanah,
2. mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas),
3. mengurangi sifat permeabilitas, dan
4. mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air dan lain-lainnya.

Kepadatan tanah tergantung pada nilai kadar air, saat air ditambahkan pada pemadatan, air ini melunakan partikel-partikel tanah. Partikel-partikel tanah menggelincir satu sama lain dan bergerak pada posisi yang lebih rapat. Jika kadar air tanah sedikit maka tanah akan keras begitu pula sebaliknya, bila kadar air banyak maka tanah akan menjadi lunak atau cair. Pemadatan yang dilakukan pada saat kadar air lebih tinggi daripada kadar air optimumnya akan memberikan pengaruh terhadap sifat tanah. Uji pemadatan tanah atau Proctor Standard adalah metode laboratorium untuk menentukan eksperimental kadar air yang optimal dimana suatu jenis tanah tertentu akan menjadi paling padat dan mencapai kepadatan kering maksimum. Teori pemadatan pertama kali dikembangkan oleh R.R. Proctor. Empat variabel pemadatan tanah yang didefinisikan oleh Proctor, yaitu usaha pemadatan atau energi pemadatan, jenis tanah (gradasi, kohesif atau tidak kohesif, ukuran partikel dan lain-lain), kadar air, dan berat isi kering. Pemadatan standar (standar compaction) adalah usaha untuk memadatkan dengan alat pemadatan standar.

Hubungan berat volume kering (γ_d) dengan berat volume basah (γ_w) dan kadar air (ω), dinyatakan dalam Persamaan 2 berikut ini :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1 + \omega} \quad (2)$$

Prinsip Uji Proctor Standard adalah tanah dipadatkan dalam sebuah cetakan silinder dengan diameter 101,6 mm dan volume 943,3 cm³. Tanah dalam cetakan dipadatkan menggunakan penumbuk yang beratnya 2,5 kg

dengan tinggi jatuh 30,5 cm. Pemadatan tanah dilakukan dalam tiga lapisan dengan jumlah tumbukan tiap lapisan sebanyak 25 kali. Hasil pengujian akan memperlihatkan kurva nilai kadar air optimum (w_{opt}) untuk mencapai berat volume kering paling besar atau kepadatan maksimum. Nilai kadar air rendah pada kebanyakan tanah, tanah cenderung bersifat kaku dan sulit untuk dipadatkan. Setelah kadar air ditambah, tanah menjadi lebih lunak. Pada kadar air yang tinggi, berat volume air akan berkurang. Bila seluruh udara di dalam tanah dipaksa keluar pada saat pemadatan, tanah akan berada dalam kedudukan jenuh dan nilai berat volume kering akan menjadi maksimum. Akan tetapi dalam praktek, kondisi ini sulit dicapai.

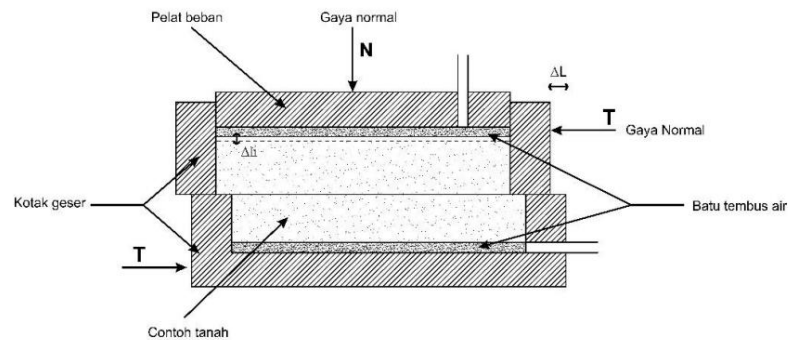
I. Geser Langsung (Direct Shear)

Paramater kuat geser tanah diperlukan untuk menganalisis daya dukung tanah, stabilisasi lereng dan tegangan dorong untuk dinding penahan tanah. Kuat geser tanah merupakan gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Atas dasar pengertian tersebut, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh kohesi dan gesekan tanah.

- a. Kohesi tanah tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan vertikal yang bekerja pada bidang geserannya.
- b. Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan vertikal pada bidang geserannya.

Pengujian geser langsung adalah salah satu pengujian yang bertujuan untuk menentukan parameter kuat geser tanah yang berupa nilai kohesi dan sudut geser. Peralatan pengujian geser langsung yaitu kotak geser dari besi yang berfungsi sebagai wadah benda uji. Kotak geser tersebut terbagi menjadi dua bagian yang sama. Tegangan normal pada benda uji diberikan dari atas kotak geser. Gaya geser diterapkan pada setengah bagian atau dari bagian kotak geser untuk memberikan geseran pada bagian tengah-tengah benda uji (Hardiyatmo, 2010).

Peralatan pengujian geser langsung meliputi kotak geser dari besi, yang berfungsi sebagai tempat benda uji. Kotak geser tempat benda uji dapat berbentuk bujursangkar maupun lingkaran, dengan luas kira-kira 19,35 cm² sampai 25,8 cm² dengan tinggi 2,54 cm. Kotak terpisah menjadi 2 bagian yang sama. Tegangan normal pada benda uji diberikan dari atas kotak geser. Gaya geser diterapkan pada setengah bagian atas dari kotak geser, untuk memberikan geseran pada tengahnya benda uji. Skema dari pengujian kuat geser pada uji geser langsung dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Skema Pengujian Geser Langsung

Sumber : Hardiyatmo, 2002

Mohr pada tahun 1910 memberikan teori tentang kondisi keruntuhan suatu bahan. Keruntuhan terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Menurut Coulomb tahun 1776 kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dalam Persamaan 3 berikut ini.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

dengan:

τ = kuat geser tanah (kN/m^2),

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

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

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

Parameter kuat geser tanah ditentukan dari uji-uji laboratorium pada benda uji yang diambil dari lapangan yaitu dari hasil pengeboran tanah yang dianggap mewakili. Kuat geser tanah dari benda uji yang diperiksa di laboratorium biasanya dilakukan dengan besar beban yang ditentukan lebih dulu dan dikerjakan dengan menggunakan tipe peralatan yang khusus.

Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya kuat geser tanah yang diuji di laboratorium adalah (Hardiyatmo, 2010);

1. kandungan mineral dari butiran tanah,
2. bentuk partikel,
3. angka pori dan kadar air,
4. sejarah tegangan yang pernah dialami,
5. tegangan yang ada dilokasi (di dalam tanah),
6. perubahan tekanan selama pengambilan contoh dari dalam tanah,
7. tegangan yang dibebankan sebelum pengujian,
8. cara pengujian,
9. kecepatan pembebanan,
10. kondisi drainase yang dipilih, drainase terbuka (drained) atau drainase tertutup (undrained),
11. tekanan air pori yang ditimbulkan, dan
12. kriteria yang diambil untuk penentuan kuat geser.

Pengujian geser langsung dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu tegangan geser terkendali dimana penambahan gaya geser dibuat konstan dan diatur, atau dengan cara tegangan terkendali dimana kecepatan geser yang diatur. Hasil pengujian geser langsung yaitu hubungan antara tegangan geser dan perubahan ketebalan dari sampel tanah akibat perpindahan geser tanah pasir lepas dan pasir padat dapat memperlihatkan sifat khusus pada tanah pasir padat, sedang, dan padat.

J. Penelitian Terdahulu

Berikut penelitian-penelitian terdahulu mengenai stabilisasi tanah dengan bakteri bacillus subtilis, seperti yang dilakukan oleh :

1. Imelda Vera Tumanan (2013) : Studi Karakteristik Mekanik Tanah Organik Terstabilisasi Bakteri Bacillus Subtilis.

Stabilisasi tanah dengan mikroorganisme merupakan salah satu metode yang baik untuk diaplikasikan , karena metode tersebut ramah lingkungan. Tugas akhir ini membahas tentang salah satu tindakan stabilisasi tanah pada tanah organik dengan mikroorganisme. Mikroorganisme yang digunakan ialah mikroorganisme lokal Indonesia dengan jenis Bacillus Subtilis. Karakteristik tanah yang dievaluasi dalam penelitian ini ialah karakteristik mekanik dengan melakukan pengujian geser langsung. Metode pelaksanaannya ialah melakukan pengujian karakteristik fisis pada tanah organik yang telah diambil dari lokasi. Kemudian melakukan pengujian pemadatan, permeabilitas, dan geser langsung pada tanah asli. Tanah organik dicampurkan dengan bakteri dengan variasi jumlah larutan bakteri yang setelah itu juga diperam dengan variasi waktu yang berbeda. Variasi jumlah larutan yang digunakan ialah 2cc, 4cc dan 6 cc dengan waktu pemeraman dari 7 hari, 21 hari hingga 28 hari. Hasil analisis yang diperoleh ialah nilai parameter kuat geser yang pada tanah organik yang dicampurkan dengan Bacillus Subtilis mengalami

peningkatan secara kontinu. Komposisi optimum yang diperoleh untuk menstabilkan tanah organik dengan Bacillus S. ialah pada variasi jumlah larutan 6 cc dan waktu pemeraman 28 hari. Nilai parameter kuat geser yang diperoleh yaitu : $\phi = 31,59^\circ$ dan $c = 1,190$ kg/cm² . Karakteristik mekanik tanah yang distabilisasi dengan campuran larutan Bacillus Subtilis mengalami perubahan nilai parameter kuat geser, yaitu nilai kohesi mengalami peningkatan sebesar 410 kali dan nilai sudut geser dalam mengalami peningkatan sebesar 200 kali.

2. Iffah Fadliah (2013) : Studi Eksperimental Stabilisasi Biogrouting Bacillus Subtilis pada tanah lempung kepasiran.

Penelitian ini bertujuan untuk untuk menentukan komposisi optimum larutan bakteri Bacillus subtilis untuk stabilitasi tanah dan mengevaluasi karakteristik mekanis tanah yang telah distabilisasi dengan variasi larutan bakteri Bacillus subtilis dan larutan sementasi, dikombinasikan dengan variasi waktu pemeraman. Penelitian ini menggunakan beberapa tahap, yaitu penumbuhan bakteri Bacillus subtilis , pembuatan larutan sementasi, dan pencampuran dengan cara grouting. Untuk pengujian tanah standar SNI dan ASTM. Pengujian dilakukan dengan model fisik laboratorium dengan pengujian Kuat tekan bebas, Permeabilitas dan Geser langsung yang masing-masing cetakan dirancang dengan ukuran 7.2 cm x 3.6 cm, 6 cm x 6.4 cm dan 2cm x 6.4 cm. dengan penginjeksian bakteri

sebesar 1 (satu), 2 (dua), 3 (tiga, dan 4 (empat) kali injeksi serta variasi pemeraman selama 3, 7, 14, 21 dan 28 hari. Dari hasil pengujian terhadap karakteristik mekanis (kuat tekan bebas, permeabilitas, dan geser langsung) didapatkan secara umum kadar optimum larutan bakteri *Bacillus subtilis* yang diinjeksikan ke dalam sampel tanah adalah empat kali (4) injeksi dengan masa pemeraman selama 28 hari. Dari hasil pengujian kuat tekan bebas didapatkan hasil peningkatan nilai kuat tekan terhadap nilai kuat tekan tanpa bakteri. Selanjutnya permeabilitas tanah yang distabilisasi dengan bakteri menunjukkan penurunan nilai koefisien permeabilitas. Kemudian hasil pengujian Geser langsung terjadi peningkatan nilai sudut geser seiring dengan penambahan volume bakteri kedalam sampel tanah.

3. Rio Alvin Arfandy (2017) : Stabilisasi tanah ekspansif dengan metode bioremediasi.

Stabilisasi tanah dengan mikroorganisme merupakan salah satu metode yang baik untuk diaplikasikan, karena metode tersebut ramah lingkungan. Tugas akhir ini membahas tentang salah satu tindakan stabilisasi tanah pada tanah ekspansif dengan mikroorganisme. Mikroorganisme yang digunakan ialah mikroorganisme local Indonesia dengan jenis *Bacillus Subtilis*. Karakteristik tanah yang dievaluasi dalam penelitian ini ialah karakteristik mekanik dengan melakukan pengujian kuat tekan

bebas. Metode pelaksanaannya ialah melakukan pengujian pemadatan, kadar air, dan batas atterberg pada tanah ekspansive. Tanah ekspansive dicampurkan dengan bakteri dengan variasi jumlah larutan bakteri yang setelah itu juga diperam dengan variasi waktu yang berbeda. Variasi jumlah larutan yang digunakan ialah 8cc, 12cc, 15cc, 18cc, 21cc, 24cc dan 27cc dengan waktu pemeraman dari 3 hari, 7 hari hingga 14 hari. Hasil analisis yang diperoleh ialah nilai parameter kuat tekan bebas yang pada tanah ekspansive yang dicampurkan dengan *Bacillus Subtilis* mengalami peningkatan secara kontinu. Komposisi optimum yang diperoleh untuk menstabilkan tanah organik dengan *Bacillus S.* ialah pada variasi jumlah larutan 12cc dan waktu pemeraman 14 hari. Nilai parameter kuat tekan bebas yang diperoleh yaitu : = 0,930 gr/cm. Karakteristik fisik sampel tanah yang diperoleh dari hasil pengujian fisik yaitu kadar air 48.13%, berat jenis tanah sebesar 2,7, berat isi kering maksimum 1.22 gr/cm³, kadar air optimum 32%, batas cair(LL) 266.61%, batas plastisitas(PL) 39.05%, dan indeks plastisitas (PI) 227.56%; nilai activity 2.881 ;Activity Berdasarkan jenis tanah yang digunakan dalam penelitian ini ialah tanah ekspansif. Karakteristik mekanik tanah yang distabilisasi dengan campuran larutan *Bacillus Subtilis* mengalami perubahan nilai parameter kuat tekan, yaitu, nilai kuat tekan mengalami peningkatan sebesar 430 kali. Hasil pengujian kuat tekan tanah pada sampe

tanah yang telah distabilisasi mengalami kenaikan dan penurunan nilai tegangan. Dan nilai tegangan maksimum terdapat pada campuran tanah dengan bakteri sebesar 12 cc dengan pemeraman 14 hari sebesar 0,931 kg/cm.

BAB 3. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Proses pembuatan benda uji, pengujian sifat fisis dan mekanis tanah dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Hasanuddin di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan.

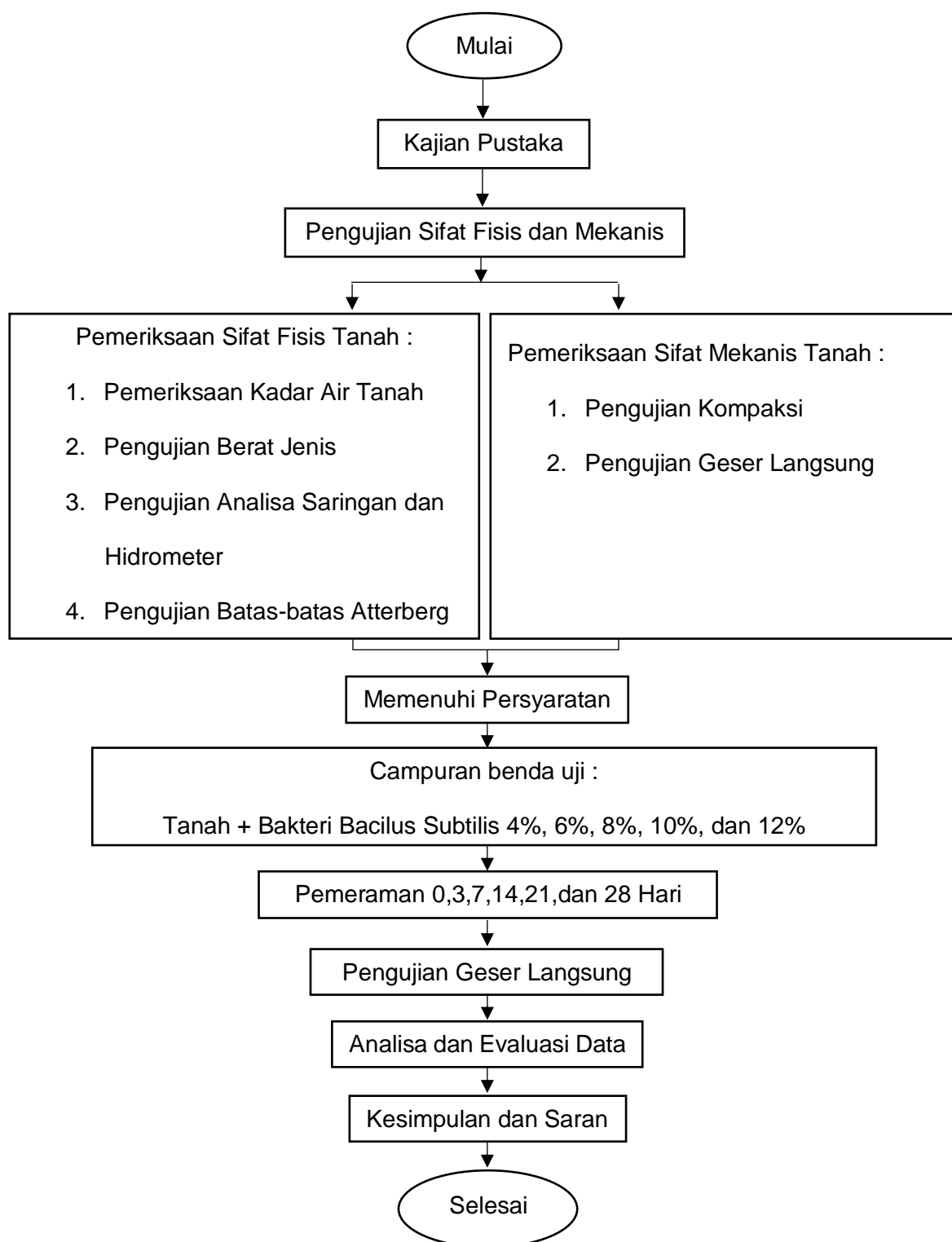
Waktu penelitian mengacu pada standar durasi yang telah ditetapkan berdasarkan standar pengujian yang berlaku.

B. Metode Pengumpulan Data

Pengambilan data dilakukan terhadap tanah yang digunakan pada penelitian untuk pembuatan benda uji, yaitu dengan tahap pemilihan tanah terlebih dahulu, dan kemudian diidentifikasi secara visual serta faktor ketersediannya di alam, selanjutnya dengan mengidentifikasi karakteristik tanah tersebut untuk memastikan kesesuaiannya dengan bahan stabilisasi yang akan digunakan dengan komposisi mengacu tujuan penelitian yang ingin dicapai.

C. Kerangka Alir Penelitian

Untuk menyukseskan penelitian, maka dibuat alur penelitian sebagai acuan agar proses penelitian tetap terstruktur dan agar terhindar dari faktor-faktor atau tahapan yang dapat mengakibatkan kegagalan pada penelitian yang dilakukan. Berikut kerangka alir penelitian yang digunakan pada tugas akhir kali ini :



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

D. Material

D.1 Tanah Asli

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini, seperti pada gambar 4, yakni tanah sedimen yang berlokasi di Bendungan Bili-Bili, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Warna tanah yaitu abu-abu dan berbutir halus.



Gambar 4. Tanah Asli

D.2 Bakteri Bacillus Subtilis

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bakteri Bacillus Subtilis yang dikembangbiakkan sendiri dengan uji kultur pertumbuhan bakteri untuk mengetahui sifat pertumbuhan suatu jenis bakteri melalui kurva pertumbuhan yang ditandai dengan kekeruhan pada media cair dengan bantuan alat penggoyang (shaker) dan incubator yang dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Bakteri Bacillus Subtilis

E. Standar Pengujian

Nilai-nilai karakteristik dasar material yang digunakan pada penelitian ini diuji berdasarkan acuan pada standar-standar yang dikeluarkan oleh ASTM, seperti yang ditunjukkan pada tabel 6, berikut :

Tabel 6. Standar Pengujian

Jenis Pengujian	Standar Pengujian
Kadar Air	D2216 - 98
Berat Jenis	D854 – 14
Batas-batas Atterberg	D4318-05, D4943-08
Analisa Saringan dan Hidrometer	D422 – 63
Kompaksi	D698 – 07
Geser Langsung	D3080

F. Pengujian Sampel

Pengujian sampel terbagi menjadi 2 jenis pengujian, yaitu pengujian sifat fisis dan sifat mekanis tanah dengan bahan stabilisasi Bakteri *Bacillus Subtilis*.

F.1 Uji Sifat Fisis

Uji sifat fisis pada tanah bertujuan untuk menentukan index properties yang diperlukan dalam klasifikasi dan penentuan bahan stabilisasi serta komposisi bahan stabilisasi dan pengaruhnya terhadap tanah yang digunakan. Pada penelitian kali ini uji sifat fisis yang dilakukan pada tanah asli yaitu pengujian kadar air, berat jenis, analisa saringan dan hydrometer, dan batas-batas Atterberg.

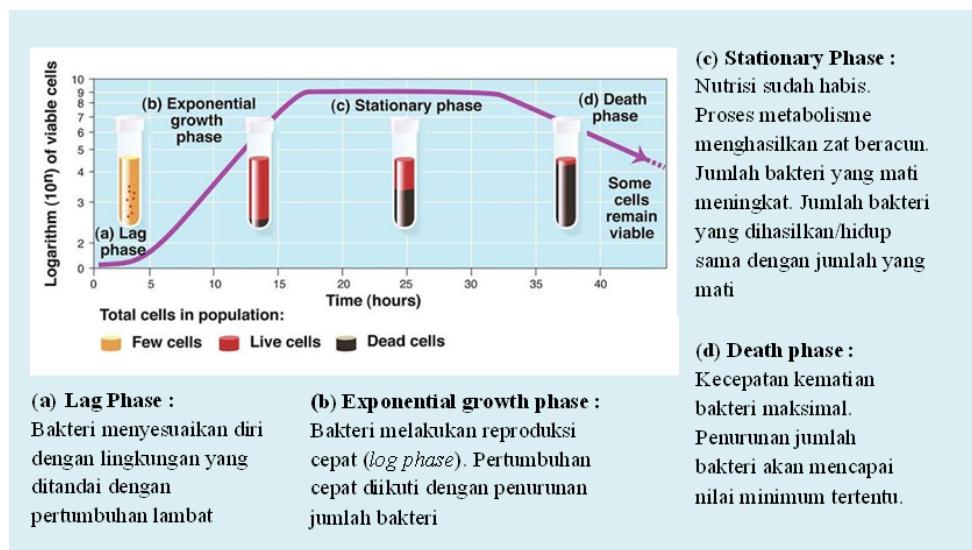
F.2 Uji Sifat Mekanis

Pengujian sifat mekanis tanah bertujuan untuk mengetahui perilaku tanah atau ketahanan suatu tanah yang telah diberi bahan stabilisasi terhadap tekanan atau beban yang diberikan, uji sifat mekanis tanah merupakan parameter yang dapat dilihat untuk mengetahui daya dukung tanah. Uji sifat mekanis yang dilakukan pada penelitian kali ini adalah pengujian kompaksi dan geser langsung (Direct Shear).

G. Proses Pembuatan

G.1 Proses Pembuatan Bakteri *Bacillus Subtilis*

Fase-fase pertumbuhan bakteri disajikan dalam kurva pertumbuhan bakteri seperti yang terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Kurva pertumbuhan bakteri

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini adalah Bakteri *Bacillus subtilis* yang di inokulasi dengan lama inkubasi 24 jam. Tahap-tahap inokulasi adalah sebagai berikut,:

1. Menyiapkan medium nutrient agar (NA) miring yang akan ditanami bakteri
2. Menyiapkan biakan murni yang akan dikembangkan
3. Menyiapkan jarum ose dan lampu Bunsen
4. Mengambil biakan murni bakteri secara aseptis
5. Menginokulasikan pada medium agar miring dengan menggesekkan jarum ose yang sudah ada bakterinya ke permukaan medium agar-

agar miring dari bagian bawah tabung reaksi menuju ke atas atau mulut tabung reaksi

6. Menggesekkan jarum ose dilakukan secara zigzag supaya hasil penanaman kelihatan lebih jelas
7. Memanaskan lagi jarum ose yang telah digunakan untuk mensterilkan dari bakteri dan mikroorganisme lainnya
8. Menginkubasi hasil inokulasi pada suhu kamar 37°C (derajat celcius) selama 24 jam

Bakteri ditambahkan dengan CaCl_2 dan urea sebagai nutrisi pada bakteri, yang dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Urea dan CaCl_2

G.2 Proses Pembuatan Benda Uji

Benda uji dibuat untuk digunakan dalam pengujian mekanis tanah yaitu geser langsung (direct shear), tanah yang telah disiapkan dicampur menggunakan bakteri dengan persentase bakteri terhadap tanah asli sebesar 4%, 6%, 8%, 10%, dan 12%. Kemudian dicetak kedalam ring sampel geser langsung dan dibiarkan dalam suhu ruang dengan masa pemeraman

yaitu 0, 3, 7, 14, 21, dan 28 Hari. Setelah masa pemeraman berakhir, sampel kemudian dikeluarkan dari ring pencetak dan diuji dengan alat uji geser langsung.

H. Proses Pencampuran Sampel

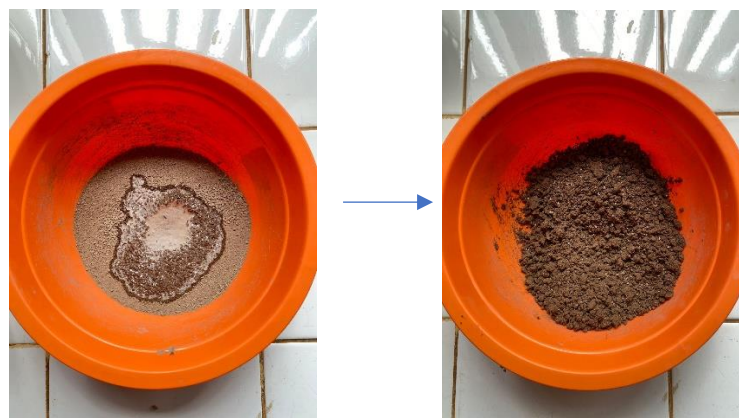
Pencampuran sampel dilakukan dengan mengacu terhadap berat isi kering maksimum dan kadar air optimum dari hasil kompaksi tanah asli. Berikut tahapan pencampuran tanah sedimen dengan campuran Bakteri *Bacillus Subtilis*

1. Menyiapkan tanah sedimen dengan berat tertentu sesuai dengan perhitungan kebutuhan campuran pada sebuah wadah.
2. Menyiapkan campuran bakteri yang telah ditambahkan urea dan CaCl pada sebuah wadah sesuai dengan perhitungan persentase yang akan digunakan, yang dapat dilihat pada gambar 8 berikut :



Gambar 8. Campuran Bakteri *Bacillus Subtilis*

3. Menyiapkan air sebagai salah satu bahan campuran sesuai dengan kadar air optimum yang dikurangkan dengan persentase campuran bakteri.
4. Mencampurkan air, tanah dan campuran bakteri bacillus subtilis dan diaduk dengan hati-hati hingga campuran merata (homogen), seperti pada gambar 9 dibawah ini :



Gambar 9. Campuran tanah sedimen, bakteri, dan air

5. Meletakkan campuran tanah sedimen, bakteri bacillus subtilis dan air tadi pada ring pencetak, seperti pada gambar 10 dibawah ini :



Gambar 10. Sampel dalam ring pencetak

6. Memadatkan campuran sampel menggunakan pemadatan statis (hidrolik)
7. Sampel yang telah selesai dicetak, kemudian diperam pada suhu ruangan, dan siap untuk diuji geser langsung, seperti yang dapat dilihat pada gambar 11 :



Gambar 11. Sampel yang sudah dicetak

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Asli

Pengujian karakteristik fisis dan mekanis tanah yang digunakan diperlukan untuk mengetahui klasifikasi jenis tanah yang digunakan pada penelitian, Adapun berdasarkan pengujian yang dilakukan di laboratorium diperoleh data sebagai berikut :

A.1 Karakteristik Sifat Fisis Tanah

1. Kadar Air

Berdasarkan hasil pemeriksaan nilai kadar air tanah, didapatkan nilai kadar air untuk tanah asli yang digunakan pada penelitian yaitu sebesar 14,6%.

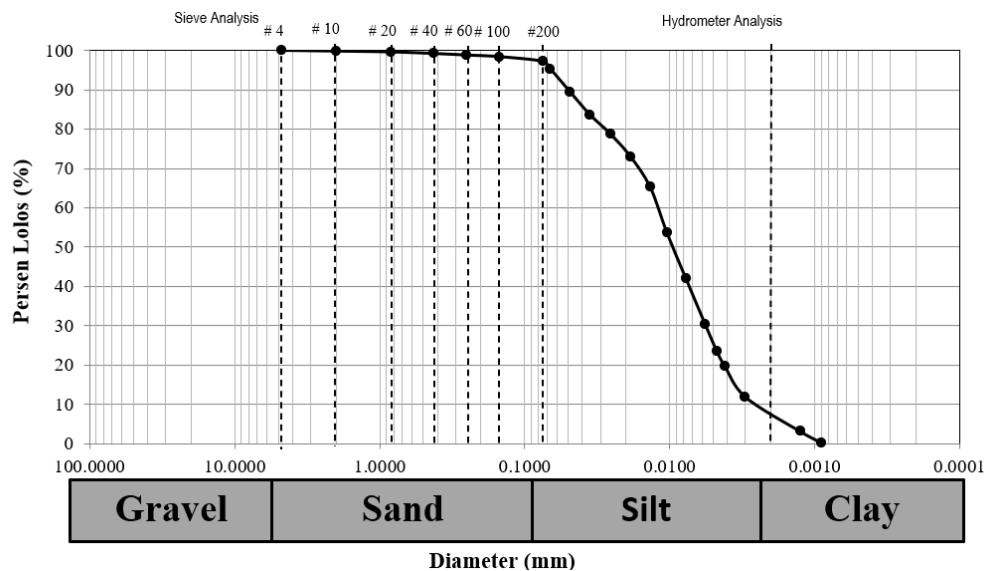
2. Berat Jenis

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis tanah asli, didapatkan nilai berat jenis untuk tanah sedimen Bendungan Bili-bili yaitu sebesar 2,66. Sehingga berdasarkan tabel spesifikasi pembagian berat jenis berdasarkan jenis tanah, maka sampel tanah tersebut tergolong sebagai Lanau Anorganik, dengan spesifikasi nilai berat jenis berada pada rentang 2,62-2,68.

2. Analisa Saringan dan Hidrometer

Pemeriksaan persentase butir tanah dapat dilakukan dengan pengujian Analisa saringan dan hydrometer. Hasil dari pengujian ini dapat menampilkan klasifikasi tanah yang digunakan. Dari hasil pengujian didapatkan persentase butir tanah untuk Kerikil sebesar 0,20%, Pasir 2,60%, Lanau 94%, dan Lempung 3,20%. Dari hasil tersebut dapat

diketahui bahwa tanah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu tanah lanau. Berikut grafik hasil pengujian Analisa saringan dan hydrometer yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik persentase ukuran butir tanah asli

3. Batas-batas Atterberg

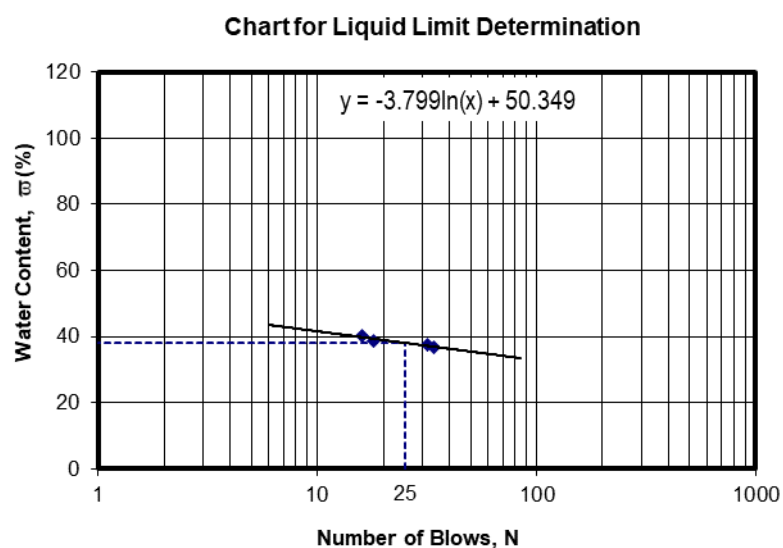
Pengujian batas-batas Atterberg dilakukan untuk mengetahui sifat tanah terhadap perubahan kadar air yang diberikan. Pengujian ini meliputi pengujian Batas Cair, Batas Plastis, dan Batas Susut. Dari hasil pengujian didapatkan hasil sebagai berikut :

a. Nilai Batas Plastis

Batas plastis merupakan kadar air terendah dimana tanah mulai bersifat plastis. Nilai batas plastis yang didapatkan yaitu sebesar 28,8%.

b. Nilai Batas Cair

Batas cair merupakan kadar air tertentu dimana terjadi perubahan perilaku tanah yang berubah dari keadaan plastis ke keadaan cair. Nilai batas cair yang diperoleh dari hasil pengujian adalah 38,1%. Adapun grafik hasil pengujian batas cair dapat dilihat pada Gambar 13 di bawah ini :



Gambar 13. Grafik hasil pengujian batas cair tanah asli

Batas susut adalah batas kadar air dimana tanah dengan kadar air dibawah dari nilai kadar air yang diperoleh tidak menyebabkan terjadinya perubahan volume (susut) lagi pada tanah. Nilai batas susut yang didapatkan yaitu sebesar 8,6%.

c. Nilai indeks plastisitas

Indeks plastisitas merupakan nilai selisih antara batas cair dan batas plastis. Dari hasil pengujian didapatkan nilai indeks plastisitas yaitu sebesar 9,3%.

4. Klasifikasi Tanah Asli

Dari hasil pengujian sifat fisis tanah asli yang digunakan dalam penelitian, maka berikut hasil penggolongan tanah sedimen Bendungan Bili-bili Kabupaten Gowa :

a. *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO)

Dari hasil pengujian Analisa saringan dan hydrometer serta batas-batas Atterberg, diperoleh persentase butir tanah asli lolos saringan No.200 yaitu sebesar 97,2%. Nilai batas cair sebesar 38,1%, dan indeks plastisitas sebesar 9,3%.

Dari nilai-nilai yang telah didapatkan, maka dapat ditentukan tipe tanah berdasarkan penggolongan sistem AASHTO. Penentuan tipe tanah yang dimaksud dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini :

Tabel 7. Klasifikasi tanah untuk lapisan tanah dasar jalan raya (Sistem Klasifikasi AASHTO)

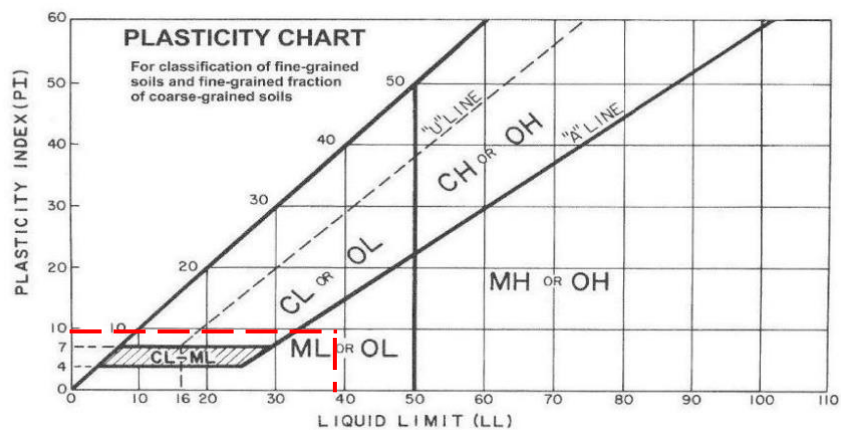
Klasifikasi Tanah	Lolos Saringan No.200	Batas Cair*	Indeks PLastisitas	Tipe Material	Penilaian sebagai tanah dasar
A-4	Min. 36	Maks. 40	Maks. 10	Tanah Berlanau	Biasa sampai Buruk
A-5	Min. 36	Min. 41	Maks. 10	Tanah Berlanau	Biasa sampai Buruk
A-6	Min. 36	Maks 40.	Min. 11	Tanah Berlempung	Biasa sampai Buruk
A-7	A-7-5	Min. 36	Min. 11 Dan PL≤LL-30	Tanah Berlempung	Biasa sampai Buruk
	A-7-6	Min. 36	Min. 11 Dan PL>LL-30	Tanah Berlempung	Biasa sampai Buruk

Berdasarkan tabel diatas, dengan mengacu pada data yang diperoleh, maka tanah asli termasuk dalam golongan A-4, yaitu tanah tergolong tanah berlanau.

b. *Unified Soil Classification System (USCS)*

Dengan menghubungkan nilai batas plastis maupun nilai indeks plastisitas, maka didapatkan tipe tanah yang diuji termasuk golongan ML (*Milt with low plasticity*) yang artinya tanah lanau dengan plastisitas rendah.

Sehingga didapatkan hubungan yang menunjukkan nilai batas cair dan indeks plastisitas tanah untuk menentukan penggolongan jenis tanah. Hubungan yang menunjukkan nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 14.



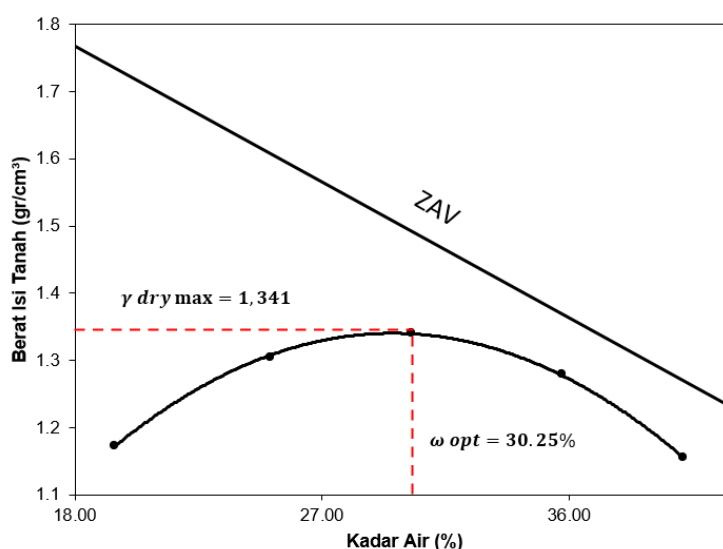
Gambar 14. Penggolongan Klasifikasi Tanah Asli menurut Sistem USCS

A.2 Karakteristik Sifat Mekanis Tanah

1. Kompaksi (Uji Pemadatan)

Pengujian kompaksi merupakan pengujian untuk mendapatkan nilai kepadatan tanah maksimum dengan energi standar sehingga dapat diketahui nilai berat isi kering maksimum dan kadar air optimum dari sampel penelitian.

Pada pengujian ini, dilakukan kompaksi dengan metode kepadatan standar (*standard proctor compaction*), yaitu dengan cara memasukkan tanah kedalam cetakan (*mould*) dan dipadatkan menggunakan alat pemadat standar. Pemadatan dilakukan sebanyak 25 kali tumbukan pada tiap 3 lapisan tanah. Berikut merupakan grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi tanah kering pada sampel tanah asli yang dapat dilihat pada Gambar 15 dibawah ini :



Gambar 15. Grafik hubungan kadar air dengan berat isi kering hasil kompaksi pada tanah asli

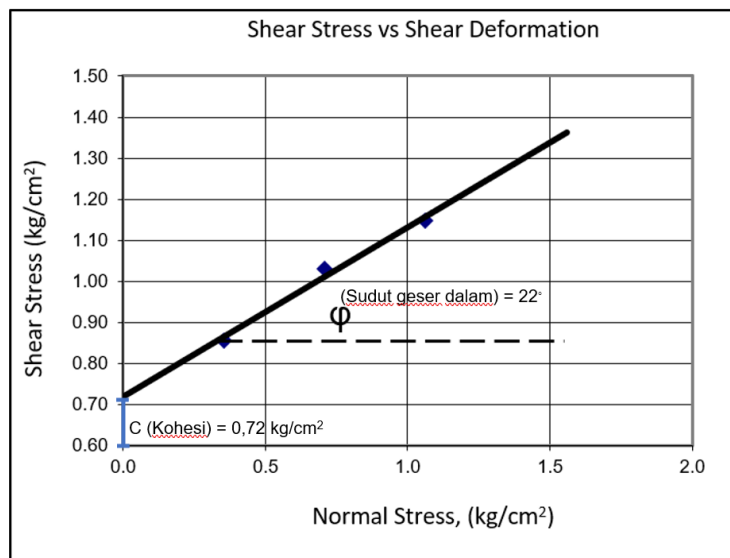
Berdasarkan hasil pengujian kompaksi, diperoleh nilai berat isi kering maksimum yaitu sebesar $1,34 \text{ gr/cm}^3$ yang dicapai pada kadar air optimum sebesar 30,25%.

Tujuan dari pengujian kompaksi adalah untuk meningkatkan berat volume tanah, yang berarti meningkatkan kekuatan tanah dalam mendukung beban di atasnya, meningkatkan stabilitas pada lereng, dan mengurangi pemampatan tanah.

2. Uji Geser Langsung (*Direct Shear*)

Pengujian geser langsung dilakukan untuk mengetahui nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah sebagai parameter daya dukung tanah. Pengujian dilakukan dengan 3 kali percobaan pembebanan, yaitu sebesar 10, 20, dan 40 kg. Dari hasil pengujian didapatkan nilai kohesi pada tanah asli sebesar $0,72 \text{ kg/cm}^2$ dan sudut geser dalam tanah sebesar 22° .

Adapun berikut grafik hubungan tegangan geser dan deformasi sehingga mendapatkan nilai sudut geser dalam yang dapat dilihat pada Gambar 16 dibawah ini :



Gambar 16. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisis dan mekanis tanah asli di laboratorium, berikut rekapitulasi hasil-hasil pengujian yang dapat dilihat pada tabel 8 di bawah ini :

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Tanah Asli

No	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian
Karakteristik Sifat Fisis Tanah Asli			
1.	Kadar Air Tanah	%	14,6
2.	Berat Jenis Tanah	-	2,66
3.	Analisa Saringan dan Hidrometer		
	Kerikil	(%)	0,20
	Pasir	(%)	2,60
	Lanau	(%)	94
	Lempung	(%)	3,20
4.	Batas-batas Atterberg		
	Batas Cair	(%)	38,1

Batas Plastis	(%)	28,8
Indeks Plastisitas	(%)	9,3
Batas Susut	(%)	8,6
Klasifikasi		
AASHTO		A – 4
USCS		ML
Karakteristik Sifat Mekanis		
5. Pematatan (Kompaksi)		
Berat Isi Kering Maksimum	gr/cm ³	1,34
Kadar Air Optimum	(%)	30,25
6. Geser Langsung (Direct Shear)		
Kohesi	kg/cm ²	0,72
Sudut Geser Dalam	°	22

B. Karakteristik Hasil Pengujian Geser Langsung terhadap Penambahan Kultur Murni Mikroba (Bakteri *Bacillus Subtilis*) pada Tanah Sedimen.

Pencampuran dilakukan terhadap tanah asli yaitu tanah sedimen Bendungan Bili-bili Kabupaten Gowa dengan Kultur Murni Mikroba (Bakteri *Bacillus Subtilis*), penambahan bakteri pada tanah dilakukan sebagai metode stabilisasi ramah lingkungan, dan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap perubahan nilai daya dukung tanah, dalam hal ini yaitu perubahan nilai kohesi dan sudut geser tanah melalui percobaan uji geser langsung. Variasi penambahan bakteri pada tanah sedimen yaitu sebesar 4,6,8,10, dan 12%. Kemudian dilakukan pemeraman untuk mengetahui pengaruh masa pemeraman sampel uji terhadap perubahan nilai kohesi dan sudut

gesernya melalui uji geser langsung (Direct Shear). Berikut hasil dari perubahan nilai tegangan normal terhadap nilai tegangan geser pada tiap variasi penambahan dan masa pemeraman :

Tabel 9. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 0 Hari

No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	0,97	1,10	1,43
2.	6%				1,06	1,21	1,55
3.	8%				1,25	1,45	1,77
4.	10%				1,08	1,23	1,57
5.	12%				1,04	1,20	1,51

Tabel 10. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 3 Hari

No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	0,99	1,10	1,47
2.	6%				1,17	1,51	1,73
3.	8%				1,42	1,68	1,98
4.	10%				1,36	1,52	1,89
5.	12%				1,20	1,45	1,70

Tabel 11. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 7 Hari

No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	1,04	1,32	1,57
2.	6%				1,30	1,69	1,88
3.	8%				1,60	1,88	2,18
4.	10%				1,36	1,72	1,94
5.	12%				1,27	1,73	1,84

Tabel 12. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 14 Hari

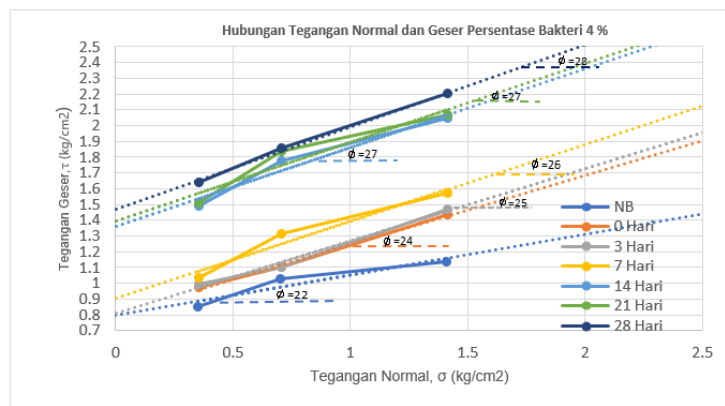
No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	1,49	1,78	2,05
2.	6%				1,61	1,84	2,18
3.	8%				1,68	1,90	2,28
4.	10%				1,65	1,89	2,22
5.	12%				1,63	1,80	2,17

Tabel 13. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 21 Hari

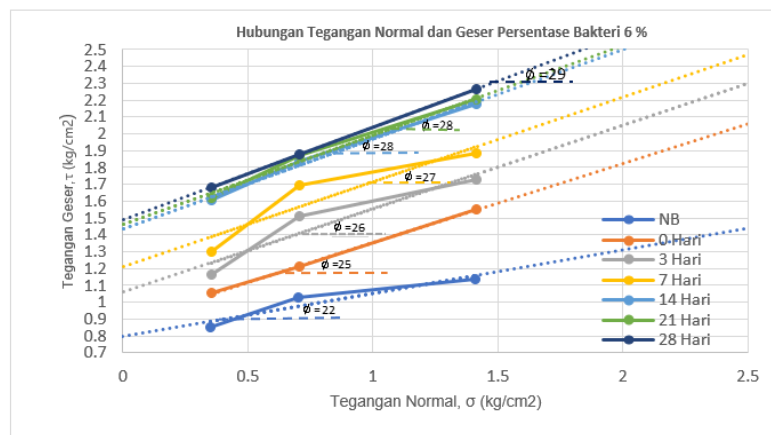
No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	1,51	1,83	2,07
2.	6%				1,62	1,87	2,20
3.	8%				1,72	1,95	2,34
4.	10%				1,66	1,94	2,27
5.	12%				1,64	1,90	2,22

Tabel 14. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dengan variasi penambahan bakteri dengan masa pemeraman 28 Hari

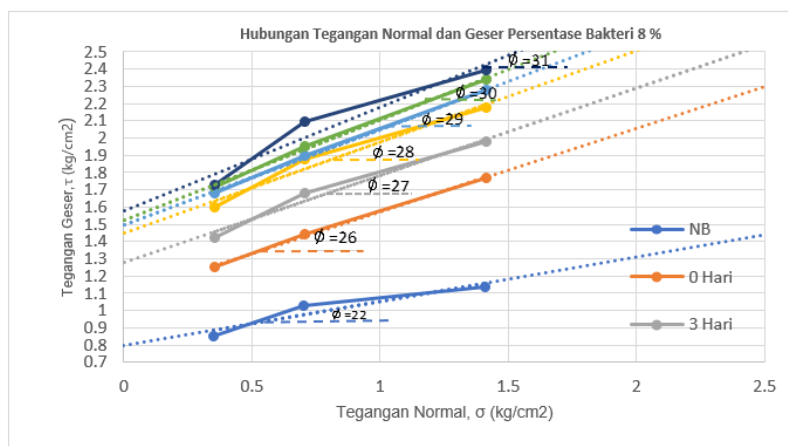
No	Variasi Penambahan Bakteri	Tegangan Normal (kg/cm ²)			Tegangan Geser (kg/cm ²)		
		1	2	3	1	2	3
1.	4%	0,35	0,71	1,41	1,64	1,86	2,20
2.	6%				1,68	1,88	2,27
3.	8%				1,73	2,09	2,39
4.	10%				1,69	2,07	2,33
5.	12%				1,61	2,05	2,24



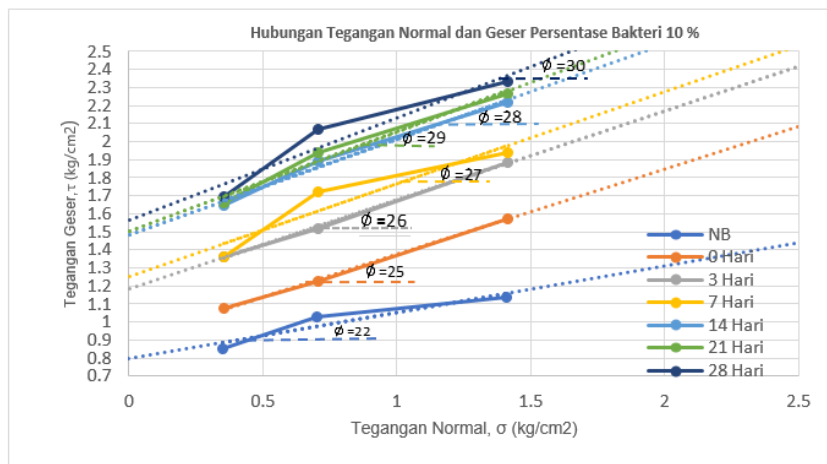
Gambar 17. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 4% pada tiap masa pemeraman



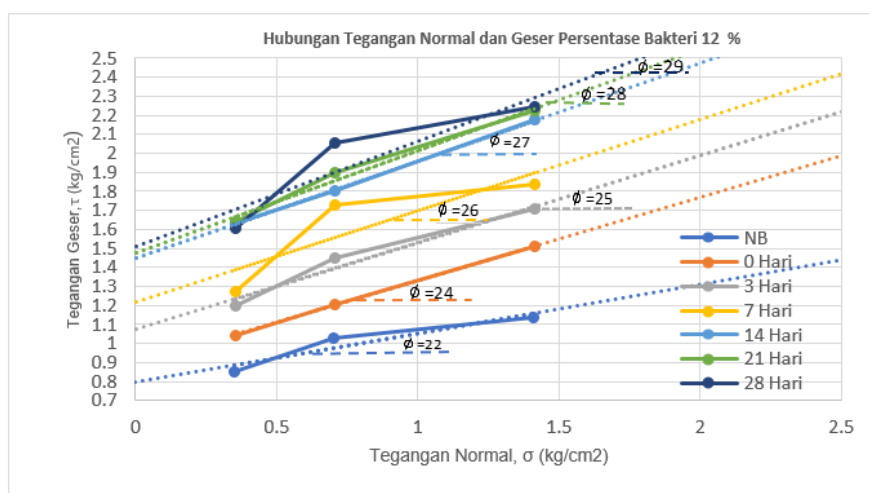
Gambar 18. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 6% pada tiap masa pemeraman



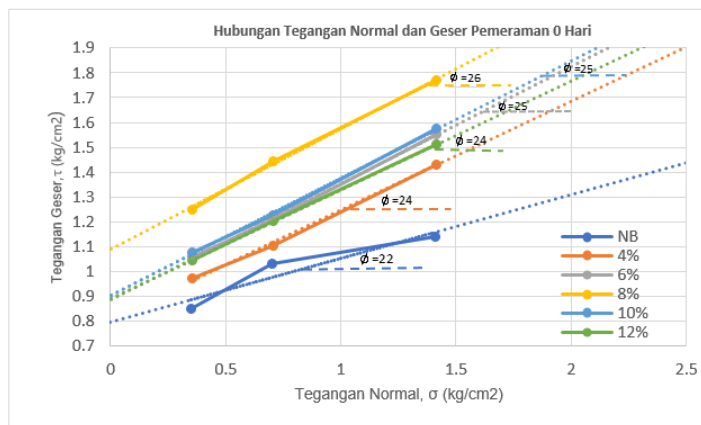
Gambar 19. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 8% pada tiap masa pemeraman



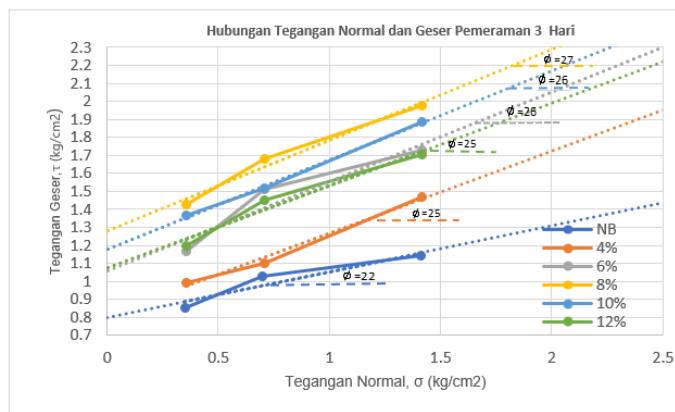
Gambar 20. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 10% pada tiap masa pemeraman



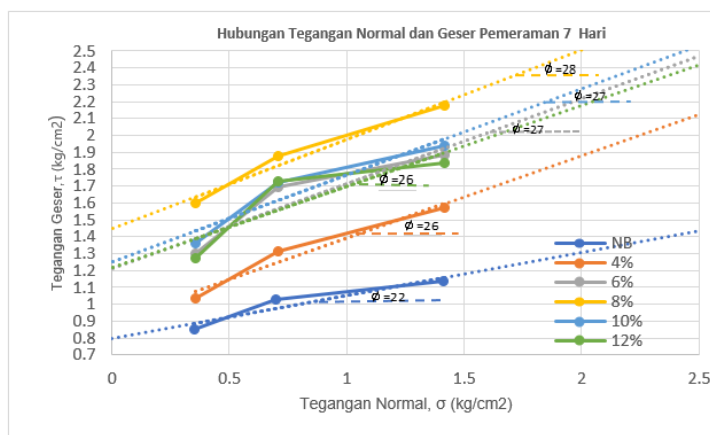
Gambar 21. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser terhadap penambahan bakteri 12% pada tiap masa pemeraman



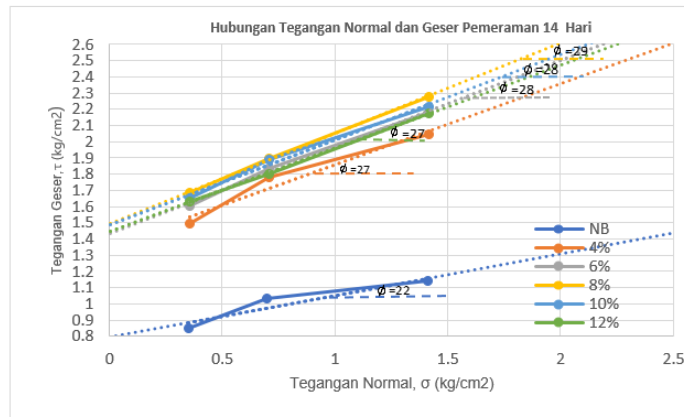
Gambar 22. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 0 hari



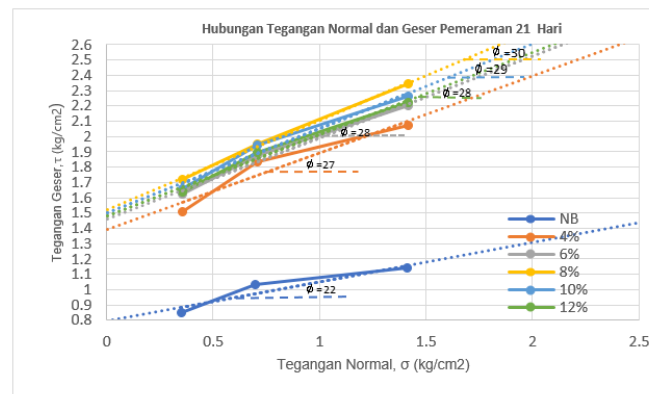
Gambar 23. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 3 hari



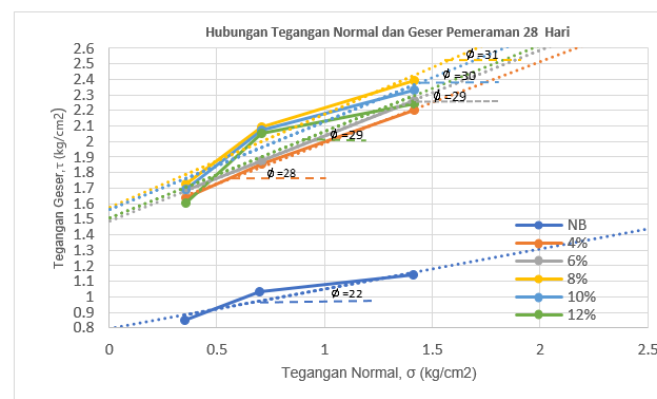
Gambar 24. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 7 hari



Gambar 25. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 14 hari



Gambar 26. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 21 hari



Gambar 27. Grafik hubungan tegangan normal dan tegangan geser masa pemeraman 28 hari

Dapat dilihat dari grafik perubahan tegangan geser pada tiap variasi penambahan bakteri dengan tiap masa pemeraman, terlihat bahwa kenaikan tertinggi terdapat pada variasi penambahan bakteri sebanyak 8% dan terus meningkat seiring bertambahnya masa pemeraman.

Selain meningkatkan tegangan geser pada tanah, penambahan bakteri juga terbukti meningkatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah yang dapat dilihat pada tabel dan grafik di bawah ini :

Tabel 15. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 0 hari.

Masa Pemeraman 0 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	0,81	24
2.	6%	0,88	25
3.	8%	1,09	26
4.	10%	0,90	25
5.	12%	0,89	24

Tabel 16. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 3 hari.

Masa Pemeraman 3 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	0,81	25
2.	6%	1,06	26
3.	8%	1,28	27
4.	10%	1,18	26
5.	12%	1,07	25

Tabel 17. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 7 hari.

Masa Pemeraman 7 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	0,91	26
2.	6%	1,21	27
3.	8%	1,45	28
4.	10%	1,25	27
5.	12%	1,22	26

Tabel 18. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 14 hari.

Masa Pemeraman 14 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	1,36	27
2.	6%	1,44	28
3.	8%	1,49	29
4.	10%	1,48	28
5.	12%	1,45	27

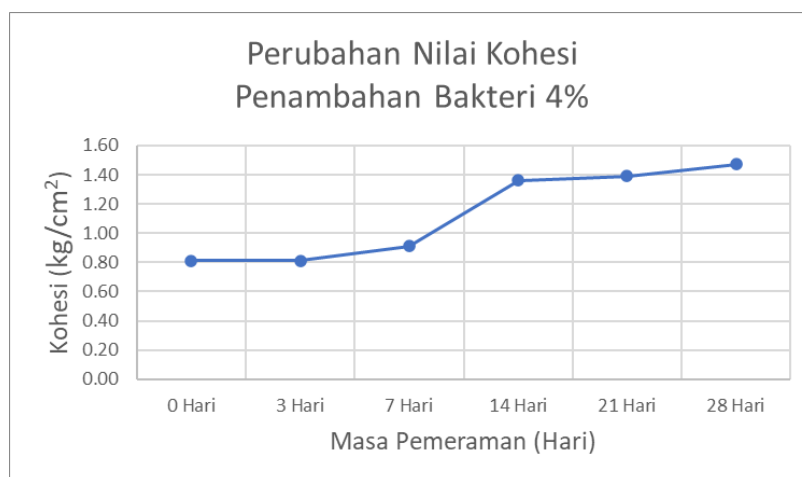
Tabel 19. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 21 hari.

Masa Pemeraman 21 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	1,39	27
2.	6%	1,46	28
3.	8%	1,52	30
4.	10%	1,50	29
5.	12%	1,48	28

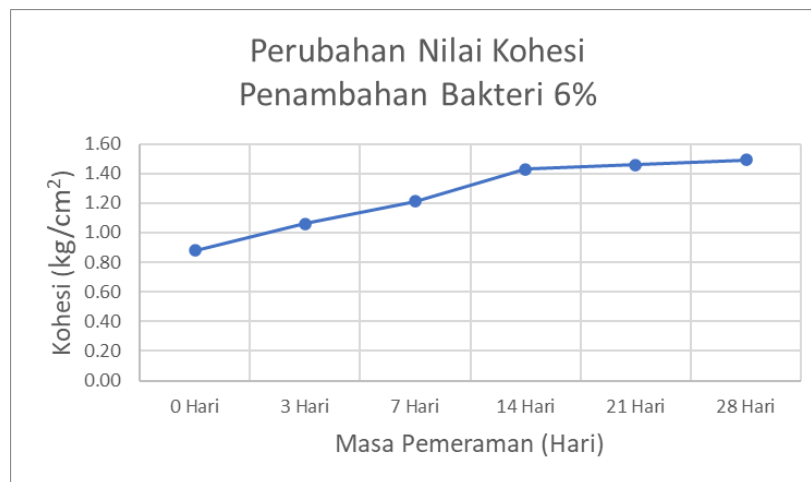
Tabel 20. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah pada tiap variasi penambahan bakteri masa pemeraman 28 hari.

Masa Pemeraman 28 Hari			
No.	Variasi Penambahan	Kohesi (kg/cm ²)	Sudut Geser Dalam (°)
1.	4%	1,47	28
2.	6%	1,49	29
3.	8%	1,57	31
4.	10%	1,56	30
5.	12%	1,51	29

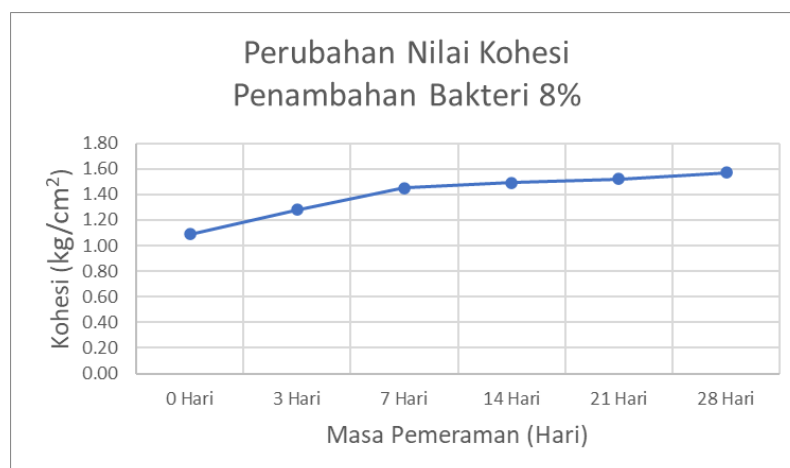
Berikut grafik perubahan nilai kohesi terhadap tiap penambahan variasi campuran bakteri pada tiap masa pemeraman yang dapat dilihat pada kumpulan grafik dibawah ini :



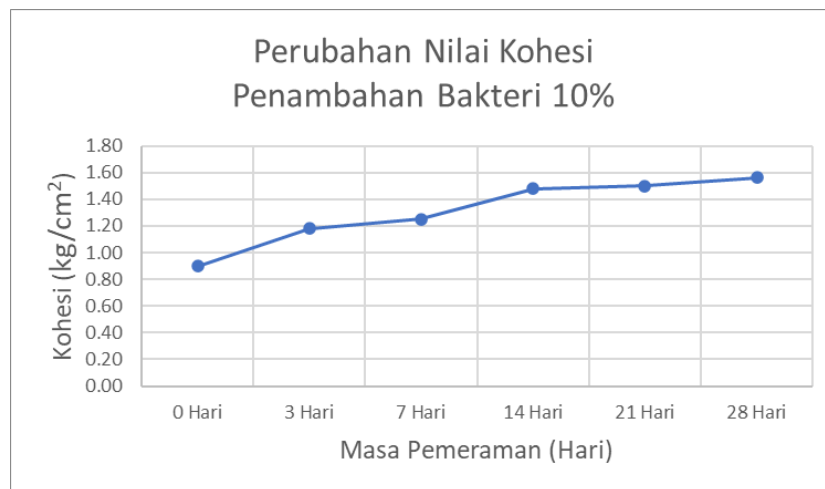
Gambar 28. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 4% tiap masa pemeraman



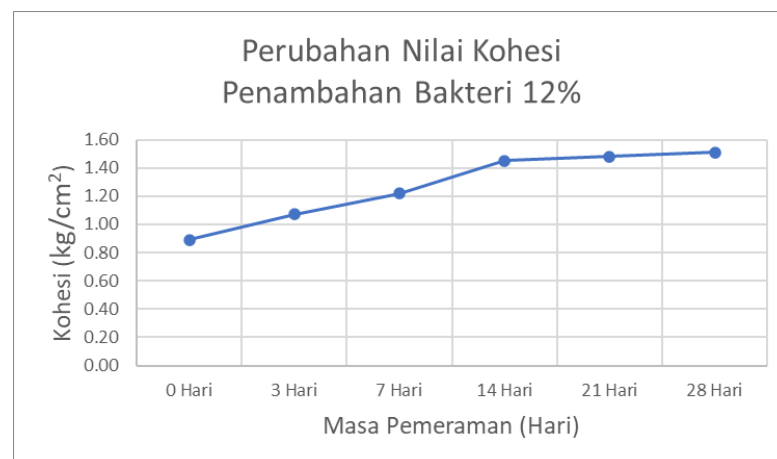
Gambar 29. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 6% tiap masa pemeraman



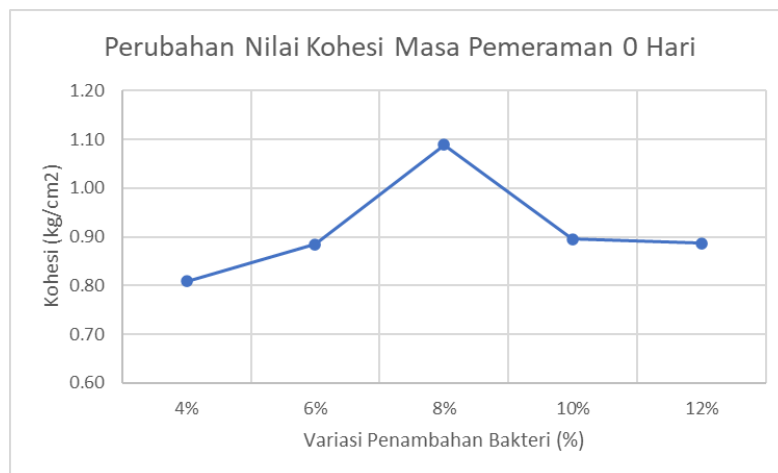
Gambar 30. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 8% tiap masa pemeraman



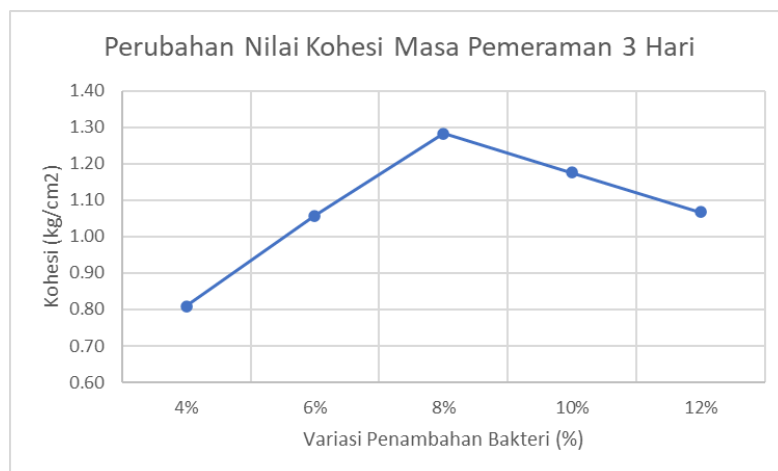
Gambar 31. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 10% tiap masa pemeraman



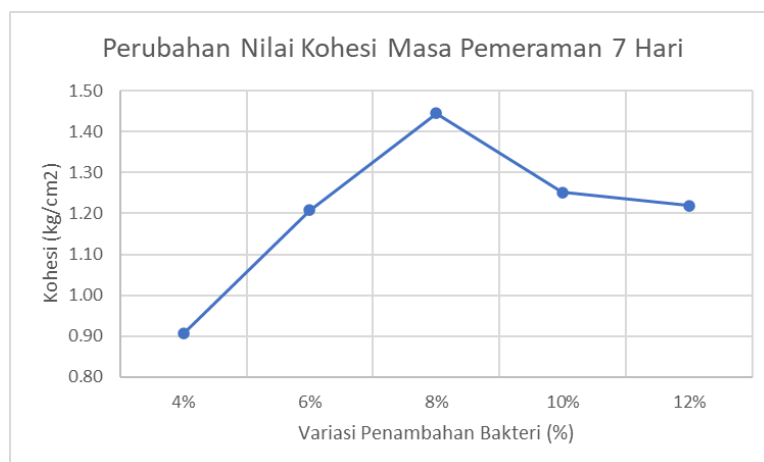
Gambar 32. Grafik perubahan nilai kohesi pada penambahan bakteri 12% tiap masa pemeraman



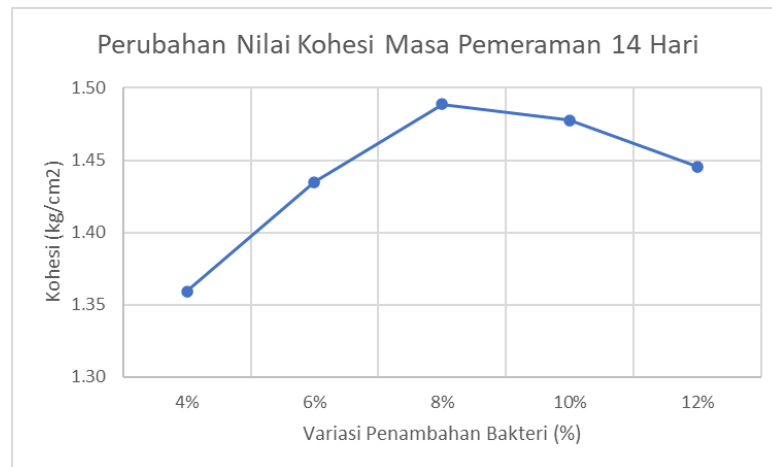
Gambar 33. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 0 hari



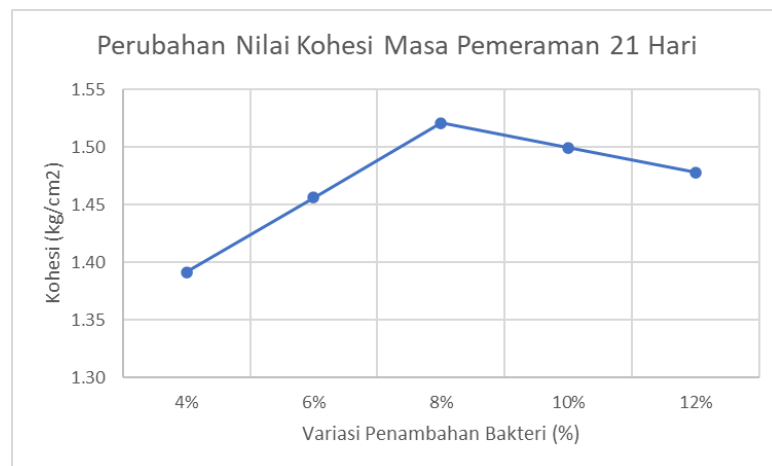
Gambar 34. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 3 hari



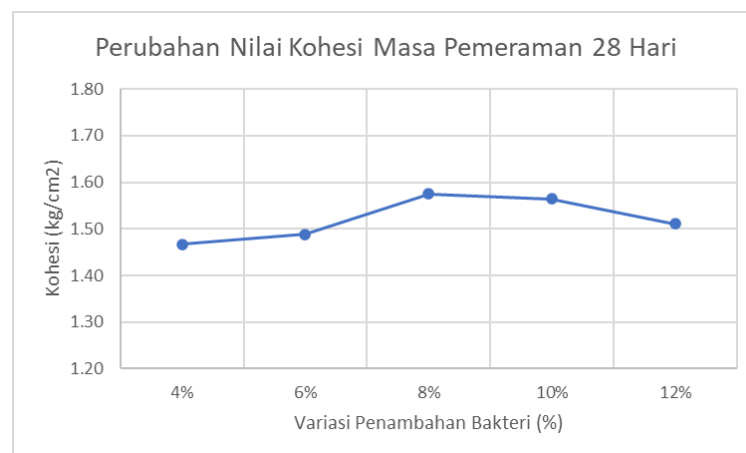
Gambar 35. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 7 hari



Gambar 36. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 14 hari

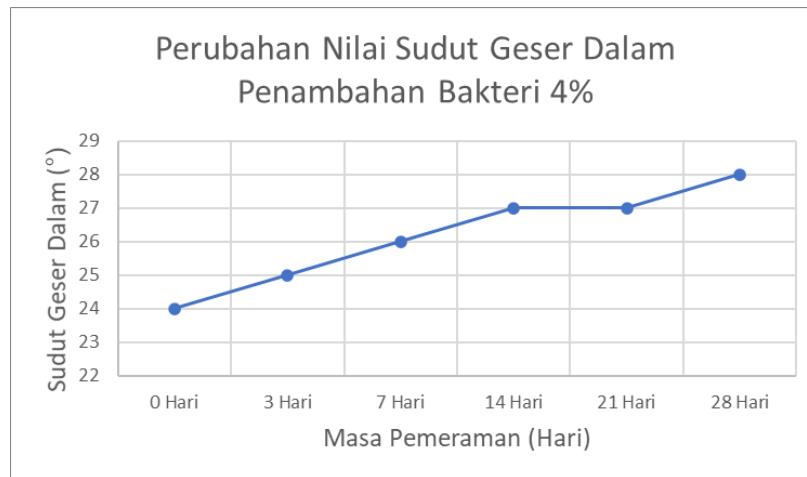


Gambar 37. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 21 hari

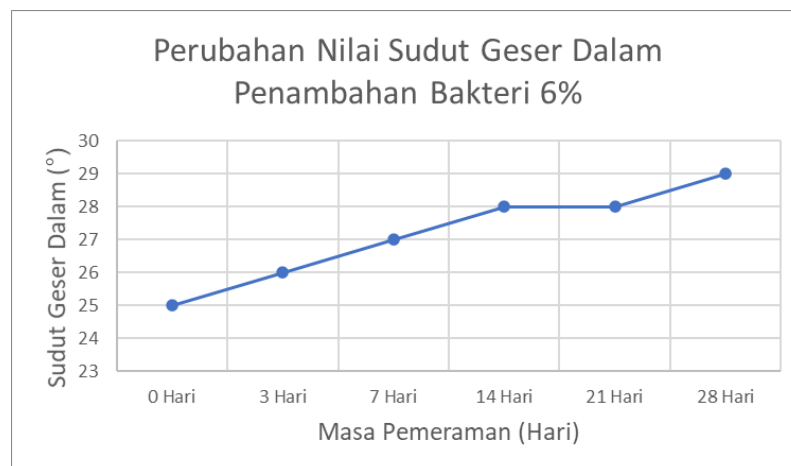


Gambar 38. Grafik perubahan nilai kohesi masa pemeraman 28 hari

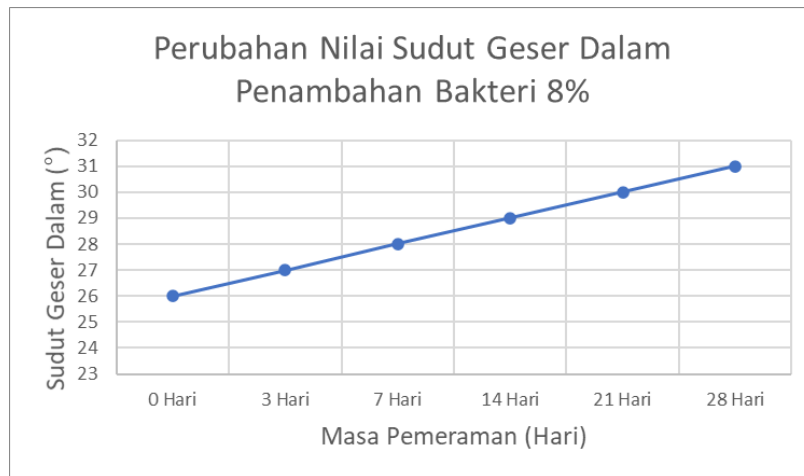
Berikut grafik perubahan nilai sudut geser dalam tanah terhadap tiap penambahan variasi campuran bakteri pada tiap masa pemeraman yang dapat dilihat pada kumpulan grafik dibawah ini :



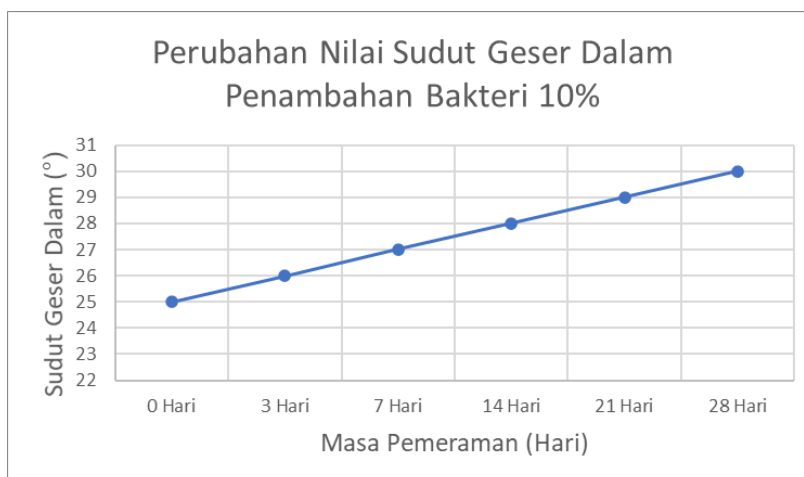
Gambar 39. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 4% tiap masa pemeraman



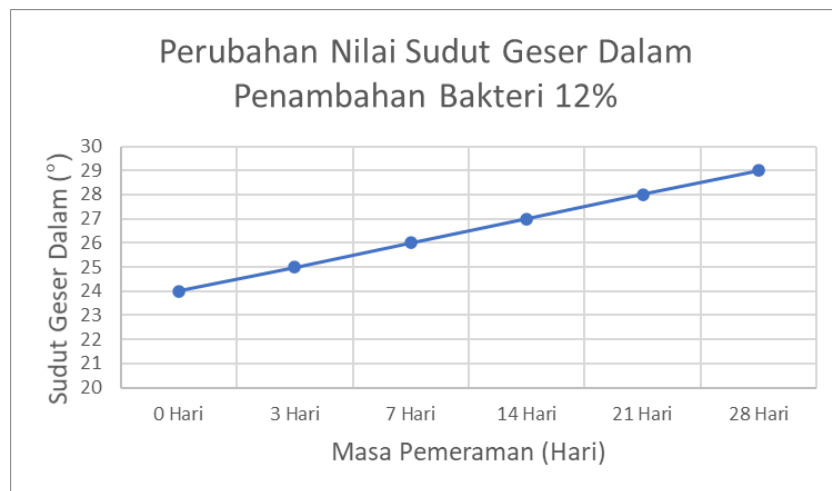
Gambar 40. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 6% tiap masa pemeraman



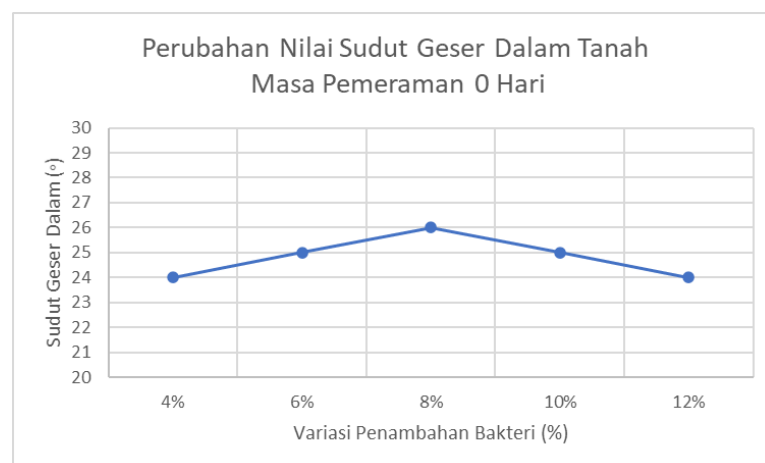
Gambar 41. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 8% tiap masa pemeraman



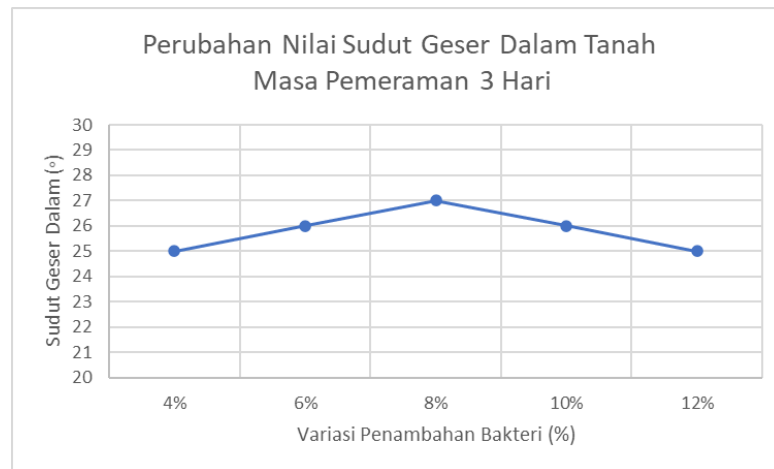
Gambar 42. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 10% tiap masa pemeraman



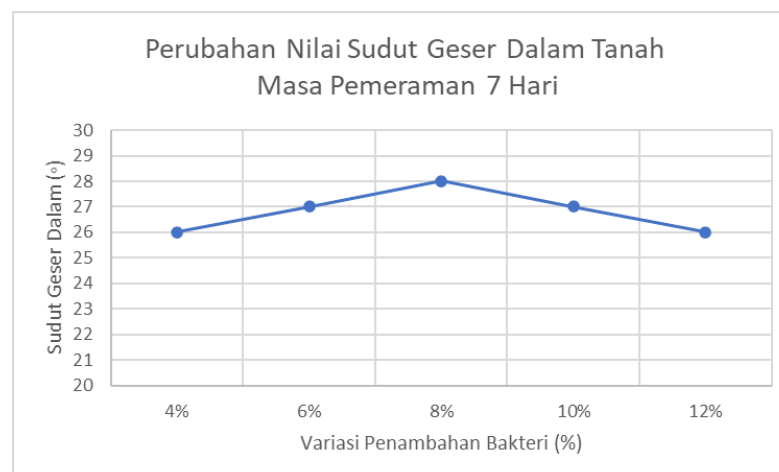
Gambar 43. Perubahan nilai sudut geser pada penambahan bakteri 12% tiap masa pemeraman



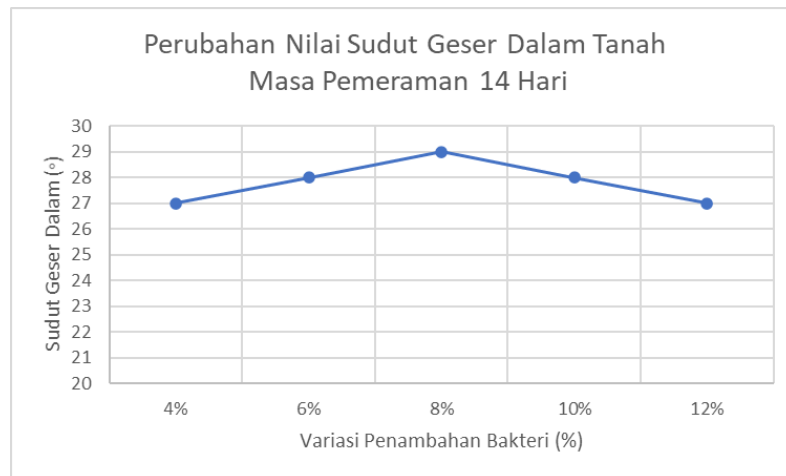
Gambar 44. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 0 hari



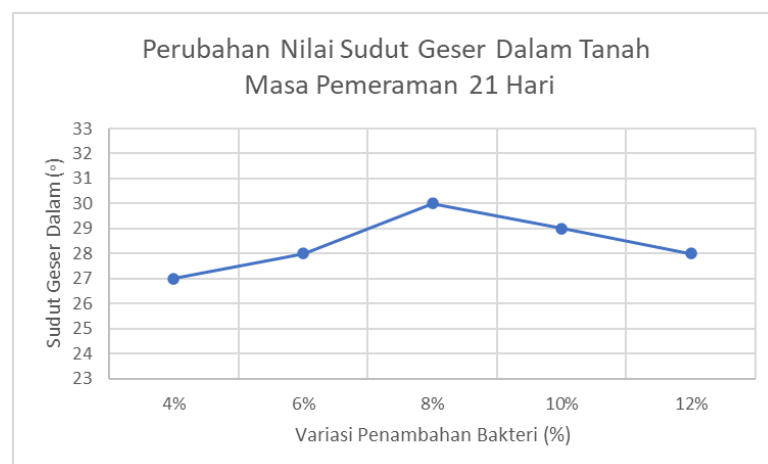
Gambar 45. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 3 hari



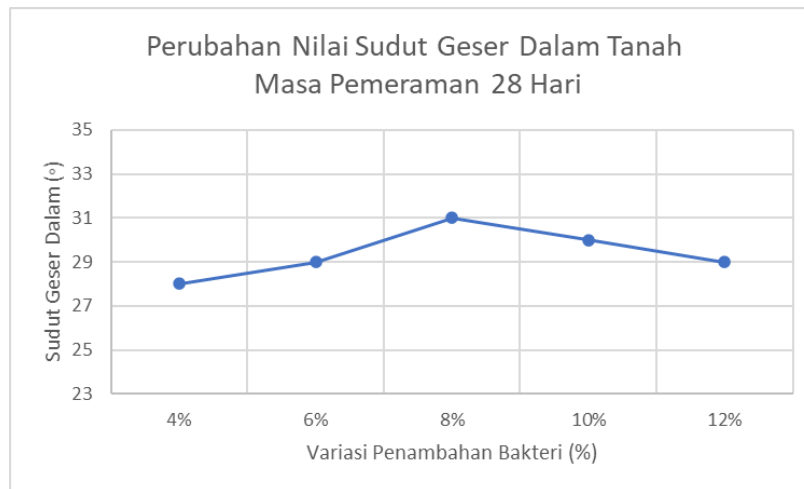
Gambar 46. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 7 hari



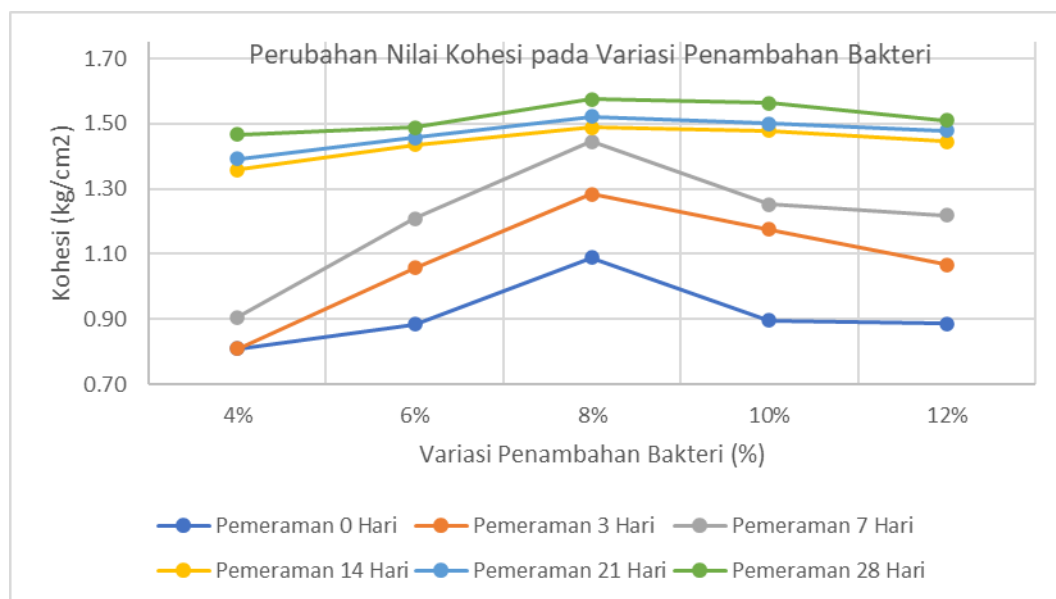
Gambar 47. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 14 hari



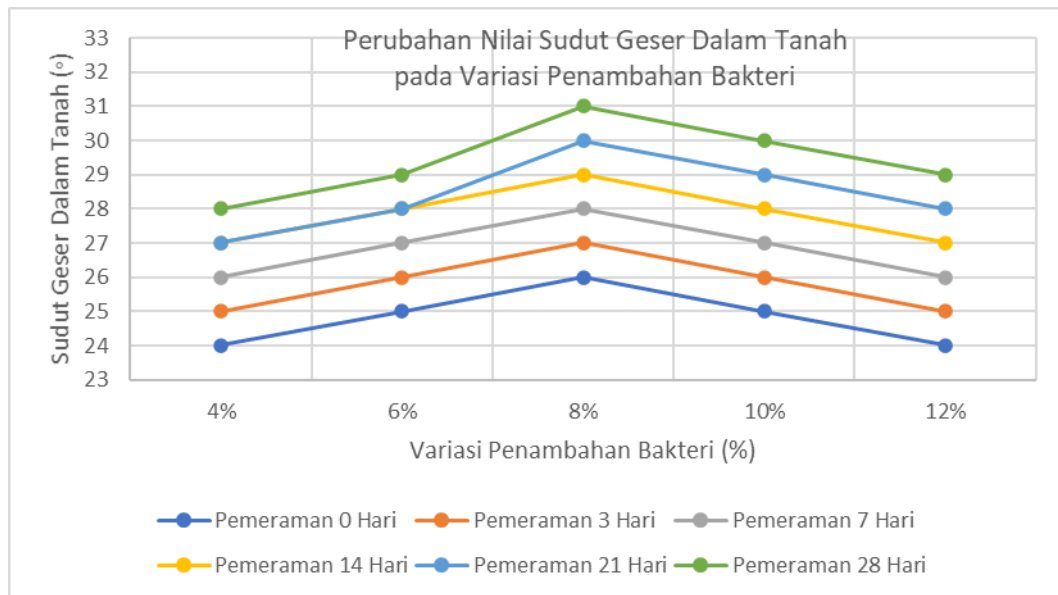
Gambar 48. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 21 hari



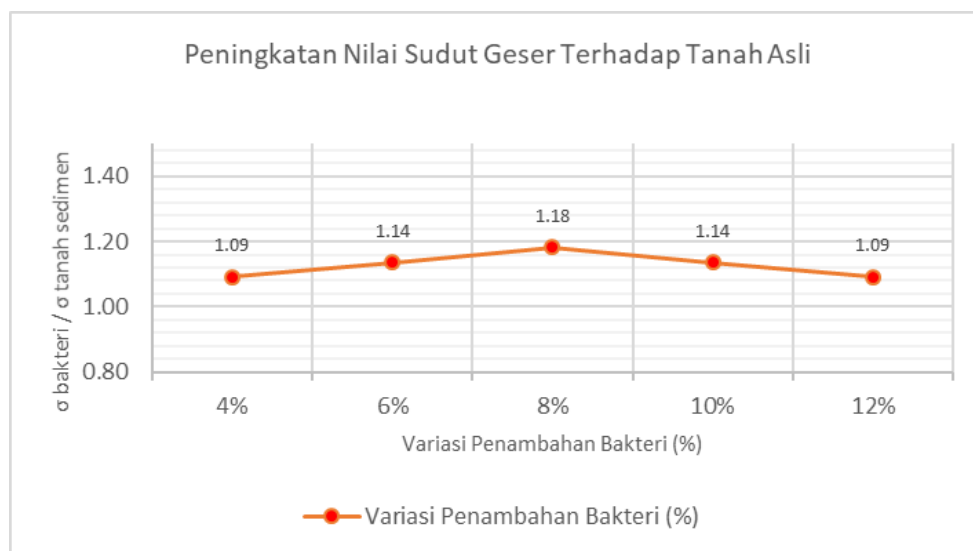
Gambar 49. Grafik perubahan sudut geser dalam tanah masa pemeraman 28 hari



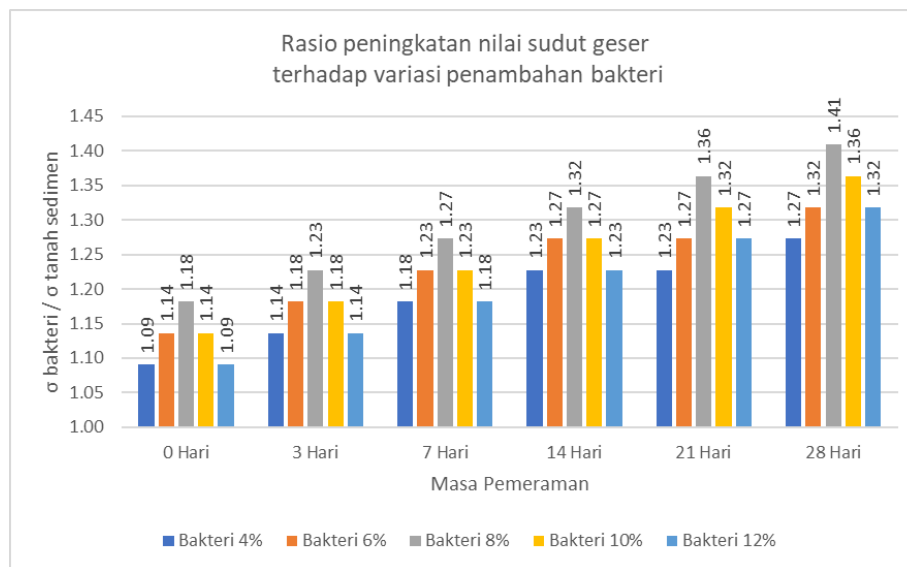
Gambar 50. Grafik Perubahan nilai kohesi pada variasi penambahan bakteri tiap masa pemeraman



Gambar 51. Grafik Perubahan nilai sudut geser dalam tanah pada variasi penambahan bakteri tiap masa pemeraman



Gambar 52. Grafik peningkatan nilai sudut geser akibat penambahan bakteri terhadap tanah sedimen



Gambar 53. Diagram rasio peningkatan nilai sudut geser penambahan bakteri terhadap sudut geser tanah sedimen

Pada masa pemeraman, bakteri masih melakukan penyesuaian diri dengan lingkungannya yang baru. Berbagai macam enzim maupun zat-zat perantara yang terbentuk pada fase ini sehingga memungkinkan akan terjadinya pertumbuhan lebih lanjut. Selanjutnya beberapa sel bakteri mulai membesar dan sebagiannya lagi telah melakukan pembelahan diri, tetapi waktu generasinya masih panjang. fase ini sering disebut fase adaptasi.

Prinsip kerja metode Biosementasi pada dasarnya memanfaatkan bakteri untuk meningkatkan pH lingkungan sehingga memfasilitasi pengendapan CaCO_3 . Enzim urease yang dihasilkan bakteri akan mengubah urea dan menghasilkan NH_4^+ .

Sehingga terjadi proses sementasi pada campuran tanah dan bakteri. Dari hasil pengujian, terlihat bahwa nilai kohesi tanah sedimen tercampur bakteri dengan masa pemeraman hingga mencapai 28 hari,

kenaikan nilai kohesi tertinggi mencapai $1,57 \text{ kg/cm}^2$ pada penambahan bakteri 8% dengan masa pemeraman 28 hari dimana pada masa pemeraman 0 hari nilai kohesi campuran tanah dengan bakteri 8% adalah $1,09 \text{ kg/cm}^2$ dan tanpa penambahan bakteri (kohesi tanah asli) yaitu $0,72 \text{ kg/cm}^2$. Begitupun dengan nilai sudut geser yang mengalami kecenderungan peningkatan nilai sudut geser akibat penambahan bakteri pada tiap masa pemeraman. Nilai sudut geser tertinggi yang didapatkan pada tiap variasi campuran bakteri yaitu sebesar 31 derajat dari nilai sudut geser dalam sebesar 26 derajat pada masa pemeraman 0 hari dan sudut geser tanah asli sebelumnya yaitu 22 derajat.

Sedangkan, pada persentase penambahan bakteri sebesar 10 dan 12 persen terjadi penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah dari peningkatan terbesar yang terjadi pada persentase campuran bakteri di 8%. Hal ini menandakan bahwa komposisi yang optimal dalam penelitian ini terjadi pada persentase penambahan bakteri di 8%. Kohesi maupun sudut geser dalam tanah merupakan parameter daya dukung tanah, dimana semakin besar atau meningkat nilai kohesi dan sudut geser, maka kemampuan tanah dalam menahan beban vertikal maupun horisontal juga akan semakin meningkat. Pencampuran bakteri *Bacillus subtilis* terbukti meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan geser dikarenakan terjadi peningkatan oleh parameter-parameter kuat geser tanah.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengujian sifat fisis, tanah sedimen Bendungan Bilibili diklasifikasikan sebagai ML, yaitu lanau dengan plastisitas yang rendah berdasarkan system klasifikasi USCS, dan diklasifikasikan sebagai golongan tanah A-4 yaitu tanah berlanau menurut system klasifikasi AASHTO.
2. Penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* yang di campur menggunakan urea dan CaCl_2 terbukti dapat meningkatkan nilai tegangan geser, kohesi, dan sudut geser dalam tanah.
3. Dari hasil pengujian, waktu pemeraman 0, 3, 7, 14, 21 dan 28 hari meningkatkan nilai tegangan geser, kohesi, dan sudut geser dalam tanah. Dalam hal ini nilai maksimum yang berhasil dicapai pada waktu pemeraman 28 hari dengan penambahan bakteri 8%. Untuk nilai tegangan geser meningkat sebesar 35%. Untuk nilai kohesi terjadi peningkatan sebesar 118%. Untuk nilai sudut geser dalam tanah terjadi peningkatan dari nilai sudut geser tanah asli sebesar 22° menjadi 31° sehingga terjadi peningkatan sebesar 40%. Sedangkan pada persentase penambahan bakteri 10% dan 12% terjadi penurunan nilai kohesi dan sudut geser tanah.

B. Saran

1. Proses pencampuran tanah dengan bahan stabilisasi harus hati-hati dan homogen agar dapat memaksimalkan kinerja bahan stabilisasi pada tanah sedimen.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait penggunaan kultur murni mikroba dengan persentase dan jenis tanah yang berbeda.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait pengujian mekanis lainnya menggunakan bahan stabilisasi kultur murni mikroba.
4. Perlu memperhatikan penggunaan alat dengan baik agar memperoleh data yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bergey, D.H. dan Boone, D.R. 2009. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Second Edition. Volume Three: The Firmicutes. Springer. United States of America
- Darwis, H. (2017). *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta : Pustaka AQ.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)* Jilid I. Jakarta : Erlangga.
- Hardiyatmo, H. C. 1992. *Mekanika Tanah I*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hardiyatmo Christady. (1992). *Prinsip-prinsip Mekanika Tanah dan Soal Penyelesaian*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada
- Hardiyatmo Christady. (2001). *Prinsip-prinsip Mekanika Tanah dan Soal Penyelesaian*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada
- Hardiyatmo, H.C., (2012). *Mekanika Tanah II*. Edisi Kelima, Penerbit Gadjah Mada University Press, Yogyakarta
- Hendarsin, Shirley. (2000). *Penuntun Praktis Perencanaan Teknik Jalan Raya*. Bandung : Politeknik Negeri Bandung.
- Holt, John G., N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley dan S.T. Williams. 2000. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Ninth Edition. Williams & Wilkins. Philadelphia.

- Iffah Fadliah (2013). Studi Eksperimental Stabilisasi Biogrouting Bacillus Subtilis pada Tanah Lempung Kepasiran. Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- Imelda Vera Tumanan (2014). Studi Karakteristik Mekanik Tanah Organik Terstabilisasi Bakteri Bacillus Subtilis. Jurnal Tugas Akhir. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- Ingles, & Metcal. (1972). Soil Stabilization, Principles and Practice. USA : USA.
- Muntohar, A. S. (2009). Mekanika Tanah. Yogyakarta: LP3M UMY
- Rio Alvin Arfandy (2017). Stabilisasi Tanah Ekspansif dengan Metode Bioremediasi. Jurnal Tugas Akhir. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- Santosa,B.dkk. (1996). Seri Diktat Kuliah : Dasar Mekanika Tanah. Gunadarma.

LAMPIRAN

Perhitungan Berat Campuran Sampel

Tanah Asli		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	14.56 gram

Penambahan Bakteri 4%		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Bakteri yang digunakan	=	4% x Penambahan air
	=	0.58 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	Penambahan air - Bakteri yang digunakan
	=	13.98 gram

Penambahan Bakteri 6%		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Bakteri yang digunakan	=	6% x Penambahan air
	=	0.87 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	Penambahan air - Bakteri yang digunakan
	=	13.68 gram

Penambahan Bakteri 8%		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Bakteri yang digunakan	=	8% x Penambahan air
	=	1.16 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	Penambahan air - Bakteri yang digunakan
	=	13.39 gram

Penambahan Bakteri 10%		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Bakteri yang digunakan	=	10% x Penambahan air
	=	1.46 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	Penambahan air - Bakteri yang digunakan
	=	13.10 gram

Penambahan Bakteri 12%		
Berat Tanah (Wwet)	=	86.07 gram
Kadar Air Tanah (w)	=	8.22 %
Kadar Air Optimum (wopt)	=	30.25 %
Penambahan air	=	$(Wopt-W)/(Wopt+100) \times Wwet$
	=	14.56 gram
Bakteri yang digunakan	=	12% x Penambahan air
	=	1.75 gram
Air yang digunakan untuk campuran	=	Penambahan air - Bakteri yang digunakan
	=	12.81 gram

Tabel 21. Rekapitulasi perhitungan campuran sampel

Perhitungan campuran sampel			
Kategori	Berat sampel tanah (gr)	Air yang digunakan (gr)	Penambahan Bakteri (gr)
Tanah Asli	86.07	14.56	0
Tanah + Bakteri 4%	86.07	13.98	0.58
Tanah + Bakteri 6%	86.07	13.68	0.87
Tanah + Bakteri 8%	86.07	13.39	1.16
Tanah + Bakteri 10%	86.07	13.10	1.46
Tanah + Bakteri 12%	86.07	12.81	1.75