

**PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP
NILAI KUAT GESER TANAH YANG DIPADATKAN
DENGAN STANDAR PROCTOR**

SKRIPSI



RENDY OKTA PUTRA
221070007

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS RIAU KEPULAUAN
BATAM
2026**

**PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP
NILAI KUAT GESER TANAH YANG DIPADATKAN
DENGAN STANDAR PROCTOR**

SKRIPSI



RENDY OKTA PUTRA

221070007

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS RIAU KEPULAUAN
BATAM
2026**

LEMBAR PENGESAHAN PERBAIKAN SEMINAR SKRIPSI

**PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP NILAI KUAT
GESER TANAH YANG DIPADATKAN DENGAN STANDAR PROCTOR**

Rendy Okta Putra
221070007

Pimpinan Sidang

Tanda Tangan

Tanggal

Dian Hastari Agustina, S.T., MT
NIDN. 1028087405

Dosen Penguji I

Edi Kusmawan, S.T., M.T
NIDN. 1026069301

Dosen Penguji II

Rizman Hidayat, S.T., M.T
NID. 2024131197

PERSETUJUAN AKHIR SKRIPSI

**PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP NILAI KUAT
GESER TANAH YANG DIPADATKAN DENGAN STANDAR PROCTOR**

Rendy Okta Putra
221070007

Pembimbing I

Tanda Tangan

Tanggal

Dian Hastari Agustina, S.T., M.T
NIDN.1028087405

Pembimbing II

Zures Gustiabani, B.Eng., M.Sc
NIDN.1007089601

**Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Riau Kepulauan**

Dian Hastari Agustina, S.T., M.T.
NIDN.1028087405

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP NILAI KUAT GESER TANAH YANG DIPADATKAN DENGAN STANDAR PROCTOR

Rendy Okta Putra
221070007

Dipertahankan di depan Penguji Skripsi Sarjana
Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Riau Kepulauan
Tanggal : *(diisi sesuai tanggal sidang skripsi)*

No. Nama	NIDN	Tanda Tangan
1. <u>Dian Hastari Agustina, S.T., M.T</u> (Pimpinan Sidang)	1028087405	_____
2. <u>Edi Kusmawan, S.T., M.T</u> (Penguji 1)	1026069301	_____
3. <u>Rizman Hidayat, S.T., M.T</u> (Penguji 2)	2024131197	_____

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Riau Kepulauan

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Riau Kepulauan

Ir.Zaenal Arifin, S.T., M.T., IPM
NIDN. 1010116603

Dian Hastari Agustina, S.T., M.T.
NIDN. 1028087405

HALAMAN PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Rendy Okta Putra

Nomor Induk Mahasiswa : 221070007

Program Studi : TEKNIK SIPIL

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi saya yang berjudul: **PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP NILAI KUAT GESER TANAH YANG DI PADATKAN DENGAN STANDAR PROCTOR** merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan hasil plagiat, dan tidak pula dituliskan oleh orang lain. Semua sumber, baik yang dikutip maupun dirujuk, telah saya cantumkan dan nyatakan dengan benar pada bagian daftar pustaka.

Jika di kemudian hari terbukti ditemukan penyimpangan dan penyalahgunaan dalam proses penulisan dan penelitian ini, saya bersedia menerima konsekuensi untuk dinyatakan **TIDAK LULUS**. Saya juga bersedia menanggung segala konsekuensi hukum yang berkaitan dengan tindak plagiarisme ini sebagai kesalahan saya pribadi dan bukan tanggung jawab Universitas Riau Kepulauan

Batam, 12 Agustus 2026

(Rendy Okta Putra)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini yang berjudul **PENGARUH PENAMBAHAN *BOTTOM ASH* TERHADAP NILAI KUAT GESER TANAH YANG DIPADATKAN DENGAN *STANDAR PROCTOR*** ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memenuhi kelulusan di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Riau Kepulauan.

Pertama sekali, penulis mengucapkan rasa terimakasih kepada pihak-pihak yang sangat membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini, antara lain adalah sebagai berikut:

1. Ibu Prof. Dr. Hj. Sri Langgeng Ratnasari, S.E., M.M. Selaku Rektor, Universitas Riau Kepulauan.
2. Bapak Ir. Zaenal Arifin, S.T., M.T.,IPM. Selaku Dekan, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kepulauan.
3. Ibu Dian Hastari, S.T., M.T selaku Kaprodi Fakultas Teknik Sipil sekaligus Dosen Pembimbing I saya atas segala, kebaikan, arahan, waktu dan pengetahuan yang beliau berikan kepada penulis, sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan sebaik mungkin.
4. Ibu Zures Gustiabani B,Eng., M.Sc. Selaku Dosen Pembimbing II atas segala, kebaikan, arahan, dan pengetahuan yang beliau berikan kepada penulis, sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan sebaik mungkin.

5. Kedua orang tua penulis, yang selalu memberikan kasih sayang, doa, nasehat, dan selalu mengusahakan yang terbaik untuk penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini, serta atas kesabarannya yang luar biasa dalam setiap langkah hidup penulis, yang merupakan anugerah terbesar dalam hidup. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dapat dibanggakan.
6. Seluruh Dosen dan Staff Universitas Riau Kepulauan Batam yang banyak membantu dalam proses penyelesaian tugas akhir ini yang tidak bisa disebutkan namanya
7. Sahabat dan teman-teman terbaik penulis yang ikut campur tangan dalam membantu penulis untuk melakukan penelitian, semoga kebaikannya dibalas dengan pahala dan sukses buat kita kedepannya.
8. Teman-teman dari teknik sipil yang telah memberi saran maupun semangat.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saya sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang.

Akhir kata, saya berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi saya sendiri maupun bagi pembaca, serta dapat menjadi dasar yang baik dalam pelaksanaan penelitian selanjutnya.

Batam, 28 April 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan *bottom ash* terhadap karakteristik pemadatan dan kuat geser tanah lempung yang berasal dari kawasan Temiang, Kota Batam. *Bottom ash* digunakan sebagai bahan stabilisasi dengan variasi campuran sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat kering tanah untuk mengetahui komposisi yang paling efektif dalam meningkatkan sifat teknik tanah. Tahapan penelitian diawali dengan pengujian sifat fisik tanah yang meliputi kadar air, berat jenis, batas-batas Atterberg, dan distribusi ukuran butiran. Selanjutnya dilakukan *Standard Proctor Test* untuk memperoleh nilai *Optimum Moisture Content* (OMC) dan *Maximum Dry Density* (MDD), serta *Direct Shear Test* untuk menentukan parameter kuat geser berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *bottom ash* memengaruhi karakteristik pemadatan maupun kuat geser tanah lempung. Campuran *bottom ash* sebesar 20% memberikan hasil terbaik dengan nilai kohesi sebesar 0,7507 kg/cm² atau meningkat sekitar 1,4% dibandingkan tanah asli. Sebaliknya, penambahan *bottom ash* hingga 30% menyebabkan penurunan parameter kuat geser akibat berkurangnya ikatan antarpartikel tanah. Selain itu, nilai sudut geser dalam mengalami perubahan pada setiap variasi campuran dengan kecenderungan menurun seiring meningkatnya persentase *bottom ash*. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan *bottom ash* sebesar 20% merupakan komposisi optimum dalam meningkatkan karakteristik kuat geser tanah lempung, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai alternatif bahan stabilisasi tanah pada berbagai pekerjaan geoteknik.

Kata kunci: *bottom ash*, stabilisasi tanah, kuat geser tanah, *Standard Proctor*, *Direct Shear Test*

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of variations in *bottom ash* addition on the compaction characteristics and shear strength of clay soil originating from the Temiang area, Batam City. *Bottom ash* was used as a stabilizing material with mixture variations of 0%, 10%, 20%, and 30% of the dry weight of the soil to determine the most effective composition in improving the engineering properties of the soil. The research stage began with testing the physical properties of the soil including water content, specific gravity, Atterberg limits, and grain size distribution. Next, a Standard Proctor Test was conducted to obtain the *Optimum Moisture Content* (OMC) and *Maximum Dry Density* (MDD) values, as well as a Direct Shear Test to determine the shear strength parameters in the form of cohesion (c) and internal friction angle (ϕ). The results showed that the addition of *bottom ash* affected the compaction characteristics and shear strength of clay soil. A *bottom ash* mixture of 20% gave the best results with a cohesion value of 0.7507 kg/cm² or an increase of about 1.4% compared to the original soil. Conversely, the addition of *bottom ash* up to 30% causes a decrease in shear strength parameters due to reduced bonds between soil particles. Furthermore, the value of the internal friction angle changes in each mixture variation with a tendency to decrease as the percentage of *bottom ash* increases. Based on these results, it can be concluded that the addition of *bottom ash* of 20% is the optimum composition in improving the shear strength characteristics of clay soil, thus potentially being used as an alternative soil stabilization material in various geotechnical projects.

Keywords: bottom ash, clay soil stabilization, shear strength, *Standard Proctor*, *Direct Shear Test*.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PERBAIKAN SEMINAR SKRIPSI.....	iii
PERSETUJUAN AKHIR SKRIPSI	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1 Tanah.....	4
2.2 Klasifikasi Tanah	5
2.2.1 Klasifikasi Tanah Pada Lokasi Lapangan	5
2.3 Tanah Lempung	12
2.4 Stabilisasi Tanah	13
2.4.1 Stabilisasi Mekanik	14
2.4.2 Stabilisasi dengan Menggunakan Bahan Tambahan.....	15
2.5 Pengujian Sifat Fisik Tanah.....	15
2.5.1 Kadar Air Tanah	16
2.5.2 Berat Jenis	16
2.5.3 Batas Konsistensi Tanah	17
2.5.4 Distribusi Ukuran Butiran.....	20
2.6 Pemadatan Tanah.....	22

2.7 Kuat Geser Tanah	23
2.8 Bottom Ash	26
2.9 Penelitian sebelumnya	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Alur Penelitian.....	27
3.2 Lokasi Tanah Sample.....	29
3.3 Pengujian Analisa Saringan (Siave Analysis)	29
3.4 Pengujian Berat Jenis Tanah (<i>Specific Grafity</i>).....	29
3.5 Pengujian Kadar air Tanah (<i>Water Moisture Content</i>).....	29
3.6 Pengujian Batas-batas Atterbeg (Atterbeg Limit).....	29
3.7 Perbedaan Standard Proctor Test dan Modified Proctor Test.....	30
3.8 Pengujian Pemadatan Standar (<i>Standart Proctor Test</i>).....	31
3.9 Pengambilan Data Penelitian	31
3.9.1 Studi Literatur	31
3.9.2 Analisis dan Evaluasi.....	31
3.10 Prosedur Standar Pengujian.....	32
3.10.1 Pengujian Analisa Saringan.....	32
3.10.2 Pengujian Kadar Air Tanah	33
3.10.3 Pengujian Berat Jenis Tanah.....	34
3.10.4 Pengujian Batas Plastis	35
3.10.5 Pengujian Batas Susut.....	36
3.10.6 Pengujian Batas Cair Tanah	39
3.10.7 Pengujian Pemadatan <i>Standart Proctor</i>	40
3.10.8 Pembuatan Sample Uji Geser.....	41
3.10.9 Pengujian Geser	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Pendahuluan	47
4.2 Hasil Pengujian Propertis Tanah Asli	47
4.3 Pemadatan Tanah.....	48
4.4 Pengujian Kuat Geser	54
4.5 Pengujian Kuat Geser Tanah Tanpa Campuran <i>Bottom Ash</i>	55
4.6 Pengujian Kuat Geser Tanah Dengan Campuran <i>bottom ash</i> 10%.....	57
4.7 Pengujian Kuat Geser tanah Dengan Campuran <i>Bottom Ash</i> 20%.....	60

4.8 Pengujian Kuat Geser Tanah Dengan Campuran Bottom Ash 30%	63
4.9 Hasil Pengujian Kuat Geser	66
BAB V KESIMPULAN.....	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik tanah pada lokasi lapangan (Smith, 1998)	5
Tabel 2. 2 Tabel berat jenis air	17
Tabel 2. 3 Ukuran butiran tanah dengan Hidrometer	22
Tabel 2. 4 Besaran Sudut Geser dalam tanah	26
Tabel 3. 1 Perbedaan Metode Standard Proctor test dan Modified Proctor test.	30
Tabel 3. 2 Tabel Parameter Pengujian Direct Shear Test	45
Tabel 4. 1 Nilai Output Pengujian Propertis Tanah	48
Tabel 4. 2 Kandungan Mineral Bottom Ash	48
Tabel 4. 3 Tabel Nilai OMC dan MDD	54
Tabel 4. 4 hasil Pengujian Kuat Geser	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Batas – batas Atterberg untuk sub kelompok A-4,A-5,A-6, Dan A-7	10
Gambar 2. 2 Batas Atterberg untuk kelompok tanah A-4, A-5, A-6, Dan A-7.....	11
Gambar 2. 3 Hubungan Kadar air dan berat volume kering.....	23
Gambar 2. 4 Hubungan kuat geser tanah dengan teganan	25
Gambar 2. 5 Bottom ash (Dokumentasi pribadi).....	28
Gambar 3. 1 Uji Batas Susut. (Dokumentasi Pribadi,2024).....	38
Gambar 3. 2 Proses Pembuatan sampel uji geser	42
Gambar 3. 3 Alat Uji Geser Langsung	44
Gambar 4. 1 Tanah dan bottom ash yang sudah dicampur (Dokumentasi Pribadi)	49
Gambar 4. 2 Nilai OMC dan MDD Campuran Bottom ash 0%.....	50
Gambar 4. 3 Nilai OMC dan MDD Campuran Bottom Ash 10%	51
Gambar 4. 4 Nilai OMC dan MDD Campuran Bottom Ash 20%	52
Gambar 4. 5 Nilai OMC dan MDD Campuran Bottom Ash 30%	53
Gambar 4. 6 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan tegangan geser tanah dengan campuran Bottom ash 0%	55
Gambar 4. 7 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan teganan normal (σ) pada tanah campuran bottom ash 0%.....	56
Gambar 4. 8 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan tegangan geser tanah dengan campuran bottom ash 10%.....	57
Gambar 4. 9 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan teganan normal (σ) pada tanah campuran bottom ash 10%.....	59
Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan tegangan geser tanah dengan campuran bottom ash 20%.....	60
Gambar 4. 11 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan teganan normal (σ) pada tanah campuran bottom ash 20%.....	61
Gambar 4. 12 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan tegangan geser tanah dengan campuran bottom ash 20%.....	63

Gambar 4. 13 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan teganan normal (σ) pada tanah campuran bottom ash 30%.....	64
Gambar 4. 14 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan teganan normal (σ) ..	65
Gambar 4. 15 Grafik hubungan campuran bottom ash terhadap nilai kohesi tanah (c).....	67
Gambar 4. 16 Grafik hubungan campuran bottom ash terhadap sudut geser.....	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan salah satu faktor utama yang harus diperhatikan dalam perencanaan konstruksi sipil, seperti pembangunan gedung, jalan, maupun jembatan. Ketidaksesuaian antara desain dan pelaksanaan konstruksi dengan kondisi geologi tanah yang kurang baik dapat menyebabkan kegagalan pada tahap pembangunan. Dampak yang ditimbulkan meliputi kerusakan struktur, kerugian material maupun korban jiwa, serta keterlambatan penyelesaian proyek. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan tanah untuk meningkatkan daya dukung dan mempertahankan kuat geser tanah agar mampu mendukung beban konstruksi secara optimal. Pada penelitian ini dilakukan perbaikan tanah lempung yang berasal dari daerah Temiang, di samping kawasan Wisata Mata Kucing, dengan menggunakan campuran *Bottom Ash* sebagai bahan stabilisasi. *Bottom Ash* yang digunakan merupakan *Bottom Ash* tipe F karena memiliki kandungan senyawa silika, alumina, dan besi oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) lebih dari 90%, serta kandungan kalsium oksida (CaO) kurang dari 5%. Karakteristik tersebut telah memenuhi klasifikasi menurut ASTM C618 untuk *Bottom Ash* hasil pembakaran batubara bituminus (bituminous).

Tanah lempung memiliki karakteristik yang kurang menguntungkan sebagai tanah dasar konstruksi karena termasuk jenis tanah kohesif dengan nilai kuat geser yang relatif rendah dan tingkat kompresibilitas yang tinggi. Sifat tersebut dapat mengurangi kestabilan konstruksi sehingga berpotensi menimbulkan berbagai kerusakan, seperti permukaan jalan yang bergelombang, pondasi yang mengalami pengangkatan (heaving), serta retak pada tiang atau elemen struktur lainnya.

Menurut Amarullah dan Zardi (2017), kuat geser tanah merupakan kemampuan maksimum tanah per satuan luas dalam menahan gaya yang menyebabkan keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser pada suatu elemen tanah.

Berdasarkan penelitian terdahulu, *bottom ash* telah banyak di gunakan sebagai bahan stabilitas tanah untuk meningkatkan sifat teknik tanah. Namun, penelitian yang mengkaji pengaruh variasi kadar *bottom ash* terhadap parameter kuat geser yaitu kohesi (c) dan sudut geser (ϕ), melalui *Direct Sear Test* pada tanah lempung di kawasan Temiang, Kota Batam, masih terbatas. Oleh karna itu penelitian ini di lakukan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan *bottom ash* sebesar 0% 10% 20% 30% terhadap karakteristik pemadatan tanah berdasarkan *Standar proctor* serta parameter kuat geser tanah.

1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan latar belakang diatas maka didapatkan beberapa permasalahan yang perlu dibahas dalam penelitian ini yaitu:

- 1 Mengetahui pengaruh variasi penambahan *Bottom Ash* pada tanah hasil galian kedalaman 0 s.d 1 m di lokasi samping Wisata Mata Kucing temiang , untuk mencari nilai kuat geser?
- 2 Mengetahui apakah limbah bottom ash masih bisa di gunakan untuk menjadi bahan campuran?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh penambahan *Bottom Ash* terhadap kepadatan tanah dengan pengujian *standard proctor*.
2. Mengetahui Pengaruh penambahan *Bottom Ash* terhadap nilai kohesi dan sudut geser dalam.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memberikan informasi tentang pengaruh penambahan *Bottom Ash* pada tanah terhadap nilai kuat geser.
2. Dapat mengetahui kelayakan penggunaan kembali limbah dari hasil akhir pembakaran batu bara sebagai bahan stabilisasi tanah.

1.5 Batasan Masalah

Sample tanah yang diteliti berasal dari sampel tanah hasil Galian kedalaman 0 s.d. 1 M di lokasi samping Wisata Mata Kucing, Temiang, Kota Batam, Kepulauan Riau, dengan batasan sebagai berikut ;

1. *Bottom Ash* yang digunakan adalah *bottom ash* yang berasal dari PLTU Kari-mun.
2. Sampel tanah asli akan di uji pemadatan dengan metode dari ASTM D698 untuk mengetahui kadar air optimum dan kepadatan kering maksimumnya.
3. Variasi campuran *Bottom Ash* pengujian sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10%, 20%, 30% dari berat kering tanah.
4. Pengujian kuat geser tanah yang telah dicampuri campuran *Bottom Ash* 10%, 20% dan 30% menggunakan alat *Direct Shear Test* untuk mengetahui nilai ko-hesi dan sudut geser dalam dari tiap sampel yang diuji.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistimatika dalam penulisan tugas laporan ini berdasarkan tahapan-tahapan pembahasan adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini berisikan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah , sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini berisikan teori yang menjadi dasar dan pendukung penelitian ini, penelitian relevan yang sebelumnya pernah diteliti

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang bagaimana metode dan alur yang dilakukan untuk meneliti penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang hasil dari penelitian yang dilakukan berdasarkan metode yang terdapat pada bab sebelumnya.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisikan kempulan dari pembahasan

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Dalam bidang teknik sipil, tanah didefinisikan sebagai kumpulan mineral, material organik, dan sedimen yang berada di atas batuan dasar (*bedrock*) dengan ikatan antarpartikel yang relatif lemah. Ikatan tersebut dapat terbentuk akibat adanya karbonat, bahan organik, atau oksida yang mengendap di antara butiran tanah. Rongga-rongga di antara partikel tanah dapat terisi oleh udara, air, maupun kombinasi keduanya (Hardiyatmo, 2002).

Menurut Das (2010), dalam konteks rekayasa teknik, tanah merupakan agregat partikel mineral yang tersusun secara tidak beraturan serta mengandung bahan organik hasil pelapukan. Di antara partikel-partikel padat tersebut terdapat ruang pori yang dapat diisi oleh air dan gas. Dalam pelaksanaan konstruksi sipil, tanah tidak hanya dimanfaatkan sebagai material konstruksi, tetapi juga berfungsi sebagai media pendukung pondasi berbagai jenis struktur. Oleh sebab itu, seorang insinyur sipil perlu memahami karakteristik tanah, meliputi proses pembentukannya, distribusi ukuran butir, permeabilitas, kompresibilitas, kuat geser, serta daya dukungnya terhadap beban.

Mekanika tanah merupakan cabang ilmu yang mempelajari sifat-sifat fisik tanah serta perilaku massa tanah ketika menerima berbagai jenis pembebanan. Ilmu ini menjadi dasar dalam rekayasa tanah, yaitu penerapan konsep-konsep mekanika tanah untuk menyelesaikan berbagai permasalahan praktis di bidang konstruksi. Lebih lanjut, rekayasa geoteknik merupakan salah satu cabang teknik sipil yang berfokus pada pemanfaatan material alami yang berada di dekat permukaan bumi. Bidang ini mengaplikasikan prinsip-prinsip mekanika tanah dan mekanika batuan dalam perencanaan serta perancangan pondasi, struktur penahan tanah, dan berbagai konstruksi geoteknik lainnya.

2.2 Klasifikasi Tanah

Menurut Smith (1998), klasifikasi tanah merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengelompokkan tanah ke dalam sejumlah kategori berdasarkan sifat fisik dan karakteristik materialnya. Melalui sistem klasifikasi ini, para insinyur dapat mengidentifikasi dan membedakan jenis-jenis tanah sehingga memudahkan dalam proses analisis dan perencanaan pekerjaan teknik sipil.

Proses klasifikasi tanah dapat dilakukan baik di lapangan maupun di laboratorium. Klasifikasi yang dilakukan di lapangan umumnya didasarkan pada identifikasi visual terhadap karakteristik tanah, sedangkan klasifikasi di laboratorium dilakukan melalui serangkaian pengujian khusus untuk memperoleh data mengenai sifat-sifat fisik dan teknik tanah secara lebih akurat..

2.2.1 Klasifikasi Tanah Pada Lokasi Lapangan

Kerikil, pasir, dan tanah gambut mudah sekali dikenali, tetapi muncul sebuah permasalahan dalam menentukan apakah suatu tanah merupakan pasir halus, tanah lanau kasar, tanah lanau halus ataupun tanah lempung. Namun aturan – aturan berikut dapat membantu dalam mengklasifikasi tanah di lokasi lapangan.

Tabel 2. 1 Karakteristik tanah pada lokasi lapangan (Smith, 1998)

Pasir Halus	Tanah Lanau	Tanah Lempung
Partikel Butiran dapat terlihat	Beberapa butiran terlihat	Butiran tidak terlihat
Menampilkan dilantasi	Menampilkan dilantasi	Tidak ada dilantasi
Mudah hancur dan jatuh dari tangan saat kering	Mudah hancur dan dibersihkan dari tangan saat kering	Sukar hancur dan menempel dari tangan saat kering
Terasa berpasir	Terasa Kasar	Terasa Halus
Tidak ada plastisitas	Sedikit adanya plastisitas	plastis

Uji dilatasi terdiri dari pencetakan sejumlah kecil tanah di telapak tangan jika air terlihat surut ketika tanah ditekan, maka tanah tersebut adalah pasir atau

lanau. Dalam mekanika tanah, dilatansi adalah perubahan volume yang diamati pada material granular ketika material tersebut mengalami deformasi geser. Tanah lanau memiliki kekuatan kering yang rendah sehingga rapuh tetapi memiliki daya tahan yang cepat, tanah lempung memiliki kekuatan kering yang tinggi dan daya tahan yang lambat.

2.1.2 Klasifikasi Tanah Di Laboratorium

Klasifikasi tanah di laboratorium dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik tanah yang digunakan sebagai sampel penelitian. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan jenis tanah berdasarkan nilai sifat-sifat indeksinya, sehingga perilaku tanah terhadap pembebanan maupun proses stabilisasi dapat diketahui. Pengujian yang dilakukan meliputi analisis distribusi ukuran butir (*sieve analysis*), batas-batas Atterberg yang terdiri atas batas cair (*Liquid Limit/LL*), batas plastis (*Plastic Limit/PL*), indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*), serta berat jenis tanah (*Specific Gravity/Gs*). Data hasil pengujian selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan sistem Unified Soil Classification System (USCS) dan American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Klasifikasi tersebut memberikan informasi mengenai jenis tanah, tingkat plastisitas, serta kesesuaiannya sebagai material konstruksi. Hasil klasifikasi ini kemudian menjadi dasar dalam mengevaluasi pengaruh penambahan *bottom ash* terhadap karakteristik pemadatan dan kuat geser tanah pada penelitian ini.

1. Ukuran besar partikel dari tanah berbutir kasar

Menurut Budhu (2010:15) distribusi ukuran partikel atau diameter butir rata-rata dari tanah berbutir kasar-kerikil dan pasir diperoleh dengan menyaring berat tanah yang telah diketahui melalui setumpuk saringan dengan ukuran yang semakin kecil.

2. Ukuran Besar Partikel dari tanah berbutir halus

Proses penyaringan tidak dapat digunakan untuk tanah berbutir halus lanau dan tanah berbutir halus lempung karena ukurannya yang sangat kecil. Metode laboratorium yang umum digunakan untuk menentukan distribusi ukuran tanah berbutir halus adalah uji hidrometer.

Uji hidrometer melibatkan pencampuran sejumlah kecil tanah ke dalam suspensi dan mengamati bagaimana suspensi campuran tanah dengan air tersebut mengendap pada waktunya. Partikel yang lebih besar akan mengendap dengan cepat, diikuti oleh partikel yang lebih kecil. Ketika hidrometer diturunkan ke dalam air dan disuspensi, hidrometer akan tenggelam ke dalam suspensi hingga gaya apung cukup untuk menyeimbangkan berat hidrometer.

3. Sistem Klasifikasi Unified

Menurut Sistem Klasifikasi Tanah Unified (USCS), tanah dibedakan menjadi dua kelompok utama berdasarkan persentase material yang lolos saringan No. 200. Tanah dikategorikan sebagai tanah berbutir kasar, yang meliputi kerikil dan pasir, apabila material yang lolos saringan No. 200 kurang dari 50%. Sebaliknya, tanah diklasifikasikan sebagai tanah berbutir halus, yaitu lanau dan lempung, apabila lebih dari 50% materialnya lolos saringan No. 200. Selanjutnya, masing-masing jenis tanah dikelompokkan kembali ke dalam beberapa kelompok dan subkelompok berdasarkan karakteristik gradasi dan sifat plastisitasnya. Pengelompokan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1, sedangkan simbol-simbol yang digunakan dalam sistem klasifikasi tersebut adalah sebagai berikut.

G = Kerikil (*Gravel*)

S = Pasir (*Sand*)

C = Lempung (*Clay*)

M = Lanau (*Silt*)

O = Lanau atau Lempung Organik (*Organic silt or clay*)

Pt = Tanah gambut dan tanah organik tinggi (*Peat and highly organic soil*)

W = Gradasi baik (*Well-graded*)

P = Gradasi buruk (*Poorly-graded*)

H = Plastisitas tinggi (*High-plasticity*)

L = Plastisitas rendah (*Low-Plasticity*)

Prosedur penentuan klasifikasi tanah berdasarkan Sistem Unified (USCS) dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

- a. Menentukan terlebih dahulu apakah sampel tanah termasuk tanah berbutir halus atau berbutir kasar. Penentuan ini dapat dilakukan melalui pengamatan visual maupun dengan melakukan analisis saringan menggunakan saringan No. 200.
- b. Apabila hasil identifikasi menunjukkan bahwa tanah termasuk tanah berbutir kasar, maka langkah selanjutnya adalah:
 1. Melakukan analisis saringan terhadap sampel tanah, kemudian menyusun kurva distribusi ukuran butir berdasarkan hasil pengujian.
 2. Menentukan persentase butiran yang lolos saringan No. 4. Apabila persentase butiran yang lolos kurang dari 50%, tanah diklasifikasikan sebagai kerikil (*gravel*). Sebaliknya, apabila lebih dari 50% butiran lolos saringan No. 4, tanah diklasifikasikan sebagai pasir (*sand*).

4. Sistem Klasifikasi tanah berdasarkan AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) digunakan untuk menilai kualitas tanah yang akan dimanfaatkan sebagai material timbunan jalan, lapis pondasi bawah (*subbase*), maupun tanah dasar (*subgrade*). Sistem klasifikasi ini dikembangkan khusus untuk mendukung kebutuhan perencanaan dan konstruksi perkerasan jalan.

Dalam sistem AASHTO, tanah dikelompokkan ke dalam delapan kategori utama, yaitu A-1 hingga A-8, yang masing-masing masih dapat dibagi lagi ke dalam beberapa subkelompok (Tabel 2). Pengelompokan tersebut didasarkan pada hasil pengujian analisis saringan dan batas-batas Atterberg. Selain itu, setiap kelompok tanah dievaluasi menggunakan nilai indeks kelompok (*Group Index/GI*), yang dihitung berdasarkan persamaan empiris untuk memberikan penilaian yang lebih rinci terhadap kualitas tanah dalam kelompoknya. Perhitungan nilai GI dilakukan menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$GI = (F - 35)[0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15)(PI - 10).....(2.1)$$

Dengan,

GI = Group Indeks

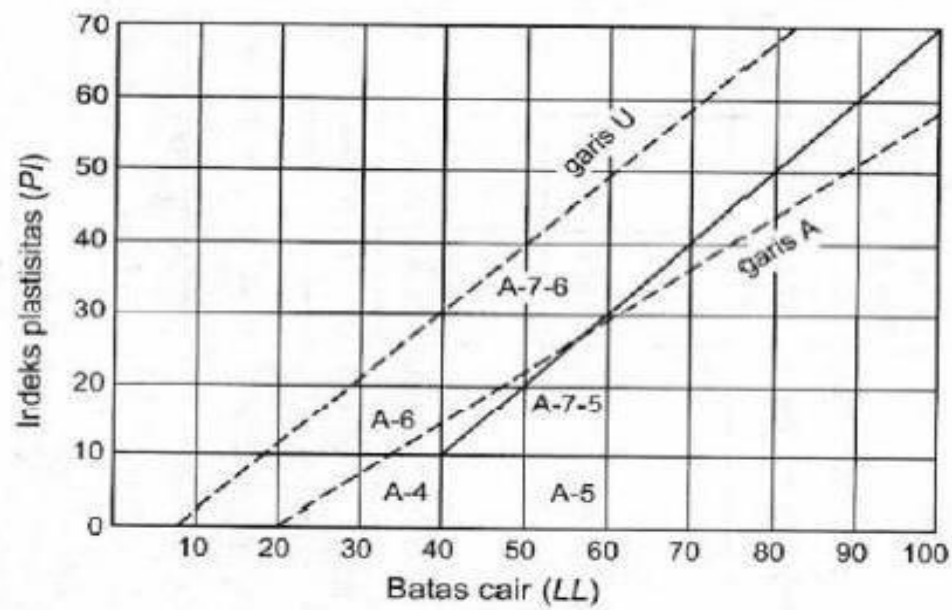
F = Persenan Lolos Saringan no 200 (0,075mm) (%)

LL = Batas Cair (%)

PI = Indeks Plastisitas (%)

Semakin besar nilai Indeks Kelompok (*Group Index/GI*), semakin rendah kualitas tanah untuk digunakan sebagai material konstruksi. Dalam sistem klasifikasi AASHTO, tanah berbutir kasar atau granuler dikelompokkan ke dalam kategori A-1 hingga A-3. Kelompok A-1 terdiri atas tanah granuler dengan gradasi yang baik, sedangkan kelompok A-3 umumnya berupa pasir bersih dengan gradasi yang kurang baik. Adapun kelompok A-2 mencakup tanah granuler yang memiliki kandungan butiran lolos saringan No. 200 kurang dari 35%, namun masih mengandung fraksi lanau dan lempung.

Sementara itu, tanah berbutir halus diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4 sampai A-7 yang umumnya terdiri atas tanah lanau dan lempung. Perbedaan antar kelompok tersebut ditentukan berdasarkan nilai batas-batas Atterberg, terutama batas cair (*Liquid Limit/LL*) dan indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*). Hubungan antara nilai LL dan PI untuk menentukan batas klasifikasi kelompok A-4 hingga A-7, serta subkelompok pada A-2, dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 2. 1 Batas – batas Atterberg untuk sub kelompok A-4,A-5,A-6, Dan A-7
(Hardiyatmo, 2002:62)

Klasifikasi umum	Material <i>granuler</i> ($<35\%$ lolos saringan no. 200)							Tanah-tanah lanau-lempung ($> 35\%$ lolos saringan no.200)			
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7
Analisis saringan (% lolos) 2,00 mm (no. 10) 0,425 mm (no. 40) 0,075 mm (no. 200)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	
	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min	
Sifat fraksi lolos saringan no.40											
Batas cair	-	-	-	40 maks	41 maks	40 maks	40 maks	41 min	40 maks	41 min	
Indeks Plastis	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	10 maks	11 maks	11 min	11 min	
Indeks kelompok (Gf)	0		0	0		4 maks	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks	
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil da pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir			Tanah berlanau		Tanah berlempung		
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Gambar 2. 2 Batas Atterberg untuk kelompok tanah A-4, A-5, A-6, Dan A-7.

(Hardiyatmo, 2002:61)

Dalam gambar 2.2. garis-A dari Casagrande digambarkan bersama-sama dengan garis U yang dinyatakan oleh persamaan: $PI = 0,9(LL - 8)$. Garis U ini adalah garis batas atas dari hubungan LL dan PI untuk tanah-tanah di alam pada umumnya (Holtz dan Kovacs, 1981 dalam Hardiyatmo, 2012:62). Tanah organik tinggi seperti tanah gambut (peat) diletakkan dalam kelompok A-8

2.3 Tanah Lempung

Menurut Terzaghi (1987), tanah lempung merupakan jenis tanah yang tersusun atas partikel-partikel berukuran sangat halus, mulai dari skala mikron hingga submikron, yang terbentuk melalui proses pelapukan unsur-unsur kimiawi pada batuan. Tanah lempung memiliki karakteristik khusus, yaitu bersifat keras ketika dalam kondisi kering, namun akan menjadi lunak, plastis, dan kohesif apabila kadar airnya meningkat.

Selain itu, tanah lempung memiliki sifat mengembang (*swelling*) dan menyusut (*shrinkage*) dengan mudah akibat perubahan kadar air. Perubahan tersebut menyebabkan terjadinya perubahan volume yang cukup besar sehingga dapat mempengaruhi kestabilan tanah sebagai media pendukung konstruksi.

Berdasarkan klasifikasi mineral penyusunnya, tanah lempung dapat dibedakan menjadi sekitar 15 jenis mineral. Beberapa di antaranya adalah montmorillonite, illite, kaolinite, polygorskite, chlorite, vermiculite, dan halloysite. Menurut Hardiyatmo (1992), tanah lempung memiliki beberapa sifat karakteristik, antara lain:

1. Ukuran butiran halus lebih kecil dari 0,002 mm
2. Rendahnya permeabilitas
3. Kandungan air kapiler yang tinggi
4. Sifat kohesif yang tinggi
5. Tingginya konsolidasi susut
6. Lambatnya konsolidasi tanah

2.3.1 Tanah Laterit

Tanah laterit merupakan salah satu jenis tanah berwarna merah yang banyak ditemukan di Indonesia. Tanah ini umumnya mengandung senyawa utama berupa silika (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), serta hidroksida (OH). Tingkat kesuburan tanah laterit relatif rendah karena mengalami proses pencucian (*leaching*) yang berlangsung secara terus-menerus akibat curah hujan tinggi. Proses tersebut menyebabkan unsur-unsur hara di dalam tanah terbawa oleh aliran air sehingga mengurangi tingkat kesuburannya. Selain itu, tanah laterit memiliki daya dukung yang rendah sehingga kurang sesuai digunakan sebagai material timbunan pada pekerjaan konstruksi.

Tanah laterit juga memiliki sifat plastis dengan kandungan lempung yang relatif tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan tanah mudah mengalami retak akibat perubahan kadar air, sehingga dapat menurunkan kestabilan tanah dan berpotensi mengakibatkan kerusakan pada pondasi bangunan, perkerasan jalan, maupun berbagai jenis konstruksi sipil lainnya.

2.4 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah merupakan upaya yang dilakukan untuk meningkatkan daya dukung serta kekuatan tanah, yang menjadi salah satu parameter penting dalam perencanaan ketebalan perkerasan. Untuk mencapai kondisi tanah yang lebih stabil, berbagai metode perbaikan dapat diterapkan. Beberapa teknik yang umum digunakan meliputi pemadatan, pencampuran tanah dengan material berbutir (*granular*), pemasangan bahan perkuatan seperti geosintetik, serta penggalian dan penggantian tanah yang memiliki kualitas rendah.

Selain metode secara mekanis, stabilisasi tanah juga dapat dilakukan melalui proses kimiawi, yaitu dengan menambahkan bahan tertentu ke dalam tanah, seperti semen, kapur, *bottom ash*, aspal, maupun bahan aditif lainnya. Penambahan

material tersebut bertujuan untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanis tanah sehingga lebih mampu menahan beban konstruksi (Hardiyatmo, 2010, dalam laporan Atmoko, 2015) menurut Hardiyatmo (2010), metode stabilisasi tanah secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu:

2.4.1 Stabilisasi Mekanik

Stabilisasi mekanis atau stabilisasi mekanikal merupakan metode perbaikan tanah yang dilakukan dengan mencampurkan dua atau lebih jenis tanah yang memiliki gradasi berbeda sehingga diperoleh material dengan karakteristik dan kekuatan yang memenuhi persyaratan teknis. Proses pencampuran tersebut dapat dilakukan langsung di lokasi proyek, di fasilitas pencampuran, maupun di area sumber material timbunan (*borrow area*). Setelah tercampur secara homogen, material kemudian dihamparkan dan dipadatkan di lokasi pekerjaan agar diperoleh kepadatan dan daya dukung yang diinginkan.

Selain melalui proses pencampuran, stabilisasi mekanis juga dapat dilakukan dengan cara menggali tanah yang memiliki kualitas kurang baik, kemudian menggantinya dengan material granuler yang berasal dari lokasi lain dan memiliki karakteristik yang lebih baik untuk mendukung konstruksi.

Menurut Lambe (1962) dalam Hardiyatmo (2010), stabilisasi mekanis merupakan metode perbaikan tanah yang dilakukan melalui perubahan sifat fisik tanah dengan dua pendekatan utama, yaitu sebagai berikut.

1. Penyusunan kembali partikel-partikel tanah, yaitu mengubah susunan butiran tanah melalui beberapa metode, seperti pencampuran beberapa lapisan atau jenis tanah, pembentukan kembali (*remolding*) tanah yang telah mengalami gangguan, serta pemadatan. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kepadatan dan memperbaiki karakteristik mekanis tanah.
2. Penambahan atau pengurangan fraksi tanah, yaitu mengubah sifat-sifat tanah dengan menambahkan atau menghilangkan sebagian partikel tanah tertentu sehingga diperoleh komposisi gradasi yang lebih baik. Metode ini

umumnya membutuhkan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan metode stabilisasi lainnya. Salah satu contoh penerapannya adalah pencampuran tanah lempung berpasir dengan kerikil untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar (*subgrade*) pada konstruksi jalan.

2.4.2 Stabilisasi dengan Menggunakan Bahan Tambahan

Bahan aditif merupakan material yang diproduksi melalui proses industri dan digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah apabila dicampurkan dalam proporsi yang sesuai. Penambahan bahan aditif bertujuan untuk meningkatkan berbagai karakteristik tanah, seperti kekuatan, tekstur, kemudahan pengerjaan (*workability*), dan plastisitas. Beberapa jenis bahan aditif yang umum digunakan dalam stabilisasi tanah antara lain kapur, semen Portland, *bottom ash*, dan aspal (*bitumen*).

Stabilisasi kimia, yang juga dikenal sebagai stabilisasi menggunakan bahan aditif, merupakan metode perbaikan tanah dengan cara mencampurkan bahan tambahan ke dalam tanah dalam komposisi tertentu untuk memperoleh sifat teknis yang diinginkan. Besarnya proporsi campuran disesuaikan dengan tujuan perbaikan. Apabila pencampuran hanya bertujuan memperbaiki gradasi dan menurunkan plastisitas agar tanah lebih mudah ditangani, maka jumlah bahan aditif yang digunakan relatif sedikit. Namun, apabila stabilisasi ditujukan untuk meningkatkan kekuatan tanah secara signifikan, diperlukan penambahan bahan aditif dalam jumlah yang lebih besar.

2.5 Pengujian Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah merupakan sifat dasar yang menggambarkan karakteristik dan kondisi tanah tanpa melibatkan perubahan atau reaksi kimia. Pengujian sifat fisik bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik tanah sebagai dasar dalam proses klasifikasi serta menilai kelayakannya sebagai material konstruksi. Parameter yang diuji meliputi kadar air alami (*Natural Moisture Content*), berat jenis butiran tanah (*Specific Gravity/Gs*), analisis distribusi ukuran butir (*Grain Size Analysis*), serta

batas-batas Atterberg, yang terdiri atas batas cair (***Liquid Limit/LL***), batas plastis (***Plastic Limit/PL***), dan indeks plastisitas (***Plasticity Index/PI***). Adapun pengujian-pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

2.5.1 Kadar Air Tanah

Pengujian kadar air dilakukan untuk menentukan besarnya kandungan air yang terdapat di dalam sampel tanah. Kadar air tanah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat tanah kering setelah proses pengeringan. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D2216-71. Nilai kadar air tanah dapat dihitung menggunakan Persamaan (2), dengan rumus sebagai berikut.

$$w = \frac{(w_2 - w_3)}{(w_3 - w_1)} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

- W = kadar air tanah (%)
- W1 = berat cawan kosong(gr)
- W2 = berat cawan + tanah basah(gr)
- W3 = berat cawan + tanah kering(gr)

2.5.2 Berat Jenis

Pengujian berat jenis (*specific gravity test*) dilakukan untuk menentukan nilai berat jenis butiran tanah (*specific gravity*). Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara berat butiran tanah terhadap berat air destilasi dengan volume yang sama pada suhu tertentu, yang umumnya ditetapkan pada suhu 27,5°C. Nilai berat jenis ini digunakan sebagai salah satu parameter penting dalam mengidentifikasi karakteristik fisik tanah serta mendukung berbagai analisis geoteknik. Pengujian tersebut mengacu pada standar ASTM D854-83.

a. Berat Jenis Tanah pada Suhu t °C

Berat Jenis tanah pada suhu t°C dapat dihitung dengan persamaan 3, yaitu sebagai berikut:

$$G = \frac{(w_2 - w_1)}{(w_4 - w_3) - (w_3 - w_2)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan

W1 = berat piknometer kosong (gr)

W2 = berat piknometer kosong + tanah kering (gr)

W3 = berat piknometer kosong + tanah + air (gr)

W4 = berat piknometer kosong + air (gr)

b. Berat Jenis pada Temperatur 27,5°C

$$G(27.5^{\circ}) = G(t^{\circ}) \frac{\text{Berat jenis air pada } t^{\circ}\text{C}}{\text{Berat jenis air pada } 27.5^{\circ}\text{C}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

G = berat jenis tanah

Temperatur (t°C)	Berat Jenis	Temperatur (t°C)	Berat Jenis
20	0,9982	31	0,9954
21	0,9980	32	0,9951
22	0,9978	33	0,9947
23	0,9976	34	0,9944
24	0,9973	35	0,9941
26	0,9971	36	0,9937
27	0,9968	37	0,9934
27,5	0,9965	38	0,9930
28	0,9963	39	0,9926
29	0,9960	40	0,9922
30	0,9957		

Tabel 2. 2 Tabel berat jenis air
(Panduan Praktikum Mekanika Tanah,2025)

2.5.3 Batas Konsistensi Tanah

Batas konsistensi tanah dibagi menjadi 3 bagian, yaitu :

a. Batas Cair (LL)

Batas cair (*Liquid Limit/LL*) adalah kadar air pada saat tanah mengalami peralihan dari kondisi plastis ke kondisi cair, sehingga menjadi batas atas dari daerah plastis tanah. Dalam pengujian laboratorium, nilai batas cair ditentukan sebagai kadar air yang menyebabkan alur pada contoh tanah menutup sepanjang 12,7 mm setelah menerima 25 kali pukulan pada alat uji sesuai dengan prosedur yang berlaku.

Penentuan nilai batas cair dilakukan berdasarkan hubungan antara kadar air dan jumlah pukulan yang diperoleh dari hasil pengujian. Pengujian ini diterapkan pada tanah yang memiliki butiran lolos saringan No. 40 dan bertujuan untuk mengidentifikasi jenis serta karakteristik tanah sesuai dengan metode yang ditetapkan dalam ASTM D423-66.

b. Batas Plastis (PL) dan Indeks Plastisitas (PI)

Batas plastis (*Plastic Limit/PL*) adalah kadar air pada saat tanah mengalami peralihan dari kondisi plastis ke kondisi semi padat. Dalam pengujian laboratorium, nilai batas plastis ditentukan ketika contoh tanah yang digulung hingga berdiameter sekitar 3 mm mulai menunjukkan retakan-retakan halus pada permukaannya.

Pengujian batas plastis bertujuan untuk menentukan kadar air minimum yang masih memungkinkan tanah berada dalam kondisi plastis. Nilai ini menggambarkan batas bawah daerah plastis tanah dan ditetapkan berdasarkan prosedur pengujian sesuai dengan standar ASTM D424-74.

Selanjutnya, nilai Indeks Plastisitas (*Plasticity Index/PI*) dapat dihitung menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut:

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

PI = Indeks Plastisitas (%)

LL = Batas Cair (%)

PL = Batas Plastis (%)

c. Batas Susut (SL)

Batas susut (SL) merupakan kadar air pada batas antara keadaan semi padat dengan keadaan padat dimana tidak ada perubahan volume meskipun ada pengurangan kadar air. Batas susut dalam uji laboratorium dilakukan dengan menggunakan cawan susut. Tanah dimasukkan ke dalam cawan susut kemudian dikeringkan dengan oven.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kadar air tanah pada kondisi batas susut. Batas susut tanah adalah kadar air tanah minimum yang masih dalam keadaan semi solid, dan juga merupakan batas antara keadaan semi solid dan solid (ASTM D 427 – 74).

1. Batas Susut (SL)

- a) Apabila nilai berat jenis (*specific gravity*) benda uji telah diketahui, maka nilai derajat kejenuhan (*degree of saturation*), yang disimbolkan dengan **SL**, dapat ditentukan menggunakan Persamaan (6). Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$SL = \frac{V_0}{W_0} - \frac{1}{G} \times 100 \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan

SL = nilai batas susut (*shrinkage limit*) tanah (%).

W_0 = berat benda uji setelah dikeringkan (gram).

V_0 = volume benda uji setelah proses pengeringan (cm^3).

G = berat jenis butiran tanah (*specific gravity*).

2. Apabila nilai berat jenisnya belum diketahui, maka SL dapat dihitung dengan persamaan 7, sebagai berikut:

$$SL = \left(W - \frac{V - V_0}{V_0} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

SL = nilai batas susut (*shrinkage limit*) tanah (%).

w = kadar air tanah pada kondisi basah yang ditempatkan ke dalam cawan (%).

W = berat benda uji dalam kondisi basah (gram).

W_o = berat benda uji setelah proses pengeringan (gram).

V = volume benda uji pada kondisi basah, yang sama dengan volume cawan (cm³).

V_o = volume benda uji setelah mengalami proses pengeringan (cm³).

2.5.4 Distribusi Ukuran Butiran

- a) Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah dengan menentukan persentase partikel yang tertahan pada setiap ukuran saringan, khususnya saringan No. 200. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D422-72 dan digunakan sebagai dasar dalam klasifikasi tanah berbutir kasar.
- b) Pengujian analisis hidrometer bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran halus yang tidak dapat dianalisis menggunakan metode saringan. Pengujian ini diterapkan pada tanah yang seluruh atau sebagian besar partikelnya lolos saringan No. 10 dan dilakukan berdasarkan prinsip sedimentasi menggunakan hidrometer sesuai dengan standar ASTM D421-72.
- c) Ukuran butiran terbesar, yang dinyatakan sebagai D (mm), dihitung untuk setiap waktu pembacaan (T) berdasarkan kedalaman efektif (L) dari suspensi tanah. Perhitungan tersebut dilakukan menggunakan Persamaan (8), sebagai berikut.

$$D = \frac{K\sqrt{L}}{T} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

D = ukuran butiran terbesar dalam suspensi (mm).

K = konstanta yang nilainya dipengaruhi oleh temperatur suspensi (°C) dan berat jenis butiran tanah (*specific gravity*, **G_s**).

L = kedalaman efektif hidrometer (cm), yang ditentukan berdasarkan jenis hidrometer yang digunakan serta nilai pembacaan hidrometer pada suspensi (R_1).

T = waktu pembacaan selama pengujian, yang dinyatakan dalam satuan menit.

a. Menghitung persentase berat ($P\%$) dari butir yang lebih kecil dari pada (D) terhadap berat kering seluruh tanah yang diperiksa dengan persamaan sebagai berikut:

1. Jika digunakan hydrometer 151 H, maka dapat dihitung dengan persamaan 9, sebagai berikut:

$$P = \frac{100}{W} - \frac{G_{S1}}{G_S - 1} \times (R - 1) \dots\dots\dots(2.9)$$

2. Jika digunakan hydrometer 152 H, maka dapat dihitung dengan persamaan 10, sebagai berikut:

$$P = \left(\frac{R \cdot a}{W} \right) \times 100 \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

P = Persentase Berat (%)

R = Pembacaan Hydrometer Terkoreksi

G = Berat Jenis Tanah

A = Angka koreksi untuk hydrometer 152 H terhadap berat jenis butir

W = Berat Benda Uji

Berat Jenis, G	Faktor Koreksi, a	Berat Jenis	Faktor Koreksi, a
2,95	0,94	2,65	1,00
2,90	0,95	2,60	1,01
2,85	0,96	2,55	1,02
2,80	0,97	2,50	1,03
2,75	0,98	2,45	1,05
2,70	0,99		

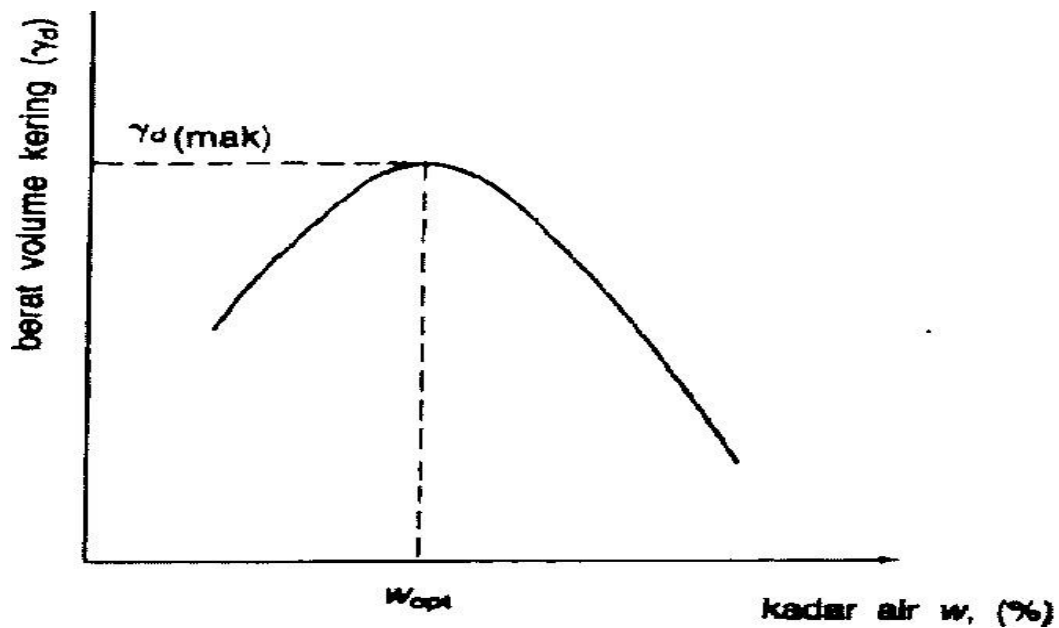
Tabel 2. 3 Ukuran butiran tanah dengan Hidrometer
(Hardiyatmo,2002)

2.6 Pemadatan Tanah

Pengujian pemadatan bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah melalui proses pemadatan contoh tanah di dalam cetakan silinder dengan ukuran tertentu menggunakan alat penumbuk yang telah distandarkan. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan cetakan berdiameter 102 mm (4 inci) dengan sampel tanah yang lolos saringan No. 40.

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai kepadatan kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) dan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) suatu tanah. Metode yang digunakan adalah Standard Proctor sesuai dengan ketentuan ASTM D698.

Menurut Proctor (1933) dalam Hardiyatmo (2010), terdapat hubungan yang erat antara kadar air dan berat volume kering tanah hasil pemadatan. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kadar air akan memengaruhi tingkat kepadatan yang dapat dicapai oleh tanah selama proses pemadatan.



Gambar 2. 3 Hubungan Kadar air dan berat volume kering
(Hardiyatmo,2002)

Dimana :

γ_d : berat volume kering (gr / cm³)

γ_d (Mak) : berat volume kering maksimum (gr / cm³)

W : Kadar air (%)

Wopt : kadar air Optimum (%)

2.7 Kuat Geser Tanah

Menurut Mohr (1910), hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang keruntuhan dinyatakan melalui suatu persamaan yang didasarkan pada kombinasi kondisi kritis dari kedua jenis tegangan tersebut. Teori ini menjelaskan bahwa kegagalan suatu material terjadi apabila tegangan normal dan tegangan geser secara bersamaan mencapai kondisi kritis yang menyebabkan terjadinya keruntuhan.

Dalam analisis geoteknik, kedua komponen tegangan tersebut merupakan parameter yang sangat penting untuk diperhitungkan, terutama dalam mengevaluasi stabilitas lereng serta menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada dinding penahan tanah. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dengan τ adalah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*). dan σ adalah tegangan normal pada saat kondisi tersebut. Menurut Hardiyatmo (2002), kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Coulomb (1776) mendefinisikan $f(\sigma)$ sebagai.

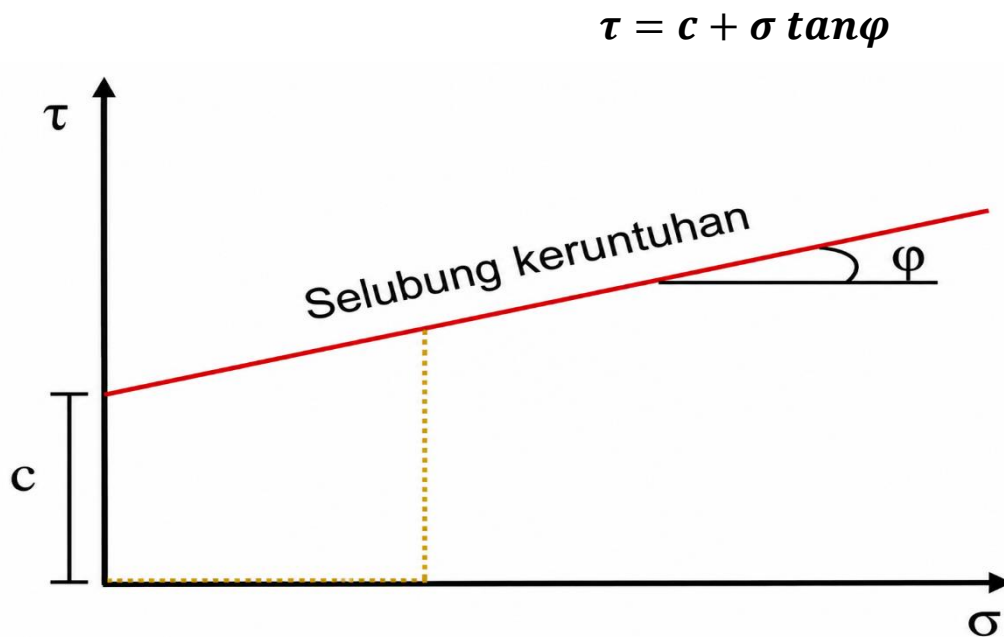
$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana;

τ = Kuat Geser tanah (kN/m²)

c = Kohesi Tanah (kN/m²)

φ = sudut gesek dalam tanah atau sudut gesek internal (derajat) σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)



Gambar 2. 4 Hubungan kuat geser tanah dengan tegangan
(Columb,1776)

Dimana :

τ = Kuat Geser tanah (kN/m^2)

c = Kohesi Tanah (kN/m^2)

φ = sudut gesek dalam tanah atau sudut gesek internal (derajat)

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

τ_f = Nilai tegangan maksimum

Kohesi merupakan gaya tarik-menarik yang terjadi antarpartikel penyusun tanah sehingga memberikan kontribusi terhadap kemampuan tanah dalam menahan gaya geser. Bersama dengan sudut gesek dalam, kohesi menjadi salah satu parameter utama yang menentukan kuat geser tanah dan ketahanannya terhadap deformasi akibat pembebanan.

Sudut gesek dalam merupakan sudut yang menggambarkan hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada tanah atau batuan. Parameter ini menun-

jukkan besarnya hambatan gesekan antarpartikel ketika material mengalami pembebanan hingga mencapai kondisi keruntuhan. Semakin besar nilai sudut geser dalam suatu material, semakin tinggi kemampuan material tersebut dalam menahan gaya luar atau beban yang bekerja, sehingga kekuatan gesernya juga semakin besar padanya. Nilai sudut geser (ϕ) sebesar juga berhubungan dengan tingkat kepadatan jenis tanah.

Tabel 2. 4 Besaran Sudut Geser dalam tanah

Tingkat Kepadatan Sudut	
Geser Dalam	
Sangat lepas	<30
Lepas	30-35
agak Padat	35-40
Padat	40-45
<u>Sangat Padat</u>	<u>>45</u>

(Bowles,1989)

2.8 Bottom Ash

Bottom ash merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) maupun berbagai industri yang memanfaatkan batubara sebagai sumber energi. Berdasarkan proses pembentukannya, abu hasil pembakaran batubara dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *fly ash* (abu terbang) yang terbawa aliran gas buang dan ditangkap menggunakan alat pengendali emisi, serta *bottom ash* (abu dasar) yang memiliki ukuran partikel lebih besar sehingga mengendap di bagian bawah ruang pembakaran.

Dari segi karakteristik fisik, *bottom ash* umumnya berwarna abu-abu hingga kehitaman dengan tekstur yang kasar, berpori, dan memiliki bentuk butiran yang tidak beraturan menyerupai pasir atau batu apung. Ukuran partikel *bottom ash* relatif lebih besar dibandingkan *fly ash*, sedangkan berat jenisnya cenderung lebih

rendah karena banyaknya rongga pada setiap partikel. Karakteristik tersebut memberikan kemampuan drainase yang baik sehingga *bottom ash* berpotensi dimanfaatkan sebagai material konstruksi maupun bahan tambahan dalam stabilisasi tanah.

Secara kimia, *bottom ash* tersusun atas kandungan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3) sebagai komponen utama, serta mengandung kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), kalium oksida (K_2O), dan natrium oksida (Na_2O) dalam jumlah yang lebih kecil. Kandungan silika dan alumina yang cukup tinggi menyebabkan *bottom ash* memiliki sifat pozzolanik, yaitu kemampuan untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida di hadapan air sehingga menghasilkan senyawa sementasi yang dapat meningkatkan kekuatan tanah serta mengurangi tingkat kompresibilitasnya. Oleh sebab itu, *bottom ash* banyak dimanfaatkan sebagai bahan campuran pada stabilisasi tanah lempung, beton, mortar, maupun konstruksi perkerasan jalan.

Dalam bidang geoteknik, pemanfaatan *bottom ash* sebagai bahan stabilisasi tanah telah banyak dikaji karena mampu meningkatkan kualitas sifat teknik tanah. Penambahan *bottom ash* diketahui dapat menurunkan nilai indeks plastisitas, mengurangi besarnya penurunan akibat konsolidasi, meningkatkan permeabilitas, serta mempercepat proses konsolidasi pada tanah lempung. Selain memberikan manfaat terhadap peningkatan sifat tanah, penggunaan *bottom ash* juga mendukung upaya pelestarian lingkungan melalui pemanfaatan limbah pembakaran batubara, sehingga dapat mengurangi volume limbah yang ditimbun sekaligus menekan penggunaan material alam sebagai bahan konstruksi.



Gambar 2. 5 *Bottom ash*
(Dokumentasi pribadi, 2026)

2.9 Penelitian sebelumnya

Penelitian yang dilakukan oleh Widianoro (2017) berfokus pada penggunaan bahan aditif gipsum untuk meningkatkan stabilitas tanah di berbagai lingkungan. Pada penelitian ini penambahan gipsum digunakan pada kadar gipsum 0%, 15%, 20%, dan 25% dari berat kering tanah. Pengujian yang dilakukan di laboratorium antara lain uji mineral tanah, sifat indeks, batas Atterberg, uji ayakan, uji hidrometer, uji tekan, uji swelling, dan uji geser langsung.

Penelitian yang dilakukan Elfrida (2019) bertujuan untuk mengetahui kuat geser tanah lempung sebagai fungsi dari perubahan kadar air. Penelitian ini dilakukan di laboratorium dengan menggunakan uji standar Proctor untuk mendapatkan kepadatan kering maksimum dan kadar air optimal. Tanah liat dari Tanjung Batu dan Tanjung Balai Karimun digunakan dalam penelitian ini. Pada penelitian ini sampel tanah dianalisis terlebih dahulu dengan memvariasikan kadar air OMC, OMC – OMC 20%, OMC – OMC 10%, OMC + OMC 10%, OMC + OMC 20%, nilai kohesi, dan sudut gesek OMC. Irigasi Kandungannya lebih besar yaitu sudut $43,35^\circ$ dan gaya kohesif $0,944 \text{ kg/cm}^2$.

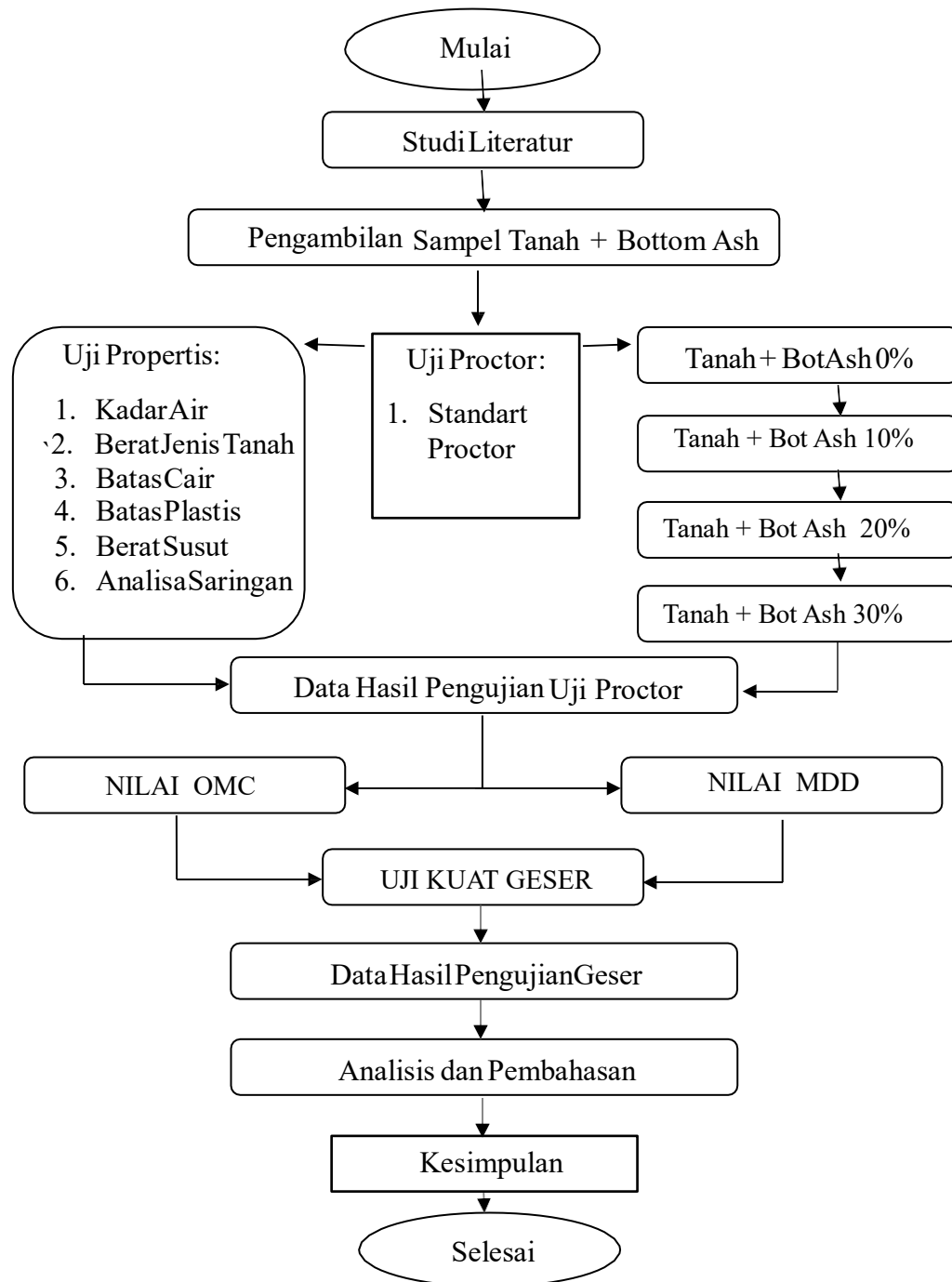
Penelitian yang dilakukan Yuda (2018) Variasi penambahan abu dasar sebanyak: 0%, 12,5%, 25%, 37,5%, 50%, dan 62,5%. Untuk pengujian tanah yang dilakukan meliputi uji konsistensi tanah, uji berat jenis tanah, uji pemadatan dengan standart protor proctor, dan terakhir uji kuat tekan bebas setelah itu dilakukan perhitungan daya dukung pondasi dangkal. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh penambahan abu dasar sebesar 0%, 12,5%, 25%, 37,5%, 50%, dan 62,5% pada tanah lempung ekspansif terhadap nilai daya dukung pondasi dangkal adalah $25,864 \frac{t}{m^2}$, $42,159 \frac{t}{m^2}$, $45,121 \frac{t}{m^2}$, $49,575 \frac{t}{m^2}$, $39,366 \frac{t}{m^2}$, dan $29,666 \frac{t}{m^2}$.

Penelitian yang dilakukan Eric (2024) bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan abu terbang terhadap sifat kekuatan geser tanah (kekuatan geser, tegangan geser, kadar air, regangan geser, hubungan antara tegangan geser dan regangan geser, dan hasil pemadatan menggunakan metode Proctor standar). Campuran abu terbang yang digunakan bervariasi konsentrasinya menjadi 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat kering tanah. Tanah yang digunakan adalah tanah laterit yang terbentuk di lingkungan lembap, dengan kandungan bahan organik sedang, kepadatan tinggi, tekstur padat, dan pH netral. Abu terbang adalah produk limbah yang diperoleh dari pembakaran batubara di pembangkit listrik melalui proses multi-siklon. Tergantung pada kandungan abu terbangnya, mungkin dapat digunakan sebagai bahan penstabil untuk meningkatkan daya dukung dan sifat rekayasa tanah.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, penggunaan bahan aditif, termasuk *bottom ash* telah terbukti mampu meningkatkan sifat teknik tanah, namun sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan daya dukung, kuat tekan bebas, serta perubahan kadar air optimum. Sementara itu, penelitian mengenai pengaruh variasi penambahan *bottom ash* terhadap parameter kuat geser tanah, yaitu kohesi dan sudut geser dalam, melalui *Direct Sear Test* pada tanah lempung dari Kawasan temiang, Kota Batam, masih terbatas, oleh karna itu penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Alur penelitian merupakan rangkaian tahapan yang disusun secara sistematis untuk mencapai tujuan penelitian. Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang membahas karakteristik tanah lempung, metode stabilisasi menggunakan bottom ash, metode pemadatan Standard Proctor, serta pengujian Direct Shear Test. Studi literatur tersebut dijadikan sebagai landasan dalam penyusunan metodologi penelitian dan sebagai acuan dalam menganalisis hasil pengujian.

Tahapan berikutnya adalah pengambilan sampel tanah di kawasan Temiang, Kota Batam, yang dilanjutkan dengan persiapan bahan dan peralatan penelitian. Selanjutnya, tanah dan bottom ash diuji sifat fisiknya melalui pengujian kadar air, berat jenis (specific gravity), analisis distribusi ukuran butir (sieve analysis), hidrometer, dan batas-batas Atterberg untuk mengetahui karakteristik awal tanah. Setelah karakteristik fisik tanah diperoleh, dilakukan pembuatan campuran tanah dengan variasi penambahan bottom ash sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% berdasarkan berat kering tanah. Setiap variasi campuran kemudian diuji menggunakan metode Standard Proctor untuk memperoleh nilai Optimum Moisture Content (OMC) dan Maximum Dry Density (MDD). Nilai OMC dan MDD yang diperoleh selanjutnya dijadikan acuan dalam proses pembuatan benda uji untuk Direct Shear Test.

Tahap selanjutnya adalah pelaksanaan Direct Shear Test guna menentukan parameter kuat geser tanah, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) pada setiap variasi campuran. Data hasil pengujian kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk tabel maupun grafik untuk menganalisis pengaruh penambahan bottom ash terhadap karakteristik pemadatan dan kuat geser tanah. Tahap akhir penelitian adalah analisis hasil, penarikan kesimpulan, dan penyusunan saran. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian yang telah dianalisis dan disesuaikan dengan tujuan penelitian, sedangkan saran diberikan sebagai rekomendasi bagi penelitian selanjutnya maupun sebagai bahan pertimbangan dalam penerapan hasil penelitian di lapangan.

3.2 Lokasi Tanah Sample

Tanah yang di gunakan untuk pembuatan sampel merupakan tanah yang berasal dari samping Wisata Mata Kucing Temiang, Kota Batam, Kepulauan Riau. Pada penelitian ini yang di ambil tergolong tanah lempung berbutir halus yang di ambil dari galian 0-1 meter dari permukaan tanah.

Pada pengujian ini bahang tambahan untuk stabilitas adalah *bottom ash* dengan persentase campuran 10%, 20% dan 30% dari berat kering tanah 2kg yang selanjutnya dilakukan pemeraman selama 1 hari untuk setiap campuran pengujian kuat geser.

3.3 Pengujian Analisa Saringan (*Sieve Analysis*)

Pengujian analisa saringan bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah yang digunakan mulai dari yang berdiameter 4,76 mm sampai 0,074 mm (lolos saringan ASTM no.4 dan tertahan saringan no.20) dengan cara mekanis.

3.4 Pengujian Berat Jenis Tanah (*Specific Gravity Test*)

Pengujian berat jenis tanah bertujuan untuk mengetahui angka perbandingan berat isi butiran tanah dengan berat isi air suling dalam piknometer pada volume yang sama dan suhu tertentu.

3.5 Pengujian Kadar air Tanah (*Water Moisture Content*)

Kadar air tanah adalah perbandingan berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat butiran tanah kering yang dinyatakan dalam satuan persen (%).

3.6 Pengujian Batas-batas Atterbeg (*Atterbeg Limit*)

Dalam menentukan atterberg limits pengujian dibagi ke dalam 3 bentuk diantaranya adalah;

1. Uji batas cair (*liquid limit*)

Pengujian batas cair terhadap tanah dilakukan untuk menentukan konsistensi perilaku material dan sifatnya, dimana konsistensi tanah tergantung dari nilai batas cairnya.

2. Uji batas plastis (*plastic limit*)

Batas plastis dilakukan dengan tujuan untuk menentukan batas terendah kadar air ketika tanah dalam keadaan plastis.

3. Uji batas susut (*shrinkage limit*)

Pengujian batas susut ini memiliki tujuan untuk menentukan kadar air pada sampel tanah dalam keadaan menyusut setelah kering.

3.7 Perbedaan Standard Proctor Test dan Modified Proctor Test

Perbedaan antara Standard Proctor dan Modified Proctor terletak pada besarnya energi yang digunakan dalam proses pemadatan. Standard Proctor menggunakan energi pemadatan yang lebih rendah, sedangkan Modified Proctor menggunakan energi yang lebih besar. Perbedaan energi tersebut menyebabkan Modified Proctor umumnya menghasilkan berat isi kering maksimum yang lebih tinggi dan kadar air optimum yang lebih rendah dibandingkan Standard Proctor.

Tabel 3. 1 Perbedaan Metode *Standard Proctor* test dan *Modified Proctor* test.

<i>STANDARD PROCTOR TEST</i>					
		Cara A	Cara B	Cara C	Cara D
1	Silinder pemadatan	kecil	besar	kecil	Besar
2	Material, lewat saringan	no. 4	no. 4	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{3}{4}$ "
3	Penumbuk	Standard	Standard	Standard	Standard
4	Jumlah lapis	3	3	3	3
5	Jumlah tumbukan tiap lapis	25	56	25	56
6	Material siap ditumbuk yang perlu disediakan setiap kali	2,7 kg	6,4 kg	4,5 kg	10 kg
<i>MODIFIED PROCTOR TEST</i>					
		Cara A	Cara B	Cara C	Cara D

1	Silinder pemadatan	kecil	besar	Kecil	Besar
2	Material, lewat saringan	no. 4	no. 4	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{3}{4}$ "
3	Penumbuk	berat	berat	berat	berat
4	Jumlah lapis	5	5	5	5
5	Jumlah tumbukan tiap lapis	25	56	25	56
6	Material siap ditumbuk yang perlu disediakan setiap kali	3,2 kg	7,3 kg	5,4 kg	11,3 kg

3.8 Pengujian Pemadatan Standar (*Standart Proctor Test*)

Pemadatan proctor dimaksudkan untuk mencari nilai kerapatan maksimum pada kadar air optimum dari suatu sampel tanah yang dipadatkan. Tujuannya adalah sebagai dasar untuk menentukan presentase pemadatan dan kadar air yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi pemadatan yang sesuai kebutuhan lapangan.

3.9 Pengambilan Data Penelitian

Pada saat melakukan penelitian tanah ini demi untuk mendapatkan hasil atau data tentang sampel tanah yang diuji, penulis melakukan beberapa langkah sebagai berikut:

3.9.1 Studi Literatur

Studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenan dengan metode pengumpulan data Pustaka, membaca, mencatat, serta mengelola bahan penelitian. Dalam tahap ini penulis mengumpulkan berbagai referensi untuk menyusun laporan ini. Studi literatur meliputi properties, standard proctor dan modified proctor.

3.9.2 Analisis dan Evaluasi

Setelah seluruh pengujian dilaksanakan maka akan dilakukan tahapan Analisa dan evaluasi. Dilakukannya Analisa dan evaluasi untuk melihat kembali hasil penelitian terhadap sampel tanah yang diuji dan membandingkan dari hasil pengujian tanah asli dengan tanah yang telah di campur, hasilnya menjadi lebih baik atau menjadi lebih buruk.

3.10 Prosedur Standar Pengujian

Association of State Highway and Transportation Officials), maupun SNI (*Standar Nasional Indonesia*). Penerapan prosedur tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa setiap pengujian dilaksanakan secara sistematis dan seragam sehingga menghasilkan data yang akurat, konsisten, serta dapat dipertanggungjawabkan dan dibandingkan dengan hasil pengujian dari penelitian atau laboratorium lain.

Dalam bidang geoteknik, prosedur standar pengujian meliputi beberapa tahapan, yaitu persiapan sampel, penggunaan peralatan sesuai spesifikasi, pelaksanaan pengujian, pencatatan hasil, hingga analisis dan pelaporan data. Masing-masing jenis pengujian memiliki prosedur yang berbeda sesuai dengan tujuan dan karakteristik pengujian yang dilakukan. Sebagai contoh, pengujian kadar air mengacu pada ASTM D2216, pengujian berat jenis menggunakan ASTM D854, pengujian batas Atterberg mengacu pada ASTM D4318, sedangkan pengujian distribusi ukuran butir dilakukan berdasarkan ASTM D6913 untuk analisis saringan dan ASTM D7928 untuk analisis hidrometer.

3.10.1 Pengujian Analisa Saringan

Pengujian tanah dengan Analisa saringan bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah sampel yang digunakan mulai dari yang berdiameter 4,76 mm sampai 0,074 mm (lolos saringan ASTM no.4 dan tertahan saringan no.20) dengan cara mekanis.

a. Persiapan

1. Siapkan sampel tanah yang akan diuji sebanyak ± 500 gram
2. Rendam tanah didalam baskom selama ± 24 jam.
3. Saring tanah yang telah direndam dengan menggunakan saringan mesh no.200 ASTM dibawah keran air agar bersih dari butiran *clay*, *silt* dan *koloid-koloid*.
4. Masukkan tanah yang sudah bersih ke dalam can atau talam, lalu dioven dengan suhu 70°C - 110°C selama ± 24 jam

b. Cara pengujian

1. Keluarkan sampel tanah yang telah dioven dan diamkan sejenak agar dingin, lalu timbanglah berat sisanya.
2. Susun saringan mesh menurut urutan yaitu mulai dari nomor 4, 8, 16, 30, 40, 50, 100 dan 200 (dari yang terbesar hingga ke yang terkecil) serta pan.
3. Masukkan sampel tanah yang telah ditimbang ke atas saringan mesh no.4 ASTM.
4. Letakkan susunan saringan mesh pada mesin pengguncang listrik (*Motorized Dynamic Sieve Shaker*) dan tutup bagian atas saringan, kemudian nyalakan mesin pengguncang dan biarkan selama ± 15 menit.
5. Biarkan selama ± 5 menit setelah selesai di guncang agar debu mengendap turun.
6. Kumpulkan sampel tanah yang tertahan pada masing-masing saringan mesh, kemudian timbang tanah-tanah tersebut dan catat beratnya.
7. Bersihkan saringan mesh dari sisa-sisa butiran sampel tanah pada masing-masing saringan mesh dengan bantuan kuas atau sikat gigi.

3.10.2 Pengujian Kadar Air Tanah

Pengujian ini bertujuan untuk memeriksa kadar air dalam kandungan suatu tanah. Kadar air suatu tanah merupakan perbandingan antara berat air yang dikandung tanah dan berat kering tanah, dan hasilnya dinyatakan dalam persen.

a. Persiapan

1. Ambil sampel tanah yang telah dibungkus rapat kedap udara.
2. Bersihkan serta keringkan cawan yang akan digunakan kemudian timbang dan catat beratnya masing-masing (W1).
3. Beri simbol atau nomor pada setiap cawan yang akan digunakan

b. Cara Pengujian

1. Masukkan sampel tanah yang akan diperiksa ke dalam cawan lalu timbang kemudian catat beratnya (W_2).
2. Masukkan cawan dengan keadaan terbuka tanpa tutup ke dalam oven dengan suhu $\pm 110^\circ\text{C}$ selama ± 24 jam.
3. Keluarkan dari oven lalu dinginkan sejenak.
4. Timbang masing-masing cawan yang berisi tanah kering lalu catat beratnya (W_3)

3.10.3 Pengujian Berat Jenis Tanah

Pengujian berat jenis tanah bertujuan untuk mengetahui angka perbandingan berat isi butiran tanah dengan berat isi air suling dalam piknometer pada volume yang sama dan suhu tertentu.

a) Persiapan

1. Siapkan dua buah piknometer yang telah dibersihkan dan dikeringkan, kemudian ditimbang berserta dengan tutupnya dan catat beratnya (W_1).
2. Bahan uji yang digunakan adalah sampel tanah yang telah lolos saringan mesh ASTM no.40 dan sudah dikeringkan dalam oven selama ± 24 jam dengan suhu temperature $\pm 110^\circ\text{C}$

b) Cara Pengujian

- a. Masukkan sampel tanah kedalam piknometer sampai batas $1/3$ dari piknometer, lalu timbang dan catat beratnya (W_2).
- b. Masukkan air suling atau air aquades hingga $2/3$ dari piknometer.
- c. Catat suhu air dalam piknometer dengan menggunakan thermometer (t_1).
- d. Rebus piknometer diatas kompor listrik selama ± 15 menit dengan tujuan agar udara yang terperangkap dalam butiran-butiran tanah keluar dan goyangkan piknometer beberapa waktu sekali untuk memudahkan keluarnya gelembung udara.
- e. Catat suhu air pada saat mendidih selama pinometer direbus untuk mendapatkan suhu didih tertinggi (t_2).

- f. Rendam piknometer di dalam baskom yang telah diisi air untuk di dinginkan selama ± 10 jam kemudian catat suhunya setelah itu (t_3) agar bertujuan suhu akhir sama dengan suhu awal.
- g. Tambahkan air suling kedalam piknometer sampai penuh kemudian tutup dan bersihkan bagian luarnya.
- h. Timbang berat piknometer yang berisi $1/3$ sampel tanah dan $2/3$ air suling tersebut kemudian catat beratnya (W_3).
- i. Kosongkan dan bersihkan piknometer, kemudian isi penuh dengan air suling sampai bebas dari gelembung udara, tutup dan bersihkan piknometer lalu timbang dan catat beratnya (W_4).

3.10.4 Pengujian Batas Plastis

Tujuan dari pengujian ini adalah mencari kadar air pada batas plastis dari sebuah sampel tanah atau untuk menentukan batas terendah kadar air ketika tanah dalam keadaan plastis, dan angka Indeks Plastisitas suatu tanah.

- a. Persiapan
 1. Pastikan alat-alat yang akan digunakan bersih dan kering.
 2. Siapkan sampel tanah yang telah lolos saringan mesh ASTM no.40 dan dalam kondisi kering.
 3. Siapkan botol penyemprot yang berisikan air suling atau air aquades.
 4. Timbang masing-masing berat cawan yang akan digunakan (W_1) dan berikan simbol atau nomor.
- b. Cara Pengujian
 1. Masukkan sampel tanah ke dalam mangkuk porselin dan kemudian campur dengan air suling dan diaduk dengan spatula hingga homogen.
 2. Ambil sampel tanah sedikit lalu gulung di atas pelat kaca sampai berdiameter 3 mm. Bila kadar air berlebih, pada waktu sampel tanah mencapai diameter 3 mm tidak terjadi retak-retak, percobaan ini harus diulang kembali dengan menambahkan sampel tanah. Sedangkan bila kadar air kurang, maka

sampel tanah akan retak- retak sebelum mencapai diameter 3 mm. Perco-
baan ini harus diulang kembali dengan menambahkan air sehingga sampel
tanah tepat retak-retak pada waktu mencapai diameter 3 mm.

3. Masukkan sampel tanah yang mulai retak-retak halus pada diameter 3 mm ke dalam cawan, kemudian timbang dan catat berat cawan + tanah (W2).
4. Tutup cawan secepatnya agar kadar air tidak berkurang karena penguapan.
5. Masukkan cawan berisikan sampel tanah tersebut dalam keadaan terbuka ke dalam oven yang bersuhu $\pm 110^{\circ}\text{C}$ selama ± 18 jam
6. Setelah di oven dalam waktu ± 18 jam, keluarkan sampel tanah dari oven kemudian timbang dan catat beratnya guna mendapatkan berat airnya (W3).

3.10.5 Pengujian Batas Susut

Pengujian batas susut ini memiliki tujuan untuk menentukan kadar air pada sampel tanah dalam keadaan menyusut setelah kering dan tidak akan mengalami penyusutan selanjutnya

a. Persiapan

1. Siapkan sampel tanah yang telah lolos saringan mesh ASTM no.40 dan dalam kondisi kering.
2. Siapkan botol penyemprot yang berisikan air suling atau air aquades
3. Timbang dan catat berat coated dish atau cawan yang diperlukan

b. Cara Pengujian

1. Masukkan sampel tanah ke dalam mangkuk porselin dan campurkan air suling secukupnya kemudian aduk dengan spatula hingga homogen
2. Perlakukan sampel tanah yang sudah homogen tersebut seperti pada langkah-langkah pengujian batas cair tanah, usahakan sampel tanah telah merapat sepanjang 0.5 inch pada kisaran 20-25 ketukan.
3. Ambil sampel tanah dari alat cassagrande dan masukkan ke dalam coated dish yang sudah diolesi vaseline. Jangan lupa untuk mengetuk-ngetuk

coated dish agar sampel tanah mengisi penuh seluruh bagian *coated dish* dan bebas dari udara.

4. Timbang sampel tanah dan *coated dish* tersebut (W2).
 5. Ulangi percobaan tersebut sebanyak dua kali.
 6. Diamkan *coated dish* dan sampel tanah di udara terbuka selama ± 24 jam agar tidak mengalami retak-retak akibat pemanasan secara tiba-tiba.
 7. Masukkan sampel tanah tersebut kedalam oven yang bersuhu temperature $\pm 110^{\circ}\text{C}$ selama ± 24 jam
 8. Diamkan *coated dish* dan sampel tanah di udara terbuka selama ± 24 jam agar tidak mengalami retak-retak akibat pemanasan secara tiba-tiba.
 9. Masukkan sampel tanah tersebut kedalam oven yang bersuhu temperature $\pm 110^{\circ}\text{C}$ selama ± 24 jam
 10. Keluarkan *coated dish* dan sampel tanah dari oven, kemudian timbang untuk mendapatkan berat keringnya (W3).
 11. Hitung volume tanah basah dan volume tanah kering dari sampel tanah yang digunakan.
- c. Menghitung Volume Tanah
1. Menghitung volume tanah Timbang *coated dish* (W1) yang digunakan
 2. Masukkan air raksa mercury ke dalam *coated dish* sampai penuh, lalu ratakan permukaan air raksa dengan pelat kaca agar sejajar dengan pinggiran *coated dish*.
 3. Kemudian timbang *coated dish* beserta isinya (W2).
 4. Volume tanah basah adalah;

$$V_w = \frac{w_{Hg}}{\rho_{Hg}} = \frac{w_2 - w_1}{\rho_{Hg}} \dots\dots\dots(3.1)$$

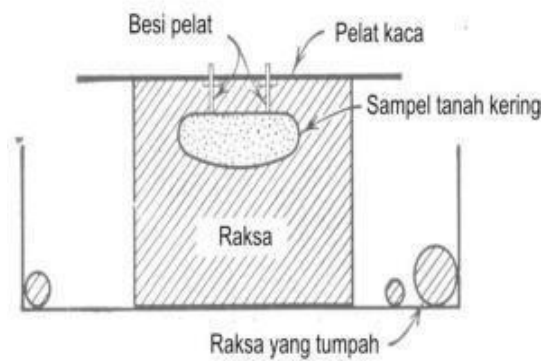
Dimana:

V_w = Volume tanah basah (cm^3) W_{Hg} = Berat air raksa (gram) ρ_{Hg} = Rata-rata nilai berat jenis tanah (%) W_1 = Berat *coated dish* (gram)

W_2 = Berat *coated dish* + air raksa (gram)

d. Volume tanah kering

- a) Masukkan air raksa mercury ke dalam *shrinkage dish* sampai penuh dan ratakan dengan pelat kaca.
- b) Timbang *shrinkage dish* beserta isinya sehingga diperoleh berat air raksa dalam *shrinkage dish* (WHg+s). Celupkan sampel tanah kering ke dalam *shrinkage dish* yang berisi air raksa mercury dengan menekannya secara hati-hati dengan pelat kaca berkaki tiga sehingga permukaan sampel tanah benar-benar berada tepat di permukaan air raksa sebagian raksa akan tumpah keluar.



Gambar 3. 1 Uji batas susut.

(Hardiyatmo,2002)

- c) Keluarkan sampel tanah dan timbang kembali *shrinkage dish* + air raksa merkuri yang tersisa (WHg).
- d) Volume tanah kering adalah;

$$V_w = \frac{w_{Hg+s} - w_{Hg}}{\rho_{Hg}} \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana:

V_w = Volume tanah kering (cm³)

WHg+s = Berat air raksa + *shrinkage dish* (gram)

WHg = Berat air raksa (gram)

ρ_{Hg} = Rata-rata nilai berat jenis tanah (%)

3.10.6 Pengujian Batas Cair Tanah

Pengujian batas cair ini digunakan untuk menentukan konsistensi perilaku material dan sifatnya pada tanah kohesif, dimana konsistensi tanah tergantung dari nilai batas cairnya. Disamping itu, nilai batas cair ini dapat digunakan untuk menentukan nilai indeks plastisitas tanah yaitu nilai batas cair dikurangi dengan nilai batas plastis.

1. Siapkan sampel tanah yang telah lolos saringan mesh ASTM no.40, dengan kondisi kering yang telah dioven sebelumnya.
2. Pastikan alat-alat yang akan digunakan telah bersih dan kering.
3. Siapkan botol penyemprot yang berisikan air suling atau air aquades.
4. Siapkan dan keringkan can yang akan digunakan
5. Masukkan sampel tanah ke dalam mangkuk porselin, kemudian dicampur dengan air suling dan aduk dengan spatula hingga tanah menjadi homogen (untuk sampel pertama dicampurkan dengan air suling sampai encer kemudian untuk sampel selanjutnya tambahkan tanahnya saja).
6. Masukkan sampel tanah ke dalam mangkuk cassagrande selapis demi selapis dan diusahakan tidak ada udara di antara setiap lapisan dengan spatula.
7. Tebal tanah yang dimasukkan ke dalam mangkuk cassagrande kurang lebih hingga setebal 0,5 inch pada bagian tengahnya.
8. Buat celah di tengah-tengah tanah yang berada pada mangkuk cassagrande dengan menggunakan grooving tool dalam posisi arah tegak lurus mangkuk, dilakukan dengan hati-hati agar tidak terjadi retak pada bagian bawahnya.
9. Jalankan alat cassagrande dengan kecepatan konstan 2 putaran per-detik dan tinggi jatuh 1 cm, dilakukan hingga tanah tepat merapat sepanjang 0.5 inch

10. Hentikan alat cassagrande saat tanah telah merapat dan catat jumlah ketukan yang diperlukan untuk tanah tersebut hingga merapat (untuk sampel pertama jumlah ketukan diusahakan mencapai 30 kali).
11. Timbang cawan yang digunakan terlebih dahulu (W1) dan berikan nomor atau symbol.
12. Ambil sebagian tanah dalam mangkuk cassagrande dan masukkan ke dalam cawan dan kemudian timbang berat cawan + tanah (W2).
13. Ulangi seluruh langkah diatas untuk enam sampel dengan nilai ketukan yang berbeda dengan ditambahkan jumlah tanah saat pengujian.
14. Masukkan cawan + tanah ke dalam oven dengan suhu temperatur $\pm 110^{\circ}\text{C}$ selama ± 18 jam, kemudian tanah keluarkan dari oven dan timbang beratnya (W3).
15. Hitung kadar airnya dan gambarkan dalam bentuk grafik semi logaritmis.

3.10.7 Pengujian Pemadatan *Standart Proctor*

Pengujian pemadatan bertujuan untuk mencari nilai kerapatan kering maksimum pada kadar air optimum dari suatu sampel tanah yang dipadatkan. Uji pemadatan ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan presentase pemadatan dan kadar air yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi pemadatan yang sesuai di lapangan.

a. Persiapan

1. Bersihkan alat-alat yang digunakan
2. Siapkan 6 kantong samp tanah masing-masing 2kg lolos saringan mesh ASTM no. 4
3. Campur masing-masing sampel dengan jumlah berat air yang berbeda mulai dari 100cc, 150cc, 200cc, 250cc, 300cc dan 350cc ini di lakukan untuk mencari Kadar Air Optimum (OMC)
4. Masukan sampel tanah kedalam kantong plastic dan diamkan selama 18-24 jam agar kadar air merata

b. Cara Pengujian

1. Siapkan mould, collar, dan base plate yang digunakan
2. Timbang mould dan ukur dimensinya untuk mengetahui volume tanah hasil pemadatan
3. Sampel tanah ke dalam mould, perkirakan jumlahnya sehingga setelah dipadatkan tingginya mencapai $\frac{1}{3}$ tinggi mould karena total lapisan pemadatan sebanyak 3 lapis).
4. Tumbuk 25 kali pada setiap lapisan secara merata dengan hammer atau alat penumbuk seberat 2,5 Kg dan tinggi jatuh 30 cm (Standard Proctor ASTM)
5. Setelah pemadatan lapis ketiga selesai, buka collar dan ratakan kelebihan tanah pada mould dengan pelat pemotong.
6. Timbang berat tanah beserta mould tersebut.
7. Keluarkan sampel tanah dari mould dengan bantuan hydraulic extruder.
8. Ambil sedikit sampel tanah dari bagian atas, tengah dan bawah untuk diperiksa kadar airnya, dengan demikian akan diperoleh kadar air rata-rata dari sampel tanah setelah dipadatkan

3.10.8 Pembuatan Sample Uji Geser

Setelah mengetahui nilai kadar air optimum dan nilai kepadatan kering maksimum dari pengujian pemadatan *standard proctor*. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam pembuatan sampel uji geser.

Prosedur pembuatan sampel uji geser



Gambar 3. 2 Proses Pembuatan sampel uji geser
(Dokumentasi Pribadi, 2026)

1. Pembuatan sampel uji geser diawali dengan pencampuran kadar air yang didapatkan dari hasil pengujian *standard proctor* dan dilakukan pencampuran dengan variasi *bottom ash* 10%, 20% dan 30% dengan pemadatan *standard proctor*.
2. Ring uji geser diposisikan pada posisi tengah diatas sampel tanah
3. Proses memasukan ring uji geser kedalam tanah dengan menggunakan ekstruder
4. Setelah ring uji geser terisi tanah dilakukan pengeluaran sampel dari ring agar tercetak dengan baik
5. Penampakan sampel uji geser dengan ring
6. Sampel uji geser setelah dikeluarkan dari ring dan ditimbang.

3.10.9 Pengujian Geser

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh parameter kuat geser tanah terkonsolidasi dan terdrainase berupa koefisien konsolidasi, kecepatan penggeseran,

tegangan geser tanah, regangan geser, dan hubungan antara tegangan geser dengan regangan geser.

a. Alat :

1. Oven pengering Alat geser

Terbuat dari bahan yang tidak mudah korosi dan kaku untuk mencegah distorsi selama pengujian.

2. Batu pori

Berfungsi untuk memberikan akses drainase air pori dengan pori-pori halus agar dapat mencegah penyusutan tanah.

3. Alat pembeban gaya vertikal

Ketelitian alat kurang lebih 1% dari penyimpangannya selama pengujian.

4. Alat pembeban gaya horizontal

Memberikan pembebanan horizontal dengan kecepatan konstan (penyimpangan yang diperbolehkan kurang dari 10%)

5. Arloji ukur deformasi

Dapat mengukur perubahan tebal beban uji dan regangan dengan ketelitian sampai 0,01 mm

6. Peralatan lain

Peralatan lain berupa neraca (dengan ketelitian 0,1 gram), wadah benda uji, alat cetak ulang atau alat pemadat benda uji, alat ukur waktu, penyuling air, pisau, dan penggaris.



Gambar 3. 3 Alat uji geser langsung

(Dokumentasi Pribadi, 2026)

Pelaksanaan :

1. Benda uji

- (i) Benda uji merupakan spesimen tanah *undisturbed* dengan diameter minimum benda uji berbentuk lingkaran 60 mm dan lebar minimum benda uji berbentuk persegi 60 mm. Tebal minimum benda uji 12,5 mm.

Perbandingan diameter dengan tebal benda uji adalah 3:1.

- (ii) Bahan penunjang uji (air), digunakan untuk merendam benda uji pada shear box.

2. Prosedur Percobaan

- a. Persiapkan alat untuk pengujian dan pastikan dapat berfungsi dengan baik.
- b. Cetak benda uji dari tabung atau silinder uji dengan menggunakan cincin cetak dengan kondisi benda uji *undisturbed*.
- c. Pasang pelat dasar pada bagian bawah kotak geser, selanjutnya pasang batu pori, kertas filter, pelat berlubang yang beralur, sampel uji pada cincin cetak, pelat berlubang yang beralur, kertas filter, batu pori dan landasan pembebanan berurutan dari bagian bawah kotak geser.
- d. Lakukan pembebanan dengan memasang beban vertikal. Atur pembacaan arloji geser sehingga menunjukkan angka nol.

- e. Buka kunci lengan pembeban dan baca deformasi pada arloji ukur gerak vertikal untuk $t=0; 0,5; 1,0; 1,5;$ dan seterusnya dalam interfal 0,5 menit.
- f. Lakukan pembebanan horizontal dengan membuka baut pengunci kotak geser kemudian set kecepatan pembebanan menjadi 1 mm/menit dan nyalakan tombol listrik alat penggeser.
- g. Catat waktu, deformasi vertikal, deformasi horizontal, dan gaya geser cincin pembeban setiap 0,5 menit.
- h. Berikan beban normal pada benda uji kedua sebesar dua kali beban normal yang pertama dan lakukan langkah-langkah (e), (f), (g) dan (h).
- i. Berikan beban normal pada benda uji ketiga sebesar dua kali beban normal yang kedua dan lakukan langkah-langkah (e), (f), (g) dan (h).

Prosedur :

1. Data

Laporan hasil pengujian dituliskan pada formulir yang terlampir. Data yang diambil selama praktikum adalah sebagai berikut.

Data yang diambil :

No.	Proses	Data yang diambil	Simbol	Sat	Jumlah Data	Keterangan
1	Persiapan sampel	Berat Spesimen	W_1	gr	3	
		Luas ring	A_1	cm^2	3	
		Faktor koreksi			3	
2	Shearing	Beban kerja	W_2	kg	3	Dial reading dicatat hingga spesimen mengalami keruntuhan
		Berat alat	W_3	kg	3	
		Dial Reading			Disesuaikan	

Tabel 3. 2 Tabel parameter pengujian Direct shear test

2. Perhitungan :

- (i) Hitung luas dan volume dari benda uji
- (ii) Hitung tegangan normal (σ')

$$\sigma' = \frac{\sigma}{A} \dots\dots\dots(3.3)$$

Dimana

σ =Tegangan normal pada bidang runtuh

A = Area luas bidang

(iii) Hitung gaya geser (P) dengan cara mengalikan arloji geser dengan angka kalibrasi cincin penguji, dan hitunglah tegangan geser maksimum yaitu geser maksimum dibagi luas bidang geser

$$\tau = \frac{p}{A} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dimana

p = gaya geser (kg/mm²)

A = Area luas bidang (cm²)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari hasil galian pada kedalaman 0–1 meter di lokasi yang berada di samping kawasan Wisata Mata Kucing, Temiang, Kota Batam, Kepulauan Riau. Tanah yang diperoleh berasal dari lahan terbengkalai dan terlebih dahulu dilakukan pengujian kadar air alami untuk mengetahui kondisi awal sampel sebelum proses pengujian lebih lanjut.

Selanjutnya, sampel tanah yang akan digunakan untuk pengujian sifat fisik dan mekanis dikeringkan, baik melalui proses pengeringan udara dengan memanfaatkan sinar matahari maupun menggunakan oven, hingga diperoleh kondisi tanah kering sebagai sampel dengan campuran *Bottom Ash* sebesar 0%.

Setelah proses pengeringan selesai, tanah disaring menggunakan saringan ASTM No. 4 dan ASTM No. 40. Sampel hasil penyaringan kemudian digunakan untuk melakukan pengujian berat jenis (*Specific Gravity*), batas-batas Atterberg (*Atterberg Limits*), serta analisis ukuran butiran (*Sieve Analysis*). Seluruh pengujian tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengetahui karakteristik sifat fisik tanah yang akan dijadikan objek penelitian.

4.2 Hasil Pengujian Propertis Tanah Asli

Dari pengujian propertis tanah yang dilakukan maka hasil nilai – nilai yang dijadikan sebagai acuan dasar dalam pembuatan sampel uji geser, yakni adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Nilai Output Pengujian Propertis Tanah

Properties Tanah	Nilai
Kadar Air Asli (%)	17.10
Batas Atterberg	
Batas Cair (%)	34.04
Batas Plastis (%)	23.60
Berat Jenis	1,25
Butiran	
Tanah yang tertahan pada Diameter Saringan 4,75mm(%)	8,70
Tanah yang lolos pada Diameter Saringan 4,75mm (%)	91,30
Tanah yang lolos pada Diameter Saringan 0,075mm (%)	4,34
Klasifikasi AASHTO / USCS	A-2-6 (CL)
Optimum Water Content (OMC) (%)	13%
Maximum Dry Density (MDD) gr/cm ³	1,701

Tabel 4. 2 Kandungan Mineral *Bottom Ash*
 Sumber : ULPTU Tanjung Balai Karimun

Kandungan Mineral	Nilai
SiO ₂ (%)	51.67
Al ₂ O ₃ (%)	33.76
Fe ₂ O ₃ (%)	7.62
CaO (%)	2.26
MgO (%)	0.99
K ₂ O (%)	0.54
Na ₂ O (%)	0.29
so ₃ (%)	0.51

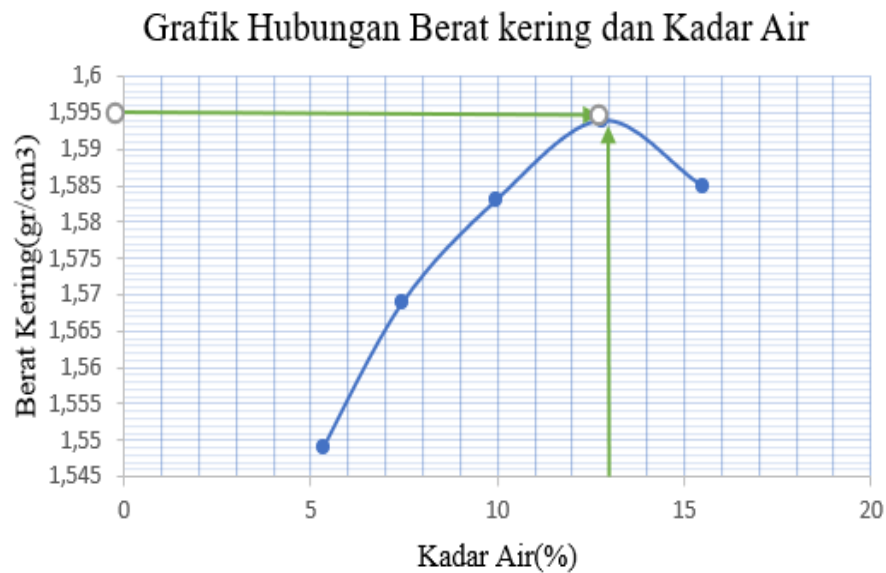
4.3 Pemadatan Tanah

Prinsip dasar pemadatan tanah menyatakan bahwa nilai berat volume kering (γ_d) akan meningkat seiring dengan bertambahnya kadar air (w) hingga mencapai

kondisi optimum. Pada kondisi tanpa kandungan air ($w = 0$), nilai berat volume basah (γ_b) sama dengan berat volume kering (γ_d). Dengan penambahan air secara bertahap dan energi pemadatan yang tetap, partikel-partikel tanah akan tersusun semakin rapat sehingga berat volume kering terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum ($\gamma_{d,maks}$). Kadar air yang menghasilkan berat volume kering maksimum tersebut disebut sebagai kadar air optimum (*optimum moisture content* atau *w_{opt}*). Apabila kadar air melebihi nilai optimum, penambahan air selanjutnya justru menyebabkan penurunan berat volume kering karena air mulai mengisi ruang pori dan menggantikan udara, sehingga kepadatan tanah yang dapat dicapai menjadi berkurang.

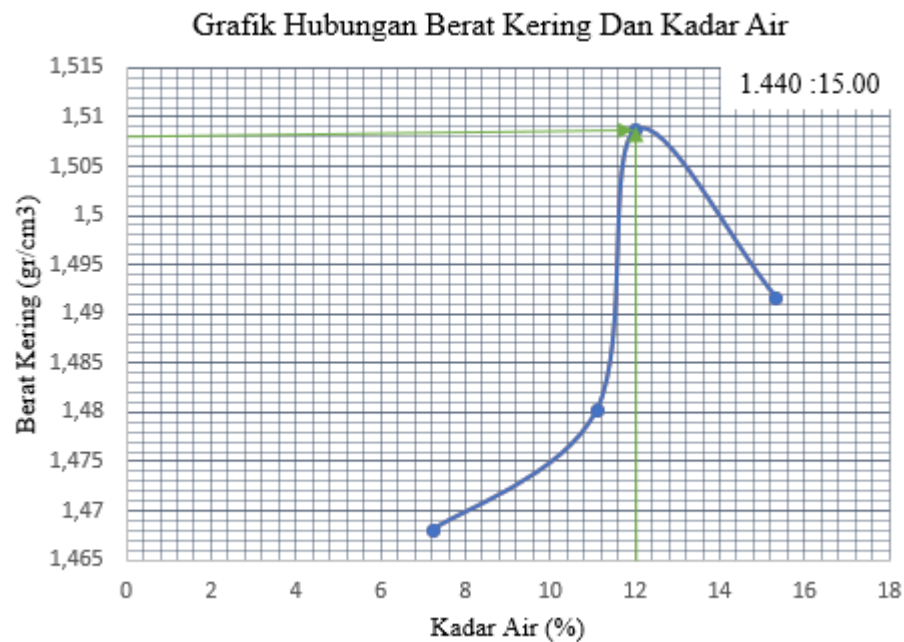


Gambar 4. 1 Tanah dan *bottom ash* yang sudah dicampur
(Dokumentasi Pribadi 2026)



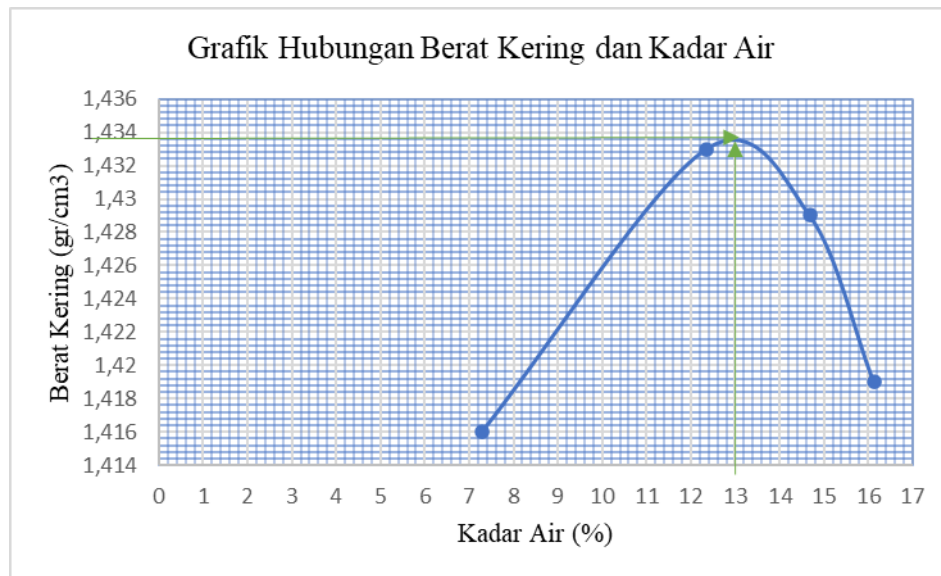
Gambar 4. 2 Nilai OMC dan MDD campuran *bottom ash* 0%

Berdasarkan grafik, berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) sebesar 1,594 gr/cm³ dicapai pada kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) sekitar 13%. Peningkatan kadar air hingga mencapai nilai OMC mampu meningkatkan kepadatan tanah, sedangkan penambahan kadar air yang melebihi nilai optimum menyebabkan berat isi kering menurun karena proses pemadatan tidak lagi berlangsung secara optimal.



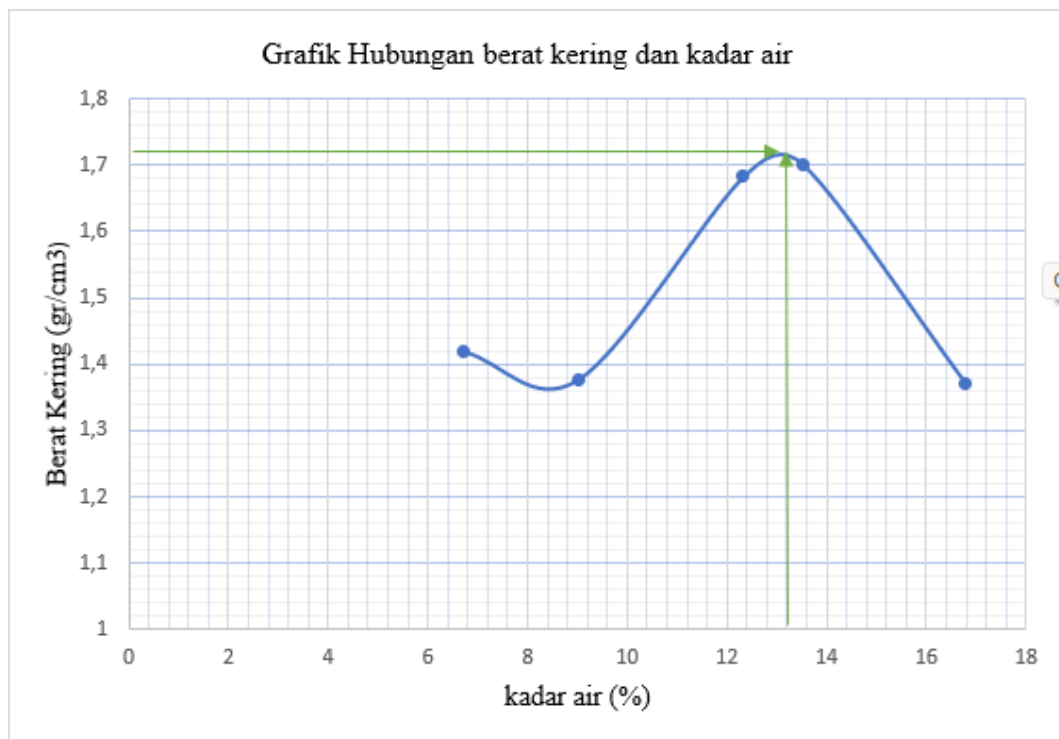
Gambar 4. 3 Nilai OMC dan MDD campuran *bottom Ash* 10%

Berdasarkan grafik, nilai berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) sebesar 1,509 gr/cm³ dicapai pada kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) sekitar 12%. Bertambahnya kadar air hingga mencapai nilai optimum mampu meningkatkan berat isi kering karena proses pemadatan berlangsung lebih efektif. Akan tetapi, setelah kadar air melampaui 12%, nilai berat isi kering menurun menjadi sekitar 1,492 gr/cm³. Kondisi ini menunjukkan bahwa kelebihan kadar air menyebabkan proses pemadatan menjadi kurang optimal, sehingga kepadatan tanah mengalami penurunan.



Gambar 4. 4 Nilai OMC dan MDD campuran *bottom Ash* 20%

Berdasarkan grafik, nilai berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) sebesar 1,434 gr/cm³ dicapai pada kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) sekitar 13%. Bertambahnya kadar air hingga mencapai kondisi optimum mampu meningkatkan berat isi kering karena susunan partikel tanah menjadi lebih rapat selama proses pemadatan. Namun, ketika kadar air melebihi nilai optimum, berat isi kering menurun hingga sekitar 1,419 gr/cm³. Hal ini mengindikasikan bahwa kelebihan kadar air menyebabkan proses pemadatan menjadi kurang efektif sehingga tingkat kepadatan tanah mengalami penurunan.



Gambar 4. 5 Nilai OMC dan MDD campuran *bottom Ash* 30%

Berdasarkan grafik, nilai berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) sebesar 1,71 gr/cm³ dicapai pada kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) sekitar 13–14%. Bertambahnya kadar air hingga mencapai kondisi optimum mampu meningkatkan berat isi kering karena proses pemadatan berlangsung lebih efektif. Namun, ketika kadar air melampaui nilai OMC, berat isi kering menurun hingga sekitar 1,37 gr/cm³ pada kadar air 17%. Hal ini menunjukkan bahwa kadar air yang berlebihan menyebabkan proses pemadatan menjadi kurang optimal, sehingga tingkat kepadatan tanah mengalami penurunan.

Tabel 4. 3 Tabel Nilai OMC dan MDD

<i>Bottom Ash</i>	Nilai OMC	Nilai MDD
0%	13%	1,594
10%	12%	1,509
20%	13%	1,433
30%	13%	1,701

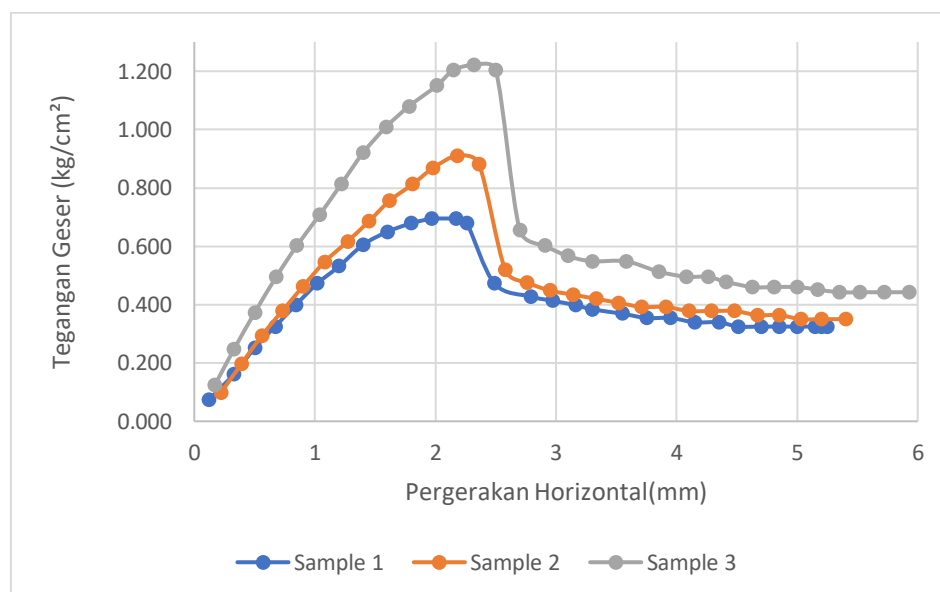
Berdasarkan hasil pengujian Standard Proctor, penambahan bottom ash memberikan pengaruh terhadap nilai kadar air optimum (*Optimum Moisture Content/OMC*) dan berat isi kering maksimum (*Maximum Dry Density/MDD*) pada tanah lempung. Tanah tanpa campuran (0%) menghasilkan nilai MDD sebesar $\pm 1,594 \text{ gr/cm}^3$ dengan OMC sebesar 13%, sedangkan pada penambahan bottom ash sebesar 10%, 20%, dan 30%, nilai MDD berturut-turut menjadi $\pm 1,509 \text{ gr/cm}^3$, $\pm 1,434 \text{ gr/cm}^3$, dan $\pm 1,710 \text{ gr/cm}^3$. Nilai OMC yang diperoleh berada pada kisaran 12–13%. Secara umum, setiap variasi campuran memiliki kadar air optimum yang mampu menghasilkan kepadatan maksimum. Namun, apabila kadar air melebihi nilai OMC, berat isi kering cenderung menurun karena proses pemadatan tidak lagi berlangsung secara optimal. Dengan demikian, penambahan bottom ash memengaruhi karakteristik pemadatan tanah serta mengubah nilai kepadatan maksimum yang dapat dicapai.

4.4 Pengujian Kuat Geser

Setelah mengetahui nilai Optimum Water Content (OMC) atau kadar air optimum serta berat kering maksimum tanah dari tanah asli, dibuatlah 4 sampel untuk dilakukan uji kuat geser dengan variasi *Bottom Ash* yang berbeda berkisar dari 0%, 10%, 20%, dan 30%. Uji geser ini dilakukan dengan pembebanan yang berbeda pada masing-masing sampelnya, yaitu dengan beban 2 kg, 4 kg, dan 8 kg.

Pengujian kuat geser dilakukan dengan metode uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase. Hasil dari setiap sampel uji geser langsung digambarkan kedalam grafik hubungan tegangan geser (τ) terhadap pergerakan horizontal, setelah diketahui nilai tegangan geser maksimum pada tiap sampel dapat dilakukan grafik hubungan tegangan geser maksimum (τ_{max}) terhadap tegangan normal (σ) untuk menentukan kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

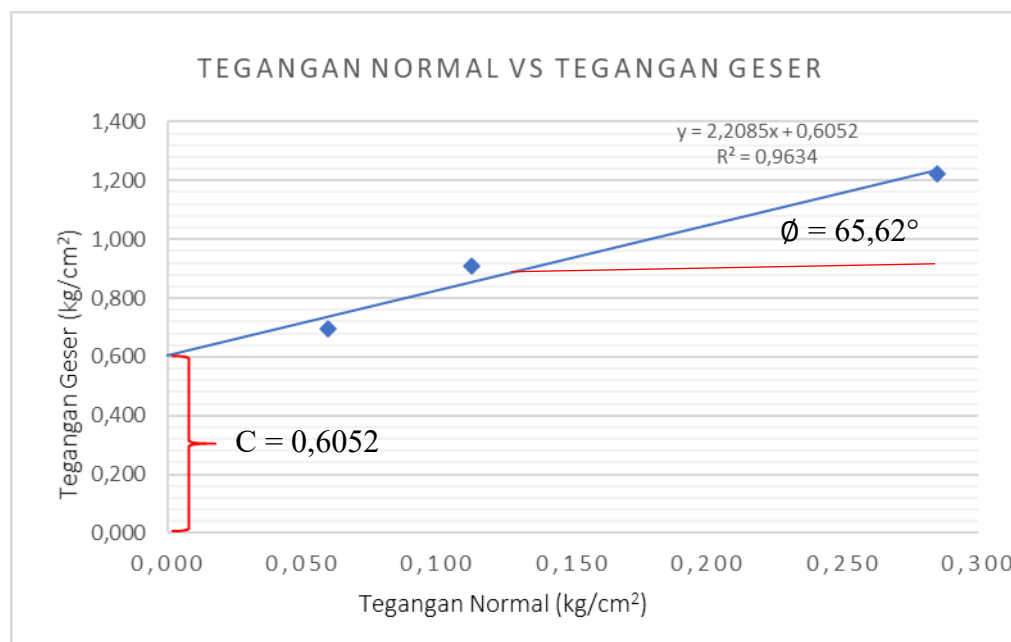
4.5 Pengujian Kuat Geser Tanah Tanpa Campuran *Bottom Ash*



Gambar 4. 6 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan tegangan geser tanah dengan campuran Bottom ash 0%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan geser dan pergerakan horizontal, ketiga sampel memperlihatkan kecenderungan yang serupa, yaitu nilai tegangan geser meningkat seiring bertambahnya pergerakan horizontal hingga mencapai tegangan geser maksimum (peak shear stress). Setelah mencapai nilai puncak, tegangan geser mengalami penurunan dan kemudian relatif stabil pada kondisi tegangan geser residual. Sampel 3 menunjukkan nilai tegangan geser maksimum tertinggi, yaitu sekitar $1,21 \text{ kg/cm}^2$, diikuti oleh Sampel 2 sebesar sekitar $0,92 \text{ kg/cm}^2$, dan Sampel 1 sebesar sekitar $0,69 \text{ kg/cm}^2$. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa Sampel 3 memiliki kemampuan menahan gaya geser yang paling baik

dibandingkan sampel lainnya. Setelah melewati kondisi puncak, seluruh sampel mengalami penurunan tegangan geser akibat terbentuknya bidang keruntuhan, kemudian nilai tegangan cenderung konstan hingga akhir pengujian. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa Sampel 3 memiliki kuat geser tertinggi, sedangkan Sampel 1 menunjukkan kuat geser yang paling rendah.



Gambar 4. 7 Grafik hubungan Tegangan Geser (τ) dengan Tegangan Normal (σ) pada tanah campuran *bottom ash* 0%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser, dapat diketahui bahwa peningkatan tegangan normal diikuti oleh peningkatan nilai tegangan geser. Hubungan kedua variabel tersebut menunjukkan pola linier positif, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 2,2085x + 0,6052$ dengan nilai $R^2 = 0,9634$. Nilai koefisien determinasi tersebut mengindikasikan bahwa sekitar 96,34% perubahan tegangan geser dipengaruhi oleh variasi tegangan normal, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Oleh karena itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar tegangan normal yang bekerja pada tanah, maka semakin tinggi pula kuat geser yang dihasilkan.

Diperoleh linearnya untuk tanah dengan campuran variasi Bottom Ash 0%

pada formula $y = 2,2085x + 0,6052$

$X_1 = 0$, maka $y = 2,2075(0) + 0,6052 = 0,6052$

$X_2 = 1$ maka $y = 2,2075(1) + 0,6052 = 2,8127$

$\Delta y = x_1 - x_2 = 2,8127 - 0,6052 = 2,2075$

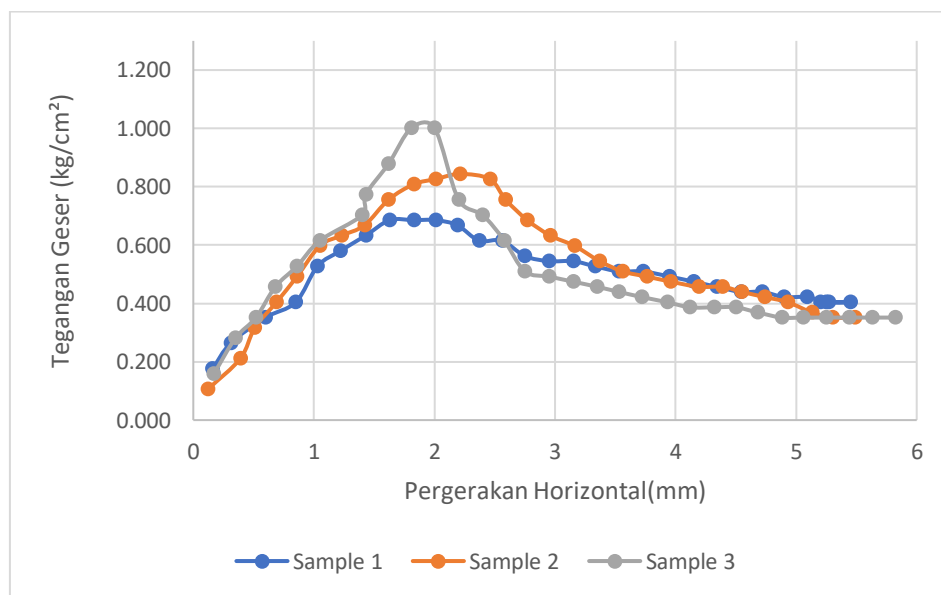
$C = x = 0$, maka $y = 0,6052$

$$\tan \phi = \frac{2,2085}{1} = \phi = \arctan(2,2075) = 65,62^\circ$$

$$\phi = 65,62^\circ$$

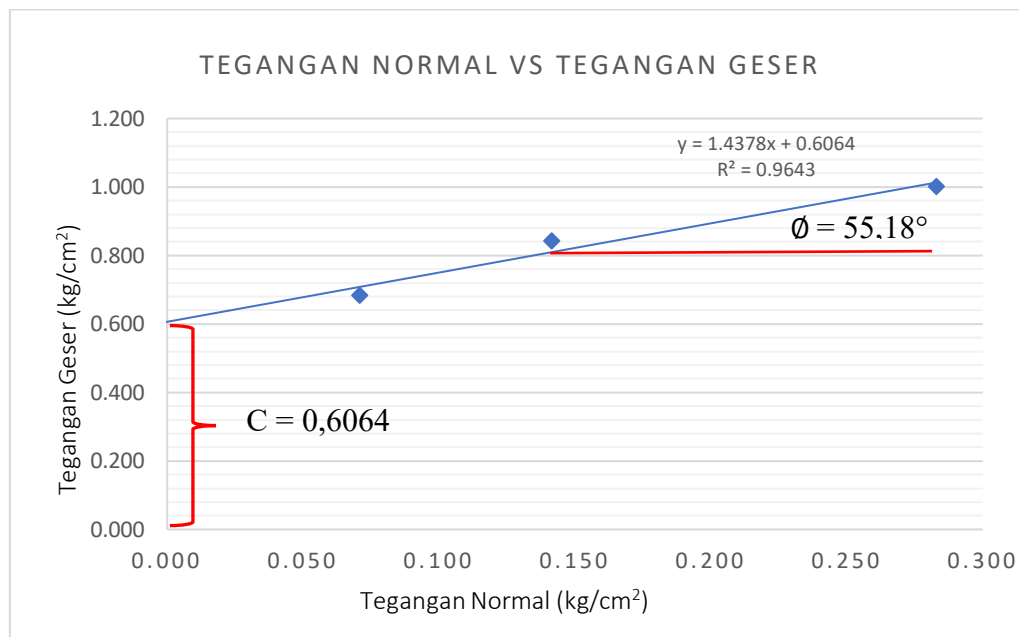
Dari grafik tanah dengan campuran variasi *bottom ash* 0% juga diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,9634 maka hubungan antara nilai tahanan geser dan nilai tegangan normal dapat dikatakan memiliki hubungan mendekati sempurna antara kedua nilai tersebut

4.6 Pengujian Kuat Geser Tanah Dengan Campuran *bottom ash* 10%



Gambar 4. 8 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan Tegangan Geser tanah dengan campuran *bottom ash* 10%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan geser dan pergerakan horizontal, ketiga sampel memperlihatkan kecenderungan yang serupa, yaitu nilai tegangan geser meningkat seiring bertambahnya pergerakan horizontal hingga mencapai tegangan geser maksimum (peak shear stress). Setelah mencapai kondisi puncak, nilai tegangan geser menurun dan selanjutnya cenderung stabil pada kondisi tegangan geser. Sampel 3 menunjukkan nilai tegangan geser maksimum tertinggi, yaitu sekitar $1,00 \text{ kg/cm}^2$, diikuti oleh Sampel 2 sebesar sekitar $0,84 \text{ kg/cm}^2$, dan Sampel 1 sebesar sekitar $0,69 \text{ kg/cm}^2$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa Sampel 3 memiliki kemampuan menahan gaya geser yang lebih baik dibandingkan kedua sampel lainnya. Setelah melewati tegangan geser puncak, seluruh sampel mengalami penurunan nilai tegangan akibat terbentuknya bidang keruntuhan, kemudian tegangan geser menjadi relatif konstan hingga pengujian berakhir. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa Sampel 3 memiliki kuat geser tertinggi, sedangkan Sampel 1 memiliki kuat geser paling rendah.



Gambar 4. 9 Grafik hubungan Tegangan geser (τ) dengan Tegangan normal (σ) pada tanah campuran *bottom ash* 10%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser, dapat diketahui bahwa peningkatan tegangan normal diikuti oleh peningkatan nilai tegangan geser. Hubungan kedua variabel tersebut membentuk pola linier positif, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 1,4378x + 0,6064$ dengan nilai $R^2 = 0,9643$. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa sekitar 96,43% perubahan tegangan geser dipengaruhi oleh variasi tegangan normal, sedangkan 3,57% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model regresi. Oleh karena itu, hasil pengujian mengindikasikan bahwa semakin besar tegangan normal yang bekerja pada tanah, maka semakin tinggi pula nilai kuat geser yang dihasilkan.

Diperoleh linearnya untuk tanah dengan campuran variasi *Bottom Ash* 10%

pada formula $y = 1,4378x + 0,6064$

$X_1 = 0$, maka $y = 1,4378(0) + 0,6064 = 0,6064$

$X_2 = 1$ maka $y = 1,4378(1) + 0,6064 = 2,0442$

$\Delta y = x_1 - x_2 = 2,0442 - 0,6064 = 1,4378$

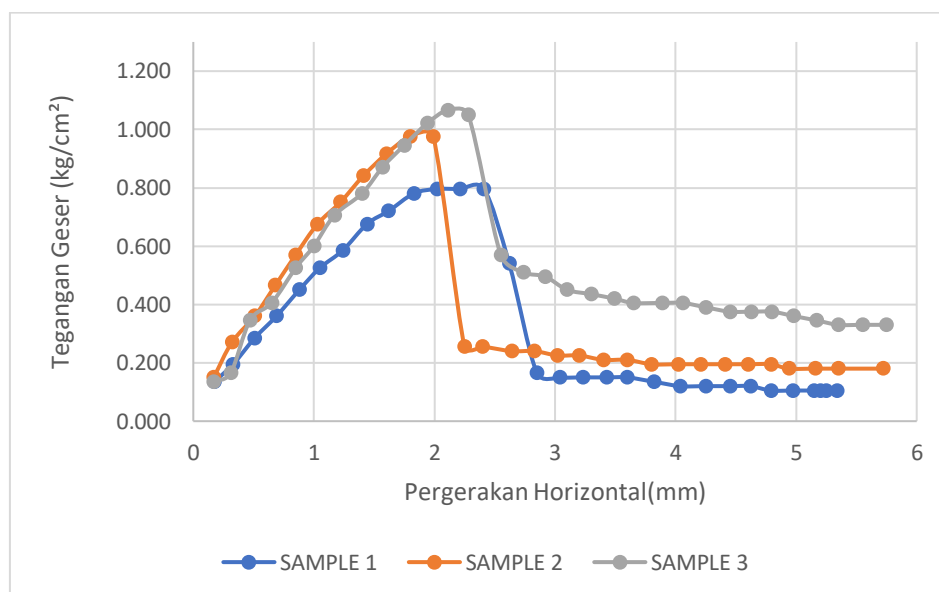
$C = x = 0$, maka $y = 0,6064$

$$\tan \phi = \frac{1,4378}{1} = \phi = \arctan(1,4378) = 55,18^\circ$$

$$\phi = 55,18^\circ$$

Dari grafik tanah dengan campuran variasi *bottom ash* 10% juga diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,9643 maka hubungan antara nilai tegangan geser dan nilai tegangan normal dapat dikatakan memiliki hubungan sempurna antara kedua nilai tersebut.

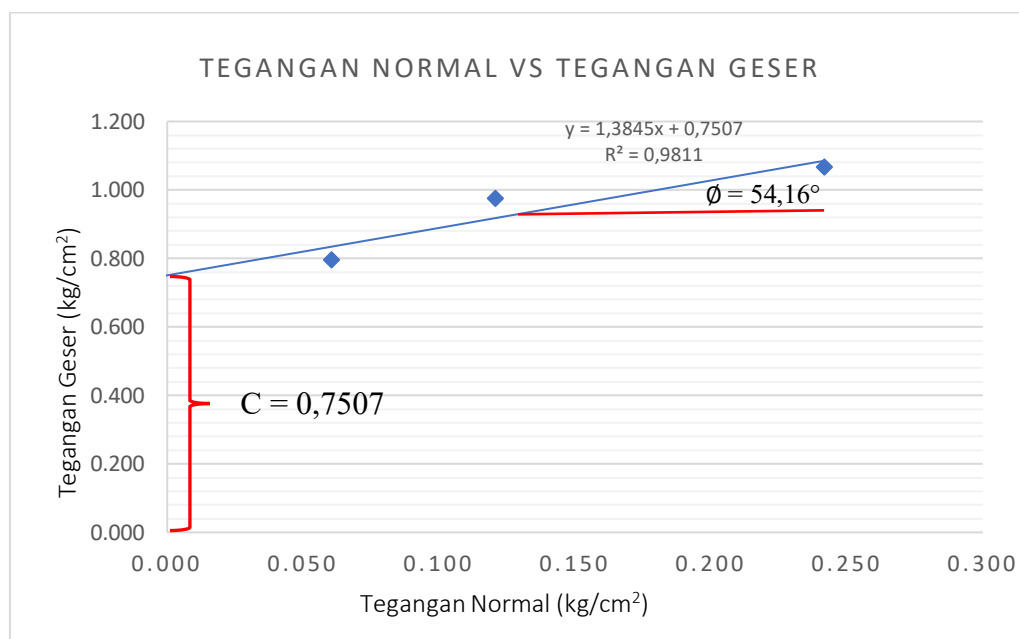
4.7 Pengujian Kuat Geser tanah Dengan Campuran *Bottom Ash* 20%



Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan Tegangan geser tanah dengan campuran *bottom ash* 20%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan geser dan pergerakan horizontal, ketiga sampel memperlihatkan pola yang serupa, yaitu nilai tegangan geser meningkat seiring bertambahnya pergerakan horizontal hingga mencapai tegangan geser maksimum (peak shear stress). Setelah mencapai kondisi puncak, nilai tegangan geser mengalami penurunan dan selanjutnya cenderung stabil pada kondisi tegangan geser residual. Sampel 3 menunjukkan nilai tegangan geser maksimum tertinggi, yaitu sekitar 1,06 kg/cm², diikuti oleh Sampel 2 sebesar sekitar 0,98 kg/cm², dan Sampel 1 sebesar sekitar 0,80 kg/cm². Hasil tersebut mengindikasikan

bahwa Sampel 3 memiliki kemampuan menahan gaya geser yang lebih baik dibandingkan kedua sampel lainnya. Setelah melewati tegangan geser maksimum, seluruh sampel mengalami penurunan nilai tegangan akibat terbentuknya bidang keruntuhan, kemudian tegangan geser menjadi relatif konstan hingga pengujian selesai. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa Sampel 3 memiliki kuat geser tertinggi, sedangkan Sampel 1 menunjukkan kuat geser terendah.



Gambar 4. 11 Grafik hubungan Tegangan geser (τ) dengan Tegangan normal (σ) pada tanah campuran *bottom ash* 20%

Berdasarkan grafik hubungan tegangan normal terhadap tegangan geser, terlihat bahwa peningkatan tegangan normal diikuti oleh peningkatan nilai tegangan geser. Hubungan kedua variabel tersebut menunjukkan pola linier positif, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 1,3845x + 0,7507$ dengan nilai $R^2 = 0,9811$. Nilai koefisien determinasi tersebut menunjukkan bahwa sekitar 98,11% variasi tegangan geser dapat dijelaskan oleh perubahan tegangan normal, sedangkan 1,89% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model regresi. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar tegangan

normal yang bekerja pada tanah, maka semakin besar pula kuat geser yang dihasilkan

Diperoleh linearnya untuk tanah dengan campuran variasi *Bottom Ash* 20%

pada formula $y = 1,3845x + 0,7507$

$X_1 = 0$, maka $y = 1,3845(0) + 0,7507 = 0,7507$

$X_2 = 1$ maka $y = 1,3845(1) + 0,7507 = 2,1352$

$\Delta y = x_1 - x_2 = 2,1352 - 0,7507 = 1,3845$

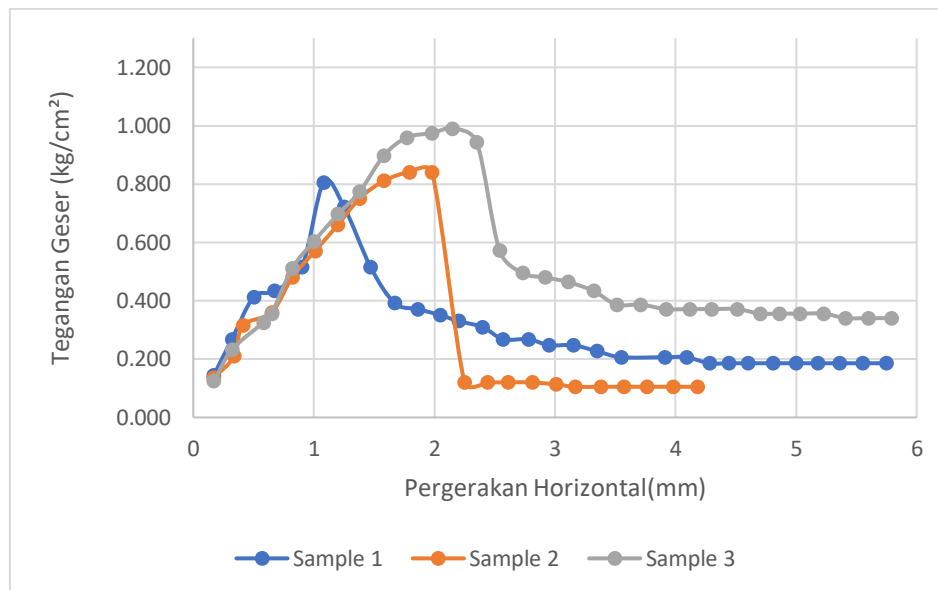
$C = x = 0$, maka $y = 0,7507$

$\tan \phi = \frac{1,3845}{1} = \phi = \arctan(1,3845) = 54,16^\circ$

$\phi = 54,16^\circ$

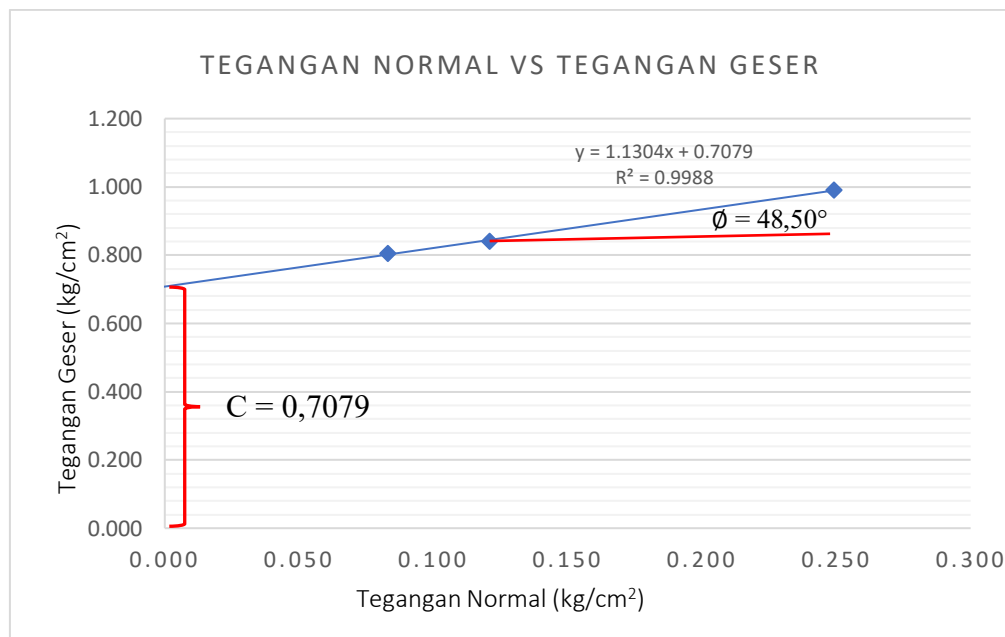
Dari grafik tanah dengan campuran variasi *bottom ash* 20% juga diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,9811 maka hubungan antara nilai tahanan geser dan nilai tegangan normal dapat dikatakan memiliki hubungan kuat antara kedua nilai tersebut. Faktor yang menyebabkan perubahan nilai koefisien korelasi pada tanah campuran variasi *bottom ash* 20% terletak pada kesulitan penanganan pengeluaran sampel kuat geser dari ring uji geser yang dimana tanah menjadi semakin mudah pecah.

4.8 Pengujian Kuat Geser Tanah Dengan Campuran Bottom Ash 30%



Gambar 4. 12 Grafik hubungan antara pergerakan horizontal dan Tegangan geser tanah dengan campuran *bottom ash* 20%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan geser dan pergerakan horizontal, ketiga sampel menunjukkan pola yang serupa, yaitu nilai tegangan geser meningkat seiring bertambahnya pergerakan horizontal hingga mencapai tegangan geser maksimum (peak shear stress). Setelah mencapai titik puncak, nilai tegangan geser mengalami penurunan dan kemudian cenderung stabil pada kondisi tegangan geser residual. Sampel 3 menghasilkan nilai tegangan geser maksimum tertinggi, yaitu sekitar 0,99 kg/cm², diikuti oleh Sampel 2 sebesar sekitar 0,84 kg/cm², dan Sampel 1 sebesar sekitar 0,80 kg/cm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa Sampel 3 memiliki kemampuan menahan gaya geser yang lebih baik dibandingkan kedua sampel lainnya. Meskipun Sampel 1 mencapai tegangan geser puncak lebih awal, penurunan nilai tegangan gesernya juga terjadi lebih cepat setelah melewati kondisi puncak. Sebaliknya, Sampel 3 mampu mempertahankan nilai tegangan geser yang relatif lebih tinggi setelah terjadi keruntuhan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa Sampel 3 memiliki kuat geser dan ketahanan terhadap gaya geser yang paling baik, sedangkan Sampel 1 mengalami penurunan kuat geser paling cepat setelah mencapai tegangan geser maksimum.



Gambar 4. 13 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan tegangan normal (σ) pada tanah campuran *bottom ash* 30%

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser, dapat diketahui bahwa bertambahnya tegangan normal menyebabkan nilai tegangan geser ikut meningkat. Hubungan kedua variabel tersebut membentuk pola linier positif, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 1,1304x + 0,7079$ dengan nilai $R^2 = 0,9988$. Nilai koefisien determinasi tersebut mengindikasikan bahwa sekitar 99,88% perubahan tegangan geser dipengaruhi oleh variasi tegangan normal, sedangkan 0,12% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model regresi. Oleh karena itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar tegangan normal yang diberikan pada tanah, maka semakin tinggi pula nilai kuat geser yang dihasilkan.

Diperoleh linearnya untuk tanah dengan campuran variasi *Bottom Ash* 30% pada formula $y = 1,1304x + 0,7079$

$$X1 = 0, \text{ maka } y = 1,1304(0) + 0,7079 = 0,7079$$

$$X2 = 1 \text{ maka } y = 1,1304(1) + 0,7079 = 1,8383$$

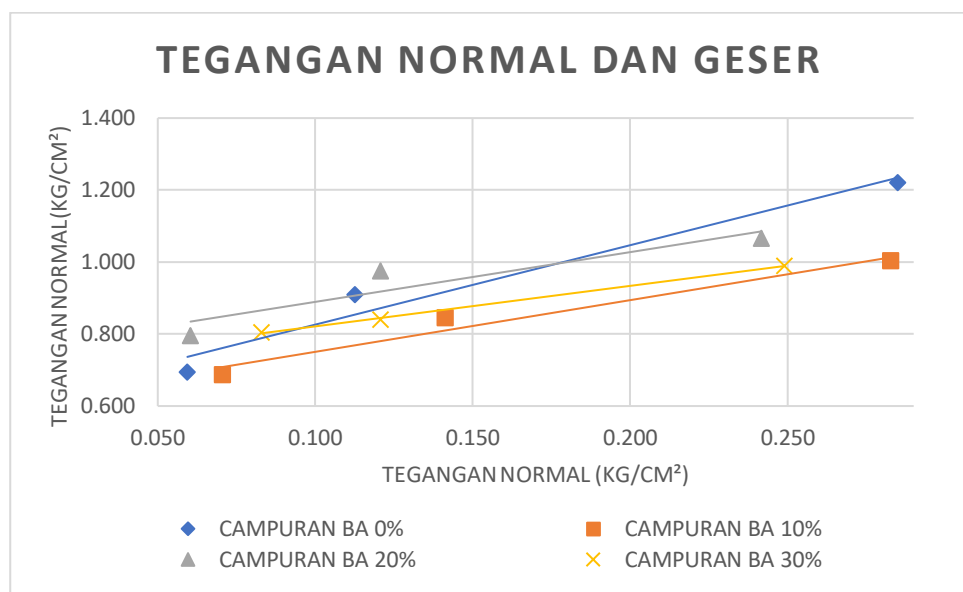
$$\Delta y = x1 - x2 = 1,8383 - 0,7079 = 1,1304$$

$C = x = 0$, maka $y = 0,7507$

$$\tan \phi = \frac{1,1304}{1} = \phi = \arctan(1,1304) = 48,50^\circ$$

$$\phi = 48,50^\circ$$

Dari grafik tanah dengan campuran variasi *bottom ash* 30% juga diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,9988 maka hubungan antara nilai tahanan geser dan nilai tegangan normal dapat dikatakan memiliki hubungan sempurna antara kedua nilai tersebut.



Gambar 4. 14 Grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan tegangan normal (σ)

Berdasarkan grafik hubungan tegangan normal terhadap tegangan geser pada variasi campuran bottom ash 0%, 10%, 20%, dan 30%, seluruh variasi menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu tegangan geser meningkat seiring dengan bertambahnya tegangan normal. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tegangan normal yang diberikan, maka semakin besar pula kuat geser tanah yang dihasilkan. Di antara seluruh variasi campuran, campuran bottom ash 0% menghasilkan nilai tegangan geser tertinggi, diikuti oleh campuran 20%, 30%, dan 10%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan bottom ash memengaruhi karakteristik kuat geser tanah, namun tidak seluruh variasi campuran mampu meningkatkan nilai tegangan geser dibandingkan tanah asli. Berdasarkan hasil pengujian, campuran bottom

ash 20% merupakan variasi yang memberikan peningkatan kuat geser paling baik di antara campuran bottom ash yang digunakan, sedangkan campuran 10% menghasilkan nilai tegangan geser yang paling rendah.

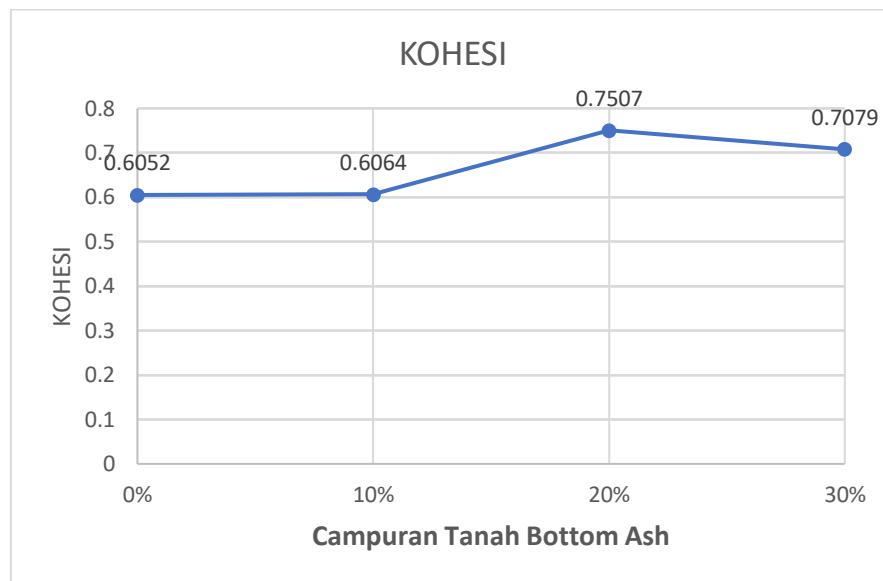
4.9 Hasil Pengujian Kuat Geser

Dari hasil grafik – grafik pengujian kuat geser langsung diatas dapat disimpulkan berdasarkan tabel dibawah ini :

Tabel 4. 4 hasil Pengujian Kuat Geser

Campuran <i>bottom ash</i>	Kadar Air (%) Setelah pengujian	Berat Kering $\gamma_d(\text{gr}/\text{cm}^3)$	Kohesi (kN/m ²)	Sudut Geser (φ)
0%	7,32%	1,75	0,6052	65,62°
10%	7,85%	1,77	0,6064	55,18°
20%	7,36%	1,84	0,7507	54,16°
30%	7,69%	1,81	0,7079	48,50°

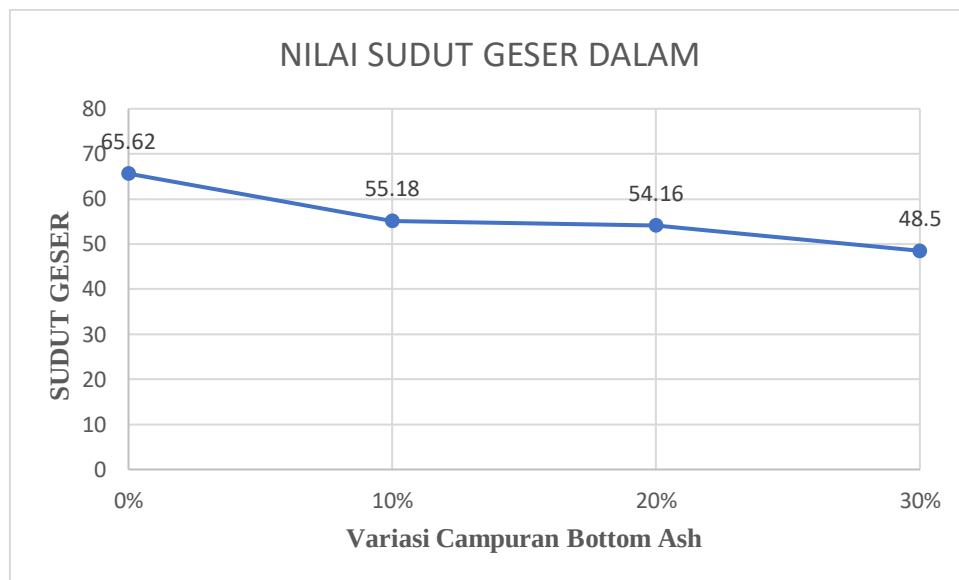
Dari tabel data diatas dapat digambarkan nilai kohesi geser pada tiap sampel tanah dengan campuran *bottom ash* masing-masing sampel sebagai berikut:



Gambar 4. 15 Grafik hubungan campuran *bottom ash* terhadap nilai kohesi tanah (c)

Dari grafik diatas pengaruh campuran *bottom ash* terhadap nilai kohesi tanah dapat dinyatakan bahwa:

1. Sampel tanah yang tanpa campuran *bottom ash* mempunyai nilai kohesi tanah sebesar 0,6052 kg/cm².
2. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 10% mempunyai nilai kohesi tanah sebesar 0,6064 kg/cm².
3. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 20% mempunyai nilai kohesi tanah sebesar 0,7507 kg/cm².
4. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 20% mempunyai nilai kohesi tanah sebesar 0,7079 kg/cm².



Gambar 4. 16 Grafik hubungan campuran *bottom ash* terhadap sudut geser

Dari grafik hubungan campuran *bottom ash* terhadap sudut geser didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Sampel tanah yang tanpa campuran *bottom ash* mempunyai sudut geser tanah sebesar 65,62°
2. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 10% mempunyai nilai sudut geser tanah sebesar 55,18°
3. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 20% mempunyai nilai sudut geser tanah sebesar 54,16°
4. Sampel tanah dengan campuran *bottom ash* 30% mempunyai nilai sudut geser tanah sebesar 48,50°

Penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam pada campuran *bottom ash* sebesar 30% mengindikasikan bahwa kadar tersebut telah melampaui komposisi optimum dalam campuran tanah. Pada kondisi ini, meningkatnya proporsi partikel *bottom ash* yang bertekstur kasar dan berpori menyebabkan berkurangnya kontak langsung antarpartikel tanah, sehingga ikatan kohesif yang terbentuk menjadi lebih lemah. Di samping itu, *bottom ash* memiliki aktivitas pozzolanik yang relatif rendah apabila digunakan tanpa penambahan bahan yang mengandung kalsium tinggi, seperti semen atau kapur. Kondisi tersebut mengakibatkan proses pembentukan

ikatan sementasi tidak berlangsung secara optimal, sehingga peningkatan kuat geser tanah menjadi terbatas. Oleh karena itu, penambahan bottom ash hingga 30% tidak lagi memberikan peningkatan terhadap parameter kuat geser, tetapi justru menyebabkan penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam dibandingkan dengan campuran optimum sebesar 20%.

Limbah pembakaran *Bottom ash* masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah karena dapat meningkatkan sifat mekanis tanah apabila digunakan pada kadar campuran yang optimum. Namun, penggunaan *bottom ash* dalam jumlah yang melebihi kadar optimum tidak lagi memberikan peningkatan terhadap kuat geser tanah, bahkan dapat menyebabkan penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam akibat perubahan susunan partikel serta berkurangnya kontak antarbutir tanah. Oleh karena itu, penentuan kadar *bottom ash* yang akan digunakan perlu didasarkan pada hasil pengujian laboratorium sehingga diperoleh komposisi optimum yang sesuai dengan karakteristik tanah yang akan distabilisasi.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari pengujian dan penelitian yang sudah dilakukan terhadap pengaruh penambahan *bottom ash* terhadap nilai kuat geser tanah yang dipadatkan dengan *standard proctor* dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penambahan *bottom ash* yang memberikan pengaruh paling signifikan pada tanah hasil galian kedalaman 0 s.d. 1 m di lokasi wisata mata kucing temiang adalah pada persentase campuran 20% untuk nilai kohesi 0,7507 kg/cm² atau mengalami kenaikan sebesar 1,4% dari nilai kohesi tanah asli akan tetapi sudut geser mengalami penurunan dengan nilai 54,16° atau sebesar 11,46° dari nilai sudut geser tanah asli.
2. Limbah pembakaran *bottom ash* masih bisa di gunakan apabila kadar campurannya tidak melebihi batas optimum dan jika melebihi batas optimum akan terjadi penurunan pada nilai kohesi dan sudut geser.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran penulis untuk hasil pengujian yang dapat disampaikan sebagai berikut.

1. Untuk memudahkan pada saat proses pengujian sampel memerlukan cincin uji geser sebanyak jumlah sampel yang akan diuji
2. Penelitian selanjutnya dilakukan variasi waktu pemeraman dan juga di harapkan untuk menjaga sample agar tidak rusak saat memasukkan ke alat uji
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan variasi kadar *bottom ash* yang lebih kecil di sekitar kadar optimum, misalnya 5%, 10%, dan 15%, sehingga dapat diperoleh kadar optimum yang lebih akurat terhadap peningkatan kuat geser tanah.
4. Dalam penerapan di lapangan, penggunaan *bottom ash* sebagai bahan stabilisasi tanah sebaiknya memperhatikan kadar campuran optimum, karena penambahan

bottom ash yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan nilai sudut geser dalam sehingga tidak memberikan peningkatan kuat geser yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials (ASTM) D 2216-71. (1989). *Standard Method of Laboratory Determination Of Moisture Content Of Soil*. ASTM International, West Conshohocken. Pennsylvania. United States:ASTM
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D 854-83. (1990). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method*. ASTM International, West Conshohocken. Pennsylvania. United States:ASTM
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D 698-12. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,1400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM International, West Conshohocken. Pennsylvania. United States:ASTM
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D 423-66. (1972). *Method of Test for Liquid Limit of Soils*. ASTM International, West Conshohocken. Pennsylvania. United States:ASTM.
- Andreanto, D.C (2020). Pengaruh Lamanya Waktu pemeraman terhadap Nilai Kuat Geser Pada Tanah Laterit Yang Dicampur Limbah Gypsum, Skripsi
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 3420:2016 Metode uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase. Jakarta
- Budhu, Muni. (2010). *Soil Mechanics and foundation*, 3rd Edition. John Wiley & Sons , Inc.
- Elfrida. (2019). Analisis Kuat Geser Tanah Lempung Akibat Pengaruh Kadar Air. Batam: Universitas Riau Kepulauan
- Farhan, D., Faisal, A., & Rustamaji, R. M. (2021). Korelasi Kuat Tekan Bebas dengan kuat Geser pada Tanah Lunak yang Dimodifikasi dengan Variasi Campuran Pasir Kota Pontianak. Pontianak : Universitas Tanjungpura

Pontianak

Hamilton, B. (1807). Nickel Laterite Spesification, Limiting Constrant on The marked industrial minerals.

Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah I. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada.

Putra. Hermawan R., Dkk. (2018). Pengaruh Pasir Terhadap Tingkat Kepadatan Tanah Lempung Ekspansif. Yogyakarta : Journal Universitas Sarjawiyata Tamansiswa.

Smith, G. N., & Smith, Ian G. (1998). Elements of Soil Mechanics Seventh Edition. Blackwell Science Ltd. United Kingdom.

Sudjianto, Agus Tugas. (2015). Tanah Ekspansif ; Karakteristik & Pengukuran Perubahan Volume. Yogyakarta : Graha Ilmu

Purnama, Yuda, & Machfud Ridwan. (2018).Pengaruh penambahan bottom ash pada tanah lempung ekspansif di daerah Lakarsantri Surabaya terhadap nilai daya dukung pondasi dangkal." *Rekayasa Teknik Sipil 2.2/REKAT/18* (2018).

LAMPIRAN

Sample Uji	: Sample Atas Tanah Asli air 13%		
Diameter	: 6,421 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 109,76 gr
Tinggi	: 1,8325 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 109,3 gr
Luas	: 33,677 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 2 kg		

Tegangan Normal : 0,0594 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan Horizontal (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizonta (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan n Vertikal (Div)	Pergerakan n Vertikal (mm)
30	0,12	5	2,485	33,605	0,074	500	0
60	0,33	11	5,467	33,657	0,162	500	0
90	0,5	17	8,449	33,647	0,251	501	0,01
120	0,67	22	10,934	33,636	0,325	503	0,03
150	0,84	27	13,419	33,626	0,398	505	0,05
180	1,02	32	15,904	33,615	0,472	510	0,1
210	1,2	36	17,892	33,605	0,531	514	0,14
240	1,4	41	20,377	33,593	0,605	517	0,17
270	1,6	44	21,868	33,581	0,649	521	0,21
300	1,8	46	22,862	33,569	0,679	525	0,25
330	1,97	47	23,359	33,558	0,694	530	0,3
360	2,17	47	23,359	33,546	0,694	545	0,45
390	2,26	46	22,862	33,541	0,679	551	0,51
420	2,49	32	15,904	33,527	0,472	567	0,67
450	2,79	29	14,413	33,509	0,428	579	0,79
480	2,97	28	13,916	33,498	0,413	585	0,85
510	3,16	27	13,419	33,487	0,398	595	0,95
540	3,3	26	12,922	33,479	0,384	600	1
570	3,55	25	12,425	33,464	0,369	610	1,1
600	3,75	24	11,928	33,452	0,354	619	1,19
630	3,95	24	11,928	33,440	0,354	625	1,25
660	4,15	23	11,431	33,428	0,339	635	1,35
690	4,35	23	11,431	33,416	0,339	642	1,42
720	4,51	22	10,934	33,406	0,325	650	1,5
750	4,7	22	10,934	33,395	0,325	656	1,56
780	4,85	22	10,934	33,386	0,325	665	1,65
810	5	22	10,934	33,377	0,325	672	1,72
840	5,15	22	10,934	33,368	0,325	680	1,8
870	5,2	22	10,934	33,365	0,325	685	1,85
900	5,25	22	10,934	33,362	0,325	691	1,91
			0,000		0,000		-5
MAX			23,359		0,694		

Lampiran 1 Pembacaan dial direct shear test campuran *bottom ash* 0% beban 2kg

Sample Uji	: Sample Tengah Tanah Asli air 13%		
Diameter	: 6,592 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 111,62 gr
Tinggi	: 1,84 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 111,24 gr
Luas	: 35,494 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 4 kg		

Tegangan Normal : 0,1127 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizonta (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan Vertikal (mm)
30	0,22	7	3,479	35,36222	0,098	500	0
60	0,39	14	6,958	35,26022	0,196	500	0
90	0,56	21	10,437	35,15822	0,294	500	0
120	0,73	27	13,419	35,05622	0,378	501	0,01
150	0,9	33	16,401	34,95422	0,462	502	0,02
180	1,08	39	19,383	34,84622	0,546	503	0,03
210	1,27	44	21,868	34,73222	0,616	506	0,06
240	1,45	49	24,353	34,62422	0,686	507	0,07
270	1,62	54	26,838	34,52222	0,756	509	0,09
300	1,81	58	28,826	34,40822	0,812	513	0,13
330	1,98	62	30,814	34,30622	0,868	515	0,15
360	2,18	65	32,305	34,18622	0,910	519	0,19
390	2,36	63	31,311	34,07822	0,882	528	0,28
420	2,58	37	18,389	33,94622	0,518	555	0,55
450	2,76	34	16,898	33,83822	0,476	563	0,63
480	2,95	32	15,904	33,72422	0,448	574	0,74
510	3,14	31	15,407	33,61022	0,434	582	0,82
540	3,33	30	14,910	33,49622	0,420	592	0,92
570	3,52	29	14,413	33,38222	0,406	600	1
600	3,71	28	13,916	33,26822	0,392	609	1,09
630	3,91	28	13,916	33,14822	0,392	617	1,17
660	4,1	27	13,419	33,03422	0,378	625	1,25
690	4,29	27	13,419	32,92022	0,378	632	1,32
720	4,48	27	13,419	32,80622	0,378	641	1,41
750	4,67	26	12,922	32,69222	0,364	647	1,47
780	4,85	26	12,922	32,58422	0,364	655	1,55
810	5,03	25	12,425	32,47622	0,350	659	1,59
840	5,2	25	12,425	32,37422	0,350	665	1,65
870	5,4	25	12,425	32,25422	0,350	674	1,74
900			0,000		0,000		
930							
960							
MAX			32,305		0,910		

Lampiran 2 Pembacaan dial direct shear test campuran *bottom ash* 0% beban 4kg

Sample Uji	: Sample bawah Tanah Asli air 13%		
Diameter	: 6,103 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 115,45 gr
Tinggi	: 1,855 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 115,17 gr
Luas	: 28,083 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 8 kg		

Tegangan Normal : 0,2849 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizont (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan (mm)
30	0,17	7	3,479	35,39222	0,124	500	0
60	0,33	14	6,958	35,29622	0,248	499	-0,01
90	0,5	21	10,437	35,19422	0,372	499	-0,01
120	0,68	28	13,916	35,08622	0,496	499	-0,01
150	0,85	34	16,898	34,98422	0,602	499	-0,01
180	1,04	40	19,880	34,87022	0,708	499	-0,01
210	1,22	46	22,862	34,76222	0,814	500	0
240	1,4	52	25,844	34,65422	0,920	500	0
270	1,59	57	28,329	34,54022	1,009	501	0,01
300	1,78	61	30,317	34,42622	1,080	502	0,02
330	2,01	65	32,305	34,28822	1,150	503	0,03
360	2,15	68	33,796	34,20422	1,203	506	0,06
390	2,32	69	34,293	34,10222	1,221	514	0,14
420	2,5	68	33,796	33,99422	1,203	530	0,3
450	2,7	37	18,389	33,87422	0,655	540	0,4
480	2,91	34	16,898	33,74822	0,602	549	0,49
510	3,1	32	15,904	33,63422	0,566	552	0,52
540	3,3	31	15,407	33,51422	0,549	557	0,57
570	3,58	31	15,407	33,34622	0,549	561	0,61
600	3,85	29	14,413	33,18422	0,513	567	0,67
630	4,08	28	13,916	33,04622	0,496	570	0,7
660	4,26	28	13,916	32,93822	0,496	572	0,72
690	4,41	27	13,419	32,84822	0,478	575	0,75
720	4,63	26	12,922	32,71622	0,460	578	0,78
750	4,81	26	12,922	32,60822	0,460	581	0,81
780	5	26	12,922	32,49422	0,460	584	0,84
810	5,17	25,5	12,674	32,39222	0,451	586	0,86
840	5,35	25	12,425	32,28422	0,442	587	0,87
870	5,52	25	12,425	32,18222	0,442	590	0,9
900	5,72	25	12,425	32,06222	0,442	594	0,94
930	5,93	25	12,425	31,93622	0,442	595	0,95
MAX			34,293		1,221		

Lampiran 3 Pembacaan dial direct shear test campuran *bottom ash* 0% beban 8kg

Sample Uji	: Sample Atas BA 10% air 12%		
Diameter	: 6 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 92,82 gr
Tinggi	: 1,8325 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 92,48 gr
Luas	: 28,274 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 12 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 2 kg		

Tegangan Normal : 0,0707 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan Horizontal (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizontal (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan n Vertikal (Div)	Pergerakan n Vertikal (mm)
30	0,16	10	4,970	28,178	0,176	500	0
60	0,31	15	7,455	28,256	0,264	500	0
90	0,6	20	9,940	28,238	0,352	500	0
120	0,85	23	11,431	28,223	0,404	500	0
150	1,03	30	14,910	28,213	0,527	500	0
180	1,22	33	16,401	28,201	0,580	504	0,04
210	1,43	36	17,892	28,189	0,633	505	0,05
240	1,63	39	19,383	28,177	0,686	509	0,09
270	1,83	39	19,383	28,165	0,686	513	0,13
300	2,01	39	19,383	28,154	0,686	520	0,2
330	2,19	38	18,886	28,143	0,668	524	0,24
360	2,37	35	17,395	28,132	0,615	530	0,3
390	2,56	35	17,395	28,121	0,615	535	0,35
420	2,75	32	15,904	28,109	0,562	544	0,44
450	2,95	31	15,407	28,097	0,545	550	0,5
480	3,15	31	15,407	28,085	0,545	558	0,58
510	3,33	30	14,910	28,075	0,527	566	0,66
540	3,53	29	14,413	28,063	0,510	574	0,74
570	3,73	29	14,413	28,051	0,510	584	0,84
600	3,95	28	13,916	28,037	0,492	593	0,93
630	4,15	27	13,419	28,025	0,475	605	1,05
660	4,34	26	12,922	28,014	0,457	615	1,15
690	4,54	25	12,425	28,002	0,439	625	1,25
720	4,72	25	12,425	27,991	0,439	635	1,35
750	4,9	24	11,928	27,980	0,422	643	1,43
780	5,09	24	11,928	27,969	0,422	652	1,52
810	5,27	23	11,431	27,958	0,404	660	1,6
840	5,45	23	11,431	27,947	0,404	668	1,68
870	5,2	23	11,431	27,962	0,404	677	1,77
900	5,25	23	11,431	27,959	0,404	688	1,88
			0,000		0,000		-5
MAX			19,383		0,686		

Lampiran 4 Pembacaan dial direct shear test campuran *bottom ash* 10% beban 2kg

Sample Uji	: Sample Tengah BA 10 air 12%		
Diameter	: 6 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 101,36 gr
Tinggi	: 1,84 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 101,1 gr
Luas	: 28,274 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 12 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 4 kg		
Tegangan Normal	: 0,1415 kg		

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizonta (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan Vertikal (mm)
30	0,12	6	2,982	28,20233	0,105	500	0
60	0,39	12	5,964	28,04033	0,211	500	0
90	0,51	18	8,946	27,96833	0,316	500	0
120	0,69	23	11,431	27,86033	0,404	501	0,01
150	0,86	28	13,916	27,75833	0,492	503	0,03
180	1,05	34	16,898	27,64433	0,598	504	0,04
210	1,23	36	17,892	27,53633	0,633	506	0,06
240	1,42	38	18,886	27,42233	0,668	511	0,11
270	1,62	43	21,371	27,30233	0,756	513	0,13
300	1,83	46	22,862	27,17633	0,809	516	0,16
330	2,01	47	23,359	27,06833	0,826	519	0,19
360	2,21	48	23,856	26,94833	0,844	524	0,24
390	2,46	47	23,359	26,79833	0,826	532	0,32
420	2,59	43	21,371	26,72033	0,756	543	0,43
450	2,77	39	19,383	26,61233	0,686	553	0,53
480	2,96	36	17,892	26,49833	0,633	564	0,64
510	3,16	34	16,898	26,37833	0,598	573	0,73
540	3,37	31	15,407	26,25233	0,545	584	0,84
570	3,56	29	14,413	26,13833	0,510	593	0,93
600	3,76	28	13,916	26,01833	0,492	603	1,03
630	3,96	27	13,419	25,89833	0,475	612	1,12
660	4,19	26	12,922	25,76033	0,457	620	1,2
690	4,39	26	12,922	25,64033	0,457	630	1,3
720	4,55	25	12,425	25,54433	0,439	635	1,35
750	4,74	24	11,928	25,43033	0,422	642	1,42
780	4,93	23	11,431	25,31633	0,404	650	1,5
810	5,13	21	10,437	25,19633	0,369	656	1,56
840	5,3	20	9,940	25,09433	0,352	665	1,65
870	5,49	20	9,940	24,98033	0,352	672	1,72
900			0,000		0,000		
930							
960							
MAX			23,856		0,844		

Lampiran 5 Pembacaan dial direct shear test campuran *bottom ash* 10% beban 4kg

Sample Uji	: Sample bawah BA 10 air 12%		
Diameter	: 6 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 105,36 gr
Tinggi	: 1,855 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 105,1 gr
Luas	: 28,274 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 12 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 8 kg		

Tegangan Normal : 0,2829 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizont (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan (mm)
30	0,17	9	4,473	28,17233	0,158	500	0
60	0,35	16	7,952	28,06433	0,281	499	-0,01
90	0,52	20	9,940	27,96233	0,352	499	-0,01
120	0,68	26	12,922	27,86633	0,457	500	0
150	0,86	30	14,910	27,75833	0,527	501	0,01
180	1,05	35	17,395	27,64433	0,615	501	0,01
210	1,4	40	19,880	27,43433	0,703	502	0,02
240	1,43	44	21,868	27,41633	0,773	503	0,03
270	1,62	50	24,850	27,30233	0,879	504	0,04
300	1,81	57	28,329	27,18833	1,002	505	0,05
330	2	57	28,329	27,07433	1,002	507	0,07
360	2,2	43	21,371	26,95433	0,756	512	0,12
390	2,4	40	19,880	26,83433	0,703	526	0,26
420	2,58	35	17,395	26,72633	0,615	532	0,32
450	2,75	29	14,413	26,62433	0,510	538	0,38
480	2,95	28	13,916	26,50433	0,492	541	0,41
510	3,15	27	13,419	26,38433	0,475	544	0,44
540	3,35	26	12,922	26,26433	0,457	546	0,46
570	3,53	25	12,425	26,15633	0,439	549	0,49
600	3,72	24	11,928	26,04233	0,422	551	0,51
630	3,93	23	11,431	25,91633	0,404	553	0,53
660	4,12	22	10,934	25,80233	0,387	555	0,55
690	4,32	22	10,934	25,68233	0,387	559	0,59
720	4,5	22	10,934	25,57433	0,387	561	0,61
750	4,68	21	10,437	25,46633	0,369	562	0,62
780	4,88	20	9,940	25,34633	0,352	563	0,63
810	5,06	20	9,940	25,23833	0,352	564	0,64
840	5,25	20	9,940	25,12433	0,352	566	0,66
870	5,44	20	9,940	25,01033	0,352	569	0,69
900	5,63	20	9,940	24,89633	0,352	570	0,7
930	5,82	20	9,940	24,78233	0,352	572	0,72
MAX			28,329		1,002		

Lampiran 6 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 10% beban 8kg

Sample Uji	: Sample Atas Tanah + BA 20 % air 13%		
Diameter	: 6,492 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 99,3 gr
Tinggi	: 1,8325 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 98,9 gr
Luas	: 33,101 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 2 kg		
Tegangan Normal	: 0,0604 kg		

Waktu (Dtk)	Peralihan Horizontal (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizontal (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan n Vertikal (Div)	Pergerakan n Vertikal (mm)
30	0,175	9	4,473	32,996	0,135	500	0
60	0,33	13	6,461	33,082	0,195	500	0
90	0,51	19	9,443	33,071	0,285	503	0,03
120	0,69	24	11,928	33,060	0,360	505	0,05
150	0,88	30	14,910	33,049	0,450	506	0,06
180	1,05	35	17,395	33,038	0,526	508	0,08
210	1,24	39	19,383	33,027	0,586	511	0,11
240	1,44	45	22,365	33,015	0,676	513	0,13
270	1,62	48	23,856	33,004	0,721	517	0,17
300	1,83	52	25,844	32,992	0,781	523	0,23
330	2,02	53	26,341	32,980	0,796	532	0,32
360	2,21	53	26,341	32,969	0,796	542	0,42
390	2,41	53	26,341	32,957	0,796	565	0,65
420	2,62	36	17,892	32,944	0,541	582	0,82
450	2,85	11	5,467	32,930	0,165	584	0,84
480	3,04	10	4,970	32,919	0,150	591	0,91
510	3,23	10	4,970	32,908	0,150	594	0,94
540	3,43	10	4,970	32,896	0,150	597	0,97
570	3,6	10	4,970	32,885	0,150	601	1,01
600	3,82	9	4,473	32,872	0,135	603	1,03
630	4,04	8	3,976	32,859	0,120	605	1,05
660	4,25	8	3,976	32,846	0,120	606	1,06
690	4,45	8	3,976	32,834	0,120	608	1,08
720	4,62	8	3,976	32,824	0,120	610	1,1
750	4,79	7	3,479	32,814	0,105	611	1,11
780	4,97	7	3,479	32,803	0,105	613	1,13
810	5,15	7	3,479	32,792	0,105	615	1,15
840	5,34	7	3,479	32,781	0,105	617	1,17
870	5,2	7	3,479	32,789	0,105	619	1,19
900	5,25	7	3,479	32,786	0,105	620	1,2
			0,000		0,000		-5
MAX			26,341		0,796		

Lampiran 7 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 20% beban 2kg

Sample Uji	: Sample Tengah Tanah + BA 20 % air 13%		
Diameter	: 6,492 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 102,1 gr
Tinggi	: 1,84 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 101 gr
Luas	: 33,101 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 4 kg		
Tegangan Normal	: 0,1208 kg		

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizonta (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan Vertikal (mm)
30	0,17	10	4,970	32,99944	0,150	501	0,01
60	0,32	18	8,946	32,90944	0,270	501	0,01
90	0,51	24	11,928	32,79544	0,360	504	0,04
120	0,68	31	15,407	32,69344	0,465	505	0,05
150	0,85	38	18,886	32,59144	0,571	507	0,07
180	1,03	45	22,365	32,48344	0,676	509	0,09
210	1,22	50	24,850	32,36944	0,751	511	0,11
240	1,41	56	27,832	32,25544	0,841	514	0,14
270	1,6	61	30,317	32,14144	0,916	517	0,17
300	1,8	65	32,305	32,02144	0,976	521	0,21
330	1,99	65	32,305	31,90744	0,976	570	0,7
360	2,25	17	8,449	31,75144	0,255	575	0,75
390	2,4	17	8,449	31,66144	0,255	581	0,81
420	2,64	16	7,952	31,51744	0,240	586	0,86
450	2,83	16	7,952	31,40344	0,240	592	0,92
480	3,02	15	7,455	31,28944	0,225	595	0,95
510	3,2	15	7,455	31,18144	0,225	599	0,99
540	3,4	14	6,958	31,06144	0,210	604	1,04
570	3,6	14	6,958	30,94144	0,210	609	1,09
600	3,8	13	6,461	30,82144	0,195	613	1,13
630	4,02	13	6,461	30,68944	0,195	618	1,18
660	4,21	13	6,461	30,57544	0,195	623	1,23
690	4,41	13	6,461	30,45544	0,195	627	1,27
720	4,6	13	6,461	30,34144	0,195	632	1,32
750	4,79	13	6,461	30,22744	0,195	637	1,37
780	4,94	12	5,964	30,13744	0,180	640	1,4
810	5,16	12	5,964	30,00544	0,180	645	1,45
840	5,35	12	5,964	29,89144	0,180	649	1,49
870	5,72	12	5,964	29,66944	0,180	674	1,74
900			0,000		0,000		
930							
960							
MAX			32,305		0,976		

Lampiran 8 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 20% beban 4kg

Sample Uji	: Sample bawah Tanah + BA 20% Air 13%		
Diameter	: 6,492 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 105,1 gr
Tinggi	: 1,855 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 105 gr
Luas	: 33,101 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 8 kg		

Tegangan Normal : 0,2417 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizont (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan (mm)
30	0,17	9	4,473	32,99944	0,135	499	-0,01
60	0,31	11	5,467	32,91544	0,165	498	-0,02
90	0,47	23	11,431	32,81944	0,345	498	-0,02
120	0,65	27	13,419	32,71144	0,405	499	-0,01
150	0,85	35	17,395	32,59144	0,526	501	0,01
180	1	40	19,880	32,50144	0,601	502	0,02
210	1,17	47	23,359	32,39944	0,706	503	0,03
240	1,4	52	25,844	32,26144	0,781	504	0,04
270	1,57	58	28,826	32,15944	0,871	506	0,06
300	1,75	63	31,311	32,05144	0,946	507	0,07
330	1,94	68	33,796	31,93744	1,021	510	0,1
360	2,11	71	35,287	31,83544	1,066	514	0,14
390	2,28	70	34,790	31,73344	1,051	524	0,24
420	2,55	38	18,886	31,57144	0,571	547	0,47
450	2,74	34	16,898	31,45744	0,510	552	0,52
480	2,92	33	16,401	31,34944	0,495	558	0,58
510	3,1	30	14,910	31,24144	0,450	563	0,63
540	3,3	29	14,413	31,12144	0,435	568	0,68
570	3,49	28	13,916	31,00744	0,420	571	0,71
600	3,65	27	13,419	30,91144	0,405	575	0,75
630	3,89	27	13,419	30,76744	0,405	580	0,8
660	4,06	27	13,419	30,66544	0,405	583	0,83
690	4,25	26	12,922	30,55144	0,390	588	0,88
720	4,45	25	12,425	30,43144	0,375	592	0,92
750	4,63	25	12,425	30,32344	0,375	595	0,95
780	4,8	25	12,425	30,22144	0,375	599	0,99
810	4,98	24	11,928	30,11344	0,360	603	1,03
840	5,17	23	11,431	29,99944	0,345	605	1,05
870	5,35	22	10,934	29,89144	0,330	608	1,08
900	5,55	22	10,934	29,77144	0,330	611	1,11
930	5,75	22	10,934	29,65144	0,330	614	1,14
MAX			35,287		1,066		

Lampiran 9 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 20% beban 8kg

Sample Uji	: Sample Atas Tanah + BA 30% air 13%		
Diameter	: 6,192 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 100,7 gr
Tinggi	: 1,8325 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 100,3 gr
Luas	: 24,090 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 2 kg		
Tegangan Normal	: 0,0830 kg		

Waktu (Dtk)	Peralihan Horizontal (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizontal (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan n Vertikal (Div)	Pergerakan n Vertikal (mm)
30	0,17	7	3,479	23,988	0,144	500	0
60	0,32	13	6,461	24,071	0,268	502	0,02
90	0,5	20	9,940	24,060	0,413	503	0,03
120	0,67	21	10,437	24,050	0,433	507	0,07
150	0,9	25	12,425	24,036	0,516	510	0,1
180	1,08	39	19,383	24,025	0,805	512	0,12
210	1,25	35	17,395	24,015	0,722	515	0,15
240	1,47	25	12,425	24,002	0,516	523	0,23
270	1,67	19	9,443	23,990	0,392	527	0,27
300	1,86	18	8,946	23,979	0,371	530	0,3
330	2,05	17	8,449	23,967	0,351	531	0,31
360	2,2	16	7,952	23,958	0,330	534	0,34
390	2,4	15	7,455	23,946	0,309	536	0,36
420	2,57	13	6,461	23,936	0,268	538	0,38
450	2,78	13	6,461	23,923	0,268	540	0,4
480	2,95	12	5,964	23,913	0,248	542	0,42
510	3,15	12	5,964	23,901	0,248	544	0,44
540	3,35	11	5,467	23,889	0,227	546	0,46
570	3,55	10	4,970	23,877	0,206	549	0,49
600	3,91	10	4,970	23,856	0,206	550	0,5
630	4,09	10	4,970	23,845	0,206	552	0,52
660	4,28	9	4,473	23,833	0,186	553	0,53
690	4,44	9	4,473	23,824	0,186	554	0,54
720	4,6	9	4,473	23,814	0,186	555	0,55
750	4,81	9	4,473	23,802	0,186	555	0,55
780	5	9	4,473	23,790	0,186	557	0,57
810	5,18	9	4,473	23,779	0,186	558	0,58
840	5,36	9	4,473	23,769	0,186	559	0,59
870	5,55	9	4,473	23,757	0,186	561	0,61
900	5,75	9	4,473	23,745	0,186	562	0,62
			0,000		0,000		-5
MAX			19,383		0,805		

Lampiran 10 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 30% beban
2kg

Sample Uji	: Sample Tengah Tanah + BA 30%air 13%		
Diameter	: 6,492 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 100,4 gr
Tinggi	: 1,84 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 99,9 gr
Luas	: 33,101 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 4 kg		
Tegangan Normal	: 0,1208 kg		

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizonta (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan Vertikal (mm)
30	0,17	9	4,473	32,99944	0,135	500	0
60	0,34	14	6,958	32,89744	0,210	500	0
90	0,41	21	10,437	32,85544	0,315	500	0
120	0,65	24	11,928	32,71144	0,360	501	0,01
150	0,82	32	15,904	32,60944	0,480	502	0,02
180	1,01	38	18,886	32,49544	0,571	503	0,03
210	1,2	44	21,868	32,38144	0,661	506	0,06
240	1,38	50	24,850	32,27344	0,751	507	0,07
270	1,58	54	26,838	32,15344	0,811	509	0,09
300	1,79	56	27,832	32,02744	0,841	513	0,13
330	1,98	56	27,832	31,91344	0,841	515	0,15
360	2,25	8	3,976	31,75144	0,120	519	0,19
390	2,44	8	3,976	31,63744	0,120	528	0,28
420	2,61	8	3,976	31,53544	0,120	555	0,55
450	2,81	8	3,976	31,41544	0,120	563	0,63
480	3,01	7,5	3,728	31,29544	0,113	574	0,74
510	3,17	7	3,479	31,19944	0,105	582	0,82
540	3,38	7	3,479	31,07344	0,105	592	0,92
570	3,57	7	3,479	30,95944	0,105	600	1
600	3,76	7	3,479	30,84544	0,105	609	1,09
630	3,98	7	3,479	30,71344	0,105	617	1,17
660	4,18	7	3,479	30,59344	0,105	625	1,25
690	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
720	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
750	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
780	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
810	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
840	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
870	0	0	0,000	33,10144	0,000	0	-5
900			0,000		0,000		
930							
960							
MAX			27,832		0,841		

Lampiran 11 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 30% beban 4kg

Sample Uji	: Sample bawah Tanah + BA 30% air 13%		
Diameter	: 6,395 cm	Berat Tanah sebelum pengujian	: 107 gr
Tinggi	: 1,855 cm	Berat Tanah setelah pengujian	: 106,5 gr
Luas	: 32,120 cm ²	kadar Air Sebelum pengujian	: 13 %
Faktor Kalibrasi	: 0,497 kgf/div	kadar Air Setelah pengujian	: %
Beban test	: 8 kg		

Tegangan Normal : 0,2491 kg

Waktu (Dtk)	Peralihan (mm)	Load Dial Reading (div)	Beban Horizont (kg)	Luas Koreksi (cm)	Tegangan Geser (kg/cm ²)	Pergerakan Vertikal (Div)	Pergerakan (mm)
30	0,17	8	3,976	32,99944	0,124	499	-0,01
60	0,32	15	7,455	32,90944	0,232	498	-0,02
90	0,58	21	10,437	32,75344	0,325	498	-0,02
120	0,65	23	11,431	32,71144	0,356	498	-0,02
150	0,82	33	16,401	32,60944	0,511	498	-0,02
180	1	39	19,383	32,50144	0,603	498	-0,02
210	1,2	45	22,365	32,38144	0,696	499	-0,01
240	1,38	50	24,850	32,27344	0,774	500	0
270	1,58	58	28,826	32,15344	0,897	503	0,03
300	1,77	62	30,814	32,03944	0,959	505	0,05
330	1,98	63	31,311	31,91344	0,975	507	0,07
360	2,15	64	31,808	31,81144	0,990	512	0,12
390	2,35	61	30,317	31,69144	0,944	519	0,19
420	2,54	37	18,389	31,57744	0,573	529	0,29
450	2,73	32	15,904	31,46344	0,495	548	0,48
480	2,92	31	15,407	31,34944	0,480	553	0,53
510	3,11	30	14,910	31,23544	0,464	557	0,57
540	3,32	28	13,916	31,10944	0,433	561	0,61
570	3,51	25	12,425	30,99544	0,387	565	0,65
600	3,71	25	12,425	30,87544	0,387	568	0,68
630	3,92	24	11,928	30,74944	0,371	571	0,71
660	4,12	24	11,928	30,62944	0,371	573	0,73
690	4,3	24	11,928	30,52144	0,371	576	0,76
720	4,51	24	11,928	30,39544	0,371	578	0,78
750	4,7	23	11,431	30,28144	0,356	580	0,8
780	4,86	23	11,431	30,18544	0,356	582	0,82
810	5,03	23	11,431	30,08344	0,356	584	0,84
840	5,23	23	11,431	29,96344	0,356	586	0,86
870	5,41	22	10,934	29,85544	0,340	587	0,87
900	5,6	22	10,934	29,74144	0,340	589	0,89
930	5,79	22	10,934	29,62744	0,340	590	0,9
MAX			31,808		0,990		

Lampiran 12 Pembacaan dial direct shear test campuran bottom ash 30% beban 8kg



Lampiran 13 Sample tanah asli atas



Lampiran 14 Sample tanah asli tengah



Lampiran 15 Sample tanah asli bawah



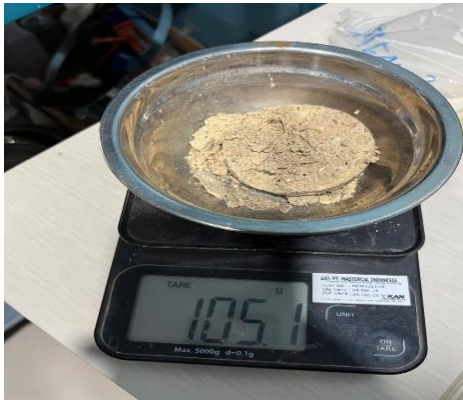
Lampiran 16 campuran 10% atas



Lampiran 17 Campuran 10% tengah



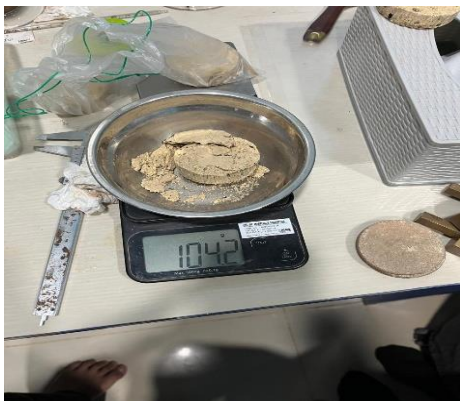
Lampiran 18 Campuran 10% bawah



Lampiran 19 Sample setelah di uji



Lampiran 20 Sample sebelum di uji



Lampiran 21 Sample setelah di uji



Lampiran 22 Sample setelah di uji

Attachment-2 : CRT-488/SIBAT-IV/NNI/2023

LABORATORY ANALYSIS REPORT

Customer : PT PLN INDONESIA POWER UPDK KEPULAUAN RIAU
: ULPLTU TANJUNG BALAI KARIMUN
Address : Jl. Pertambangan No 39 Kampung Ranggalang Tanjung Sebatok Kel. Tebing,
: Kec. Tebing, Kab. Karimun, Prov. Kepulauan Riau
Sample Received : March, 28th 2023
: Bottom Ash (Triwulan I Tahun 2023)
Date of Analysis : March, 28th - 31st 2023
Sample Matrix : Solid

NO	PARAMETER	UNIT	RESULT				METHOD
			AR	ADB	DB	DAFB	
1	Total Moisture	%	27.67	-	-	-	ASTM D3302/D3302M-22
2	Moisture in the Analysis Sample	%	-	2.22	-	-	ASTM D3173/D3173M-17a
3	Loss of Ignition, LOI	%	-	-	0.36	-	Gravimetric
4	Total carbon	%	-	3.64	3.72	-	ASTM D5373-21
5	Fineness on 45 Mikron	%	3.61				Gravimetric
NO	ASH ANALYSIS PARAMETER	UNIT	RESULT				METHOD
1	SiO ₂	%	54.37				Ignited 800°C ASTM D3682-13
2	Al ₂ O ₃	%	33.73				
3	Fe ₂ O ₃	%	6.36				
4	CaO	%	1.78				
5	MgO	%	0.63				
6	K ₂ O	%	0.29				
7	Na ₂ O	%	0.25				ASTM D5016-16
8	SO ₃	%	0.15				

Description Sampel, Form : Bulk, Commodity : Bottom Ash, Weight/Volume : ± 5 Kg, Packing : Unsealed Plastic Bag

Result are measurements by Laboratorium Batubara PT Surveyor Indonesia Cabang Semarang

The Result relate only to the samples tested and report shall not be reproduced except full, without written approval of the Laboratory