

Pengaruh Penambahan Limbah *Bottom Ash* Terhadap Kuat Geser Pada Tanah

Eltrit Bima Fitrian^{*1}, Demensi^{*2}, Irwan Lie Keng Wong^{*3}

^{*1,3} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, eltrit_bimafitrian@ukipaulus.ac.id ^{*1} dan irwanliekengwong@gmail.com ^{*3}

^{*2} Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, demensimensi@gmail.com ^{*2}

Corresponding Author: eltrit_bimafitrian@ukipaulus.ac.id

Abstrak

Studi ini dimaksudkan untuk mengevaluasi dampak dari penambahan limbah *bottom ash* pada *Direct shear Test* untuk tanah lempung yang memiliki kekuatan geser rendah dan kompresibilitas tinggi. Tahapan penelitian ini melibatkan rangkaian pengujian karakteristik fisik dari tanah, diikuti oleh penyusunan konfigurasi percobaan limbah *bottom ash* dalam pengujian langsung gaya geser (*Direct shear Test*). Jumlah sampel yang digunakan pada pengujian sebanyak 4 sampel uji pada pengujian pertama dan juga pada pengujian kedua dengan komposisi campuran sebesar 15%, 20%, dan 25% untuk limbah *bottom ash* yang digunakan. Hasil studi diperoleh bahwa tanah memenuhi sifat-sifat fisik tanah yaitu lempung anorganik dengan sifat plastisitas sedang dan didapatkan dari pengujian pada sampel tanah titik 1 dan sampel tanah titik 2 nilai kohesi (c) dan nilai sudut geser (ϕ) melalui pengujian *Direct shear Test*. Untuk sampel tanah titik 1 terjadi peningkatan nilai kohesi (c) yaitu 0,025 kg/cm², 0,041 kg/cm², 0,069 kg/cm², dan 0,076 kg/cm² begitupun pada peningkatan nilai sudut geser (ϕ) yang terjadi sebesar 10,32°, 10,67°, 10,38°, dan 14,16°. Adapun untuk sampel tanah titik 2 juga diperoleh peningkatan nilai kohesi (c) sebesar 0,048 kg/cm², 0,077 kg/cm², 0,084 kg/cm² dan 0,096 kg/cm² begitupun juga pada peningkatan nilai sudut geser (ϕ) yang terjadi sebesar 11,82°, 14,35°, 14,20, dan 14,10°. Dari hasil penelitian yang telah didapatkan bahwa dengan adanya campuran limbah *bottom ash* memiliki kapabilitas untuk meningkatkan nilai kekuatan geser (c) dan sudut geser (ϕ). Disimpulkan bahwa kemampuan dukung tanah menjadi semakin optimal dengan penambahan limbah *bottom ash* dibandingkan kondisi tanah sebelumnya.

Kata Kunci: Limbah *Bottom ash*, *Direct shear*, Kohesi, Sudut Geser

Abstract

The impact of adding bottom ash waste to a Direct Shear Test for clay soils with low shear strength and high compressibility is investigated in this study. The research entails evaluating the soil's physical properties and setting up bottom ash waste tests for the Direct Shear Test. For the first and second direct shear force tests, four test samples were utilized. The 15%, 20%, and 25% make up the utilized bottom ash waste mixture. The findings demonstrated that the soil possesses medium flexibility and inorganic clay's physical characteristics. In direct shear force testing, soil samples from points 1 and 2 yielded cohesion values (c) and shear angle values (ϕ). For point 1 soil samples, cohesiveness (c) values increased by 0.025 kg/cm², 0.041 kg/cm², 0.069 kg/cm², and 0.076 kg/cm², while shear angle (ϕ) values increased by 10.32°, 10.67°, 10.38°, and 14.16°. Additionally,

cohesiveness (c) values of 0.048 kg/cm², 0.077 kg/cm², 0.084 kg/cm², and 0.096 kg/cm² and shear angle (ϕ) values of 11.82°, 14.35°, 14.20°, and 14.10° increased in Point 2 soil samples. According to the results, adding bottom ash waste increases the shear strength (c) and shear angle (ϕ) of the soil. It has been discovered that adding bottom ash waste to soil enhances its load-bearing capacity.

Keywords: *Waste Bottom ash, Direct shear, Cohesion, Shear Angle*

PENDAHULUAN

Tanah memiliki peran krusial sebagai pendukung esensial dalam pembangunan berbagai struktur, termasuk gedung, infrastruktur transportasi, dan fasilitas perairan. Kehadiran tanah sebagai fondasi fisik membantu menopang berdirinya konstruksi-konstruksi ini, menjadikan kekokohan dan kenyamanan mereka sangat bergantung pada karakteristik dan stabilitas tanah di bawahnya. Di Indonesia, ragam jenis dan karakter tanah menjadi kenyataan, sehingga tiap wilayah atau lokasi memperlihatkan perbedaan dalam ciri-ciri tanahnya. Partikel-partikel tanah melibatkan bahan berbutir halus dan kasar, yang mengandung unsur mineral anorganik, zat-zat organik, air tanah, dan udara. Komposisi-komposisi ini memiliki peranan besar dalam menentukan kemampuan daya dukung tanah. [1].

Tanah lempung adalah salah satu variasi jenis tanah kohesif yang menonjol dengan sifat-sifat kekuatan geser yang minim, tetapi sekaligus menunjukkan tingkat kompresibilitas yang signifikan. Sifat kuat geser yang rendah menyebabkan adanya batasan pada beban, baik beban sementara maupun beban permanen, yang dapat diberikan di atasnya. Oleh karena itu, diperlukan suatu proses stabilisasi tanah yang bertujuan untuk memperbaiki atribut-atribut fisik dari tanah tersebut. Stabilisasi tanah dicapai melalui peningkatan parameter-parameter penting seperti kohesi (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ) yang dimaksudkan untuk mencapai tujuan utama dalam meningkatkan kemampuan dukung tanah. Parameter kuat geser tanah menggambarkan daya tahan maksimum tanah terhadap upaya perubahan bentuk, dapat didefinisikan sebagai kemampuan tanah untuk tetap kokoh dalam kondisi tertentu, termasuk tekanan dan tingkat kelembapan yang spesifik. [2].

Tanah yang dianalisis merupakan jenis tanah yang berasal dari Tawalian Timur, sebuah lokasi geografis yang terletak di desa di Kecamatan Tawalian, Kabupaten Mamasa. Tanah ini telah mengalami pergeseran (longsor) yang disebabkan oleh daya dukungnya yang lemah. Untuk mengatasi hal ini, perlu dilakukan tindakan stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan kimia. Dalam konteks ini meningkatkan kohesi dan sudut geser tanah dapat dilakukan dengan memanfaatkan limbah *Bottom ash* yang sejauh ini telah banyak terbuang. *Bottom ash* sebagai bahan tambah dalam sampel tanah diharapkan mampu memberikan perbaikan pada tanah lempung yang diuji. Tujuan utama dari studi ini ialah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah *bottom ash* terhadap karakteristik kekuatan geser dalam media tanah. Dengan demikian, topik utama penelitian ini adalah efek penggunaan limbah *Bottom ash* terhadap karakteristik kuat geser tanah yang mengalami pergeseran. Adapun beberapa penelitian terkait masalah tersebut, diantaranya:

Tindakan yang dapat diimplementasikan untuk meningkatkan karakteristik tanah tersebut termasuk strategi stabilisasi secara kimiawi dengan memanfaatkan campuran material sisa pembakaran batu bara (*bottom ash*). Dengan adanya inklusi material *bottom ash* menghasilkan penurunan nilai kohesi dan peningkatan sudut geser, karena pada daya rekat antara partikel-partikel tanah mengalami pengurangan. [3].

Objek uji dibiarkan tidak aktif dan ditimbang kemudian dilakukan pengujian terhadap kekuatan tekan dilakukan ketika benda uji berusia 28 hari. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa laju absorpsi dari bata semen meningkat saat abu dasar ditambahkan. Sementara itu, terkait dengan kekuatan tekan, bata semen mengalami penurunan. [4].

Setelah melalui tahap perendaman selama beragam periode waktu tersebut, langkah selanjutnya adalah menguji kekuatan tekan keseluruhan material beton. Hasil yang berasal dari berbagai faktor variabel ini akan dibandingkan, dengan tujuan akhir dari analisis ini untuk sampai pada kesimpulan apakah limbah *bottom ash* memiliki potensi sebagai komponen dalam pencampuran semen selama proses produksi *cube* dan *tetrapod*. [5].

Potensi pergeseran dievaluasi menggunakan sampel tanah gambut asli, disertai dengan penambahan 5% pasir dan penggabungan abu tempurung kelapa dengan perbandingan 0%, 5%, 10%, dan 15% terhadap massa total sampel tanah. Diperoleh bahwa pengaruh pencampuran pasir dan abu tempurung kelapa dalam tanah gambut selama periode pengeringan 3 hari berdampak signifikan terhadap peningkatan daya dukung beban tanah. [6].

Intensitas kekuatan tekan akan meningkat sejalan dengan periode perendaman yang lebih lama. Ini juga berlaku seiring dengan pertambahan persentase zat aditif, yang berdampak pada peningkatan nilai kekuatan tekan. Sementara itu, menjalani proses perendaman pada sampel menyebabkan penurunan pada nilai kekuatan tekan. [7].

Peningkatan nilai CBR terjadi pada kedua titik sampel melalui uji CBR tanpa adanya perendaman. Pada titik 1 peningkatan menjadi 1,97%, 2,63%, 3,80%, 5,70%, dan 6,33%. Pada titik 2, terjadi kenaikan menjadi 2,24%, 2,60%, 3,23%, 3,97%, dan 5,17%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan slag nikel mampu meningkatkan daya dukung tanah lempung melalui peningkatan nilai CBR. [8].

Peninjauan terhadap penggunaan variasi campuran *bottom ash* pada tanah lempung terhadap hubungan signifikan antara kekuatan tekan dan kekuatan gesernya. Diperoleh bahwa nilai korelasi positif antara hasil uji keduanya, karena keduanya mengalami peningkatan bersamaan. Hasil peningkatan dosis *bottom ash* secara langsung berkaitan dengan peningkatan nilai kuat geser (C_u) dan nilai tegangan (q_u). [9].

Dampak pemanfaatan fly ash, limbah batu bara menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam nilai kuat tekan bebas sebagai komponen dalam proses stabilisasi tanah. Peningkatan tersebut yakni diperoleh nilai 11,600 kg/cm² setelah perawatan selama 28 hari pada *fly ash* kadar 5% dimana awalnya adalah 4,389 kg/cm². Selain itu, campuran yang mengandung *fly ash* dengan proporsi 5%, 10%, 20%, dan 40% pada rentang waktu yang sama juga mengalami peningkatan. Puncak nilai tertinggi tercapai ketika campuran dengan kandungan *fly ash* sebesar 5% diberi perawatan selama 28 hari yaitu sebesar 11,600 kg/cm². [10].

Stabilisasi tercapai melalui penggabungan *Bottom ash* ke tanah sedimen dengan variasi persentase yang berbeda (5%-20%). Diperoleh bahwa tanah sedimen tergolong dalam CH (*Clayey High Plasticity*) menurut USCS (*Unified Soil Classification System*). Perlakuan dengan abu dasar 5% menghasilkan CBR tertinggi, 7,17%, meningkat sebesar 24,26% dibanding tanah tanpa stabilisasi. Secara keseluruhan, tanah sedimen yang diolah dengan abu dasar 5% dan 10% berpotensi digunakan dalam proyek TPA. [11].

Pada kondisi kandungan tertentu, penambahan limbah tandan kelapa sawit kosong dan semen cenderung menurunkan stabilitas tanah dan meningkatkan nilai kuat tekan tanah. Meskipun demikian, nilai ini diharapkan mengalami penurunan setelah mencapai puncaknya. [12].

METODOLOGI

A. Lokasi Pengambilan Sampel dan Waktu Penelitian

Sumber data utama diperoleh melalui proses pengambilan sampel tanah dan *bottom ash* yang kemudian digabungkan. Tahap awal pengujian melibatkan pengambilan sampel tanah di Desa Tawalian Timur,

Kecamatan Tawalian, Kabupaten Mamasa, bersamaan dengan sampel limbah *bottom ash* yang diperoleh dari Industri Pabrik, PT. Makassar Tene pada bulan Juli 2022.



Gambar 1. Lokasi sampel tanah dan Limbah *Bottom ash*

B. Bentuk Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode studi eksperimental, di mana terbentuk suatu kelompok subjek yang dikenai perlakuan tertentu, kemudian hasilnya diamati. Variabel bebas dalam studi ini merujuk pada perlakuan yang diterapkan, sementara variabel terikat mencakup hasil yang diamati. Eksperimen ini melibatkan pemberian berbagai macam perlakuan terhadap subjek, diikuti oleh pengukuran hasil yang diperoleh dalam bentuk data numerik, yang nantinya akan diolah secara lebih lanjut.



Gambar 2. Sampel tanah dan limbah *bottom ash*

C. Metode Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh dengan metode eksperimental dan juga dengan merujuk langsung ke laporan atau penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

1. Uji Laboratorium

Tinjauan eksperimental dilaksanakan dengan tujuan memperoleh data utama yang nantinya akan dianalisis dan dibahas dalam tahap berikutnya.

2. Observasi

Tindakan pengamatan dilaksanakan dengan tujuan memperoleh data uji, kemudian dilanjutkan dengan proses evaluasi terhadap data yang diperoleh tersebut.

D. Teknik Pengumpulan Data

Serangkaian langkah pengujian dilakukan dalam tahapan pengumpulan data penelitian ini, diantaranya:

1. Pengujian Kadar Air (*Natural Water Content Test*)

Berdasarkan metode (ASTM D-2216) dalam pelaksanaan pengujian kadar air.

2. Pengujian Berat Isi Tanah (*Bulk Density*)
 Pengujian berat isi tanah dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D-1883).
3. Pengujian Berat Jenis Tanah (*Specific Gravity*)
 Pelaksanaan berdasarkan metode (AST854) untuk pengujian berat jenis tanah.
4. Batas-batas Atterberg (*Liquid Limit*)
 Pelaksanaan pengujian berdasarkan metode (ASTM D-4318) untuk uji batas cair.
5. Batas-batas Atterberg (*Plastic Limit*)
 Pengujian batas plastis dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D-4318).
6. Batas-batas Atterberg (*Shrinkage Limit*)
 Pengujian batas susut dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D-4318).
7. Gradasi Butiran (Analisa Saringan)
 Pengujian analisa saringan dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D-422).
8. Gradasi Butiran (Analisa *Hydrometer*)
 Pengujian analisa hydrometer dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D- 1440).
9. Uji Geser Langsung (*Direct shear Test*)
 Pengujian geser langsung dilaksanakan berdasarkan metode (ASTM D-3080).

E. Metode Analisis Data

Tinjauan dilakukan melalui pendekatan laboratorium uji ASTM, karena itu langkah-langkah pelaksanaan pengujian karakteristik fisik tanah dan pengujian *direct shear test* akan dijalankan sesuai pedoman yang telah ditetapkan.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian Sifat Fisik Tanah

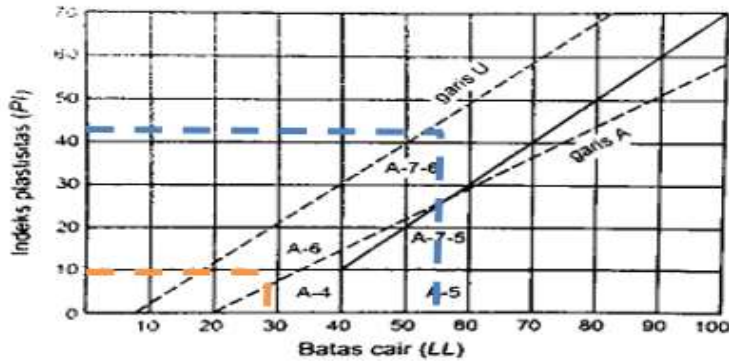
1. Pengujian Sifat-Sifat Fisik Tanah

- a. Uji kadar air tanah melalui penerapan metode ASTM D-2216, diperoleh dalam sampel tanah lempung anorganik untuk kadar air pada titik lokasi penelitian pertama dengan nilai rata-rata sekitar 55,949%. Untuk titik kedua, hasil pengukuran menunjukkan kadar air rata-rata sekitar 54,374%.
- b. Metode uji berat isi tanah (ASTM D-1883) digunakan untuk menganalisis berat isi sampel tanah lempung anorganik di lokasi penelitian. Pada titik pertama penelitian, rata-rata berat isi ditemukan sekitar 39,22 gr/cm³, sementara pada titik kedua, rata-rata berat isi sekitar 52,16 gr/cm³.
- c. Uji berat jenis tanah melalui metode ASTM D-854 menghasilkan sampel tanah pada titik penelitian pertama sekitar 2,41 gr/cm³, dan pada titik kedua sekitar 2,34 gr/cm³. Diketahui sampel tanah dari kedua titik penelitian termasuk dalam kategori tanah lempung anorganik.
- d. Melalui pelaksanaan uji batas-batas Atterberg (ASTM D-4318) diperoleh dari sampel tanah pada titik penelitian pertama dan kedua yakni data mengenai batas plastis indeks plastis dan batas cair. Informasi lebih lanjut dijelaskan dalam tabel 1.

Tabel 1. Nilai Batas-batas Atterberg

	LL	PL	IP
--	----	----	----

Tanah Asli 1	54,40	40,53	13,67
Tanah Asli 2	54,03	40,63	13,40



Gambar 3. Korelasi antara *liquid limit* dengan *plastic index*

Tanah tersebut dikelompokkan sebagai jenis CL (*clay low*), yang termasuk dalam kategori lempung anorganik dengan tingkat plastisitas yang berkisar dari rendah hingga sedang. Indeks plastisitas adalah 1,92% pada titik 1 dan 13,40% pada titik 2 yang dimana berdasarkan Tabel AASHTO menunjukkan bahwa tanah uji, dengan lebih dari 35% melewati saringan nomor 200, termasuk dalam kategorisasi tanah lempung-lanau. Terkait dengan tanah lempung kelompok A-6, dikarakterisasi dengan nilai indeks plastis (PI) melebihi 11% serta nilai batas cair (LL) di atas 40% pada posisi 1 dan 2.

- a) Analisa *Hydrometer* (ASTM D-1440) dan Pengujian Gradasi Butiran Analisa Saringan (ASTM D-422) Diperoleh hasil persentase butiran tertahan dan lolos dalam setiap ukuran saringan dikaitkan dengan diameter saringan dari pengujian karakteristik tanah. Dari analisis hidrometer, diameter butiran tanah ditentukan berdasarkan persentase kehalusannya. Kedua hasil pengujian ini dihubungkan dalam koordinat diameter saringan untuk menghasilkan persentase tanah dalam kategori pasir, lanau, dan lempung. Hasil perhitungan ini merinci pembagian butiran tanah dalam analisis saringan dan hydrometer.

Titik 1;

Pasir = $100\% - 71,496\% = 28,504\%$
 Lanau = $71,496\% - 23,073\% = 48,423\%$
 Lempung = $100\% - (48,423\% + 28,504\%) = 23,073\%$

Titik 2;

Pasir = $100\% - 73,222\% = 26,778\%$
 Lanau = $73,222\% - 21,535\% = 51,687\%$
 Lempung = $100\% - (51,687 + 26,778\%) = 21,535\%$

Hasil evaluasi karakteristik fisik tanah menghasilkan nilai dalam setiap pengujian, seperti berikut ini:

Tabel 2. Hasil Uji Pada Sifat-sifat Fisik Tanah Asli

No	Pemeriksaan	Simbol	Hasil Pemeriksaan		
			Sampel I	Sampel II	Satuan
1	Kadar Air	Wc	58.957	56.522	%
2	Berat Jenis	Gs	2.218	2.61	Gram/Cm ³
3	Batas Cair	LL	54,40	54,03	%

4	Gradasi Butiran	Batas Plastis	PL	40,53	40,63	%
		Batas Susut	SL	6,33	7,45	%
		Indeks Plastis	PI	13,67	13,40	%
		Lolos Saringan 200		70,674	73,222	%
		Pasir		28,504	26,778	%
		Lanau		48,423	51,687	%
		Lempung		23,073	21,535	%

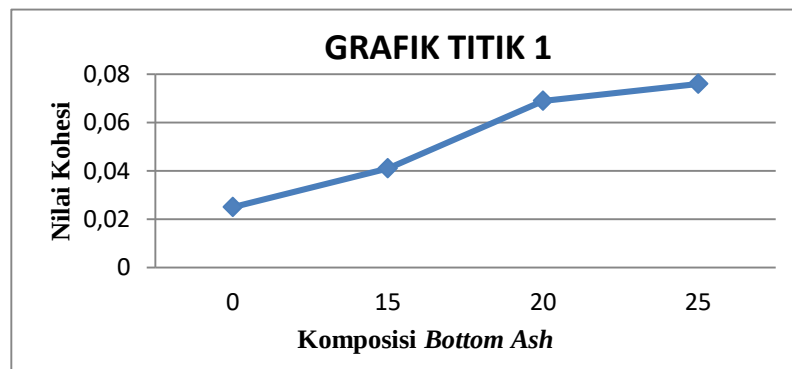
B. Hasil Penelitian Mekanis

1. Hasil Pengujian *Direct shear*

Hasil pengujian uji geser langsung (*direct shear test*) dari setiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash* diperoleh nilai kohesi (c) dan nilai sudut geser (ϕ). Pada titik 1 didapatkan nilai kohesi (c) komposisi 0% yaitu 0,056 kg/cm², komposisi 12% yaitu 0,059 kg/cm², komposisi 20% yaitu 0,066 kg/cm², dan komposisi 28% yaitu 0,067 kg/cm².

Tabel 3. Komposisi Pada Titik 1 untuk *Bottom ash* dan Kohesi

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Kohesi (Kg/cm ²)
0	0,025
15	0,041
20	0,069
25	0,076



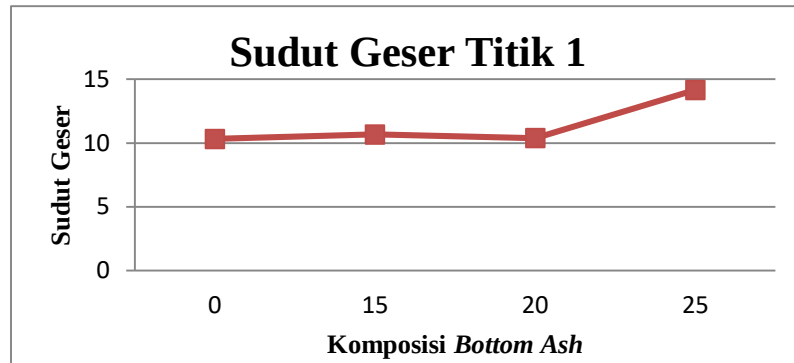
Gambar 4. Hubungan komposisi *bottom ash* dengan kohesi pada Titik 1

Diketahui terdapat peningkatan kohesi pada tiap- tiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash*. peningkatan kohesi paling menonjol terlihat pada komposisi 20%. Kohesi yang pada awalnya sebesar 0,041 kg/cm² dengan komposisi bubuk *bottom ash* sebesar 15% terdapat peningkatan yang cukup besar yaitu 0,069 kg/cm² pada komposisi bubuk *bottom ash* sebesar 20%. Pada titik 1 didapatkan nilai sudut geser (ϕ) komposisi 0% sebesar 10,32°, komposisi 15% sebesar 10,67°, komposisi 20% sebesar 10,38°, dan komposisi 25% sebesar 14,16°.

Tabel 4. Komposisi *Bottom Ash* dan Kohesi Pada Titik 1

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Sudut Geser (°)
0	10,32
15	10,67

20	10,38
25	14,16

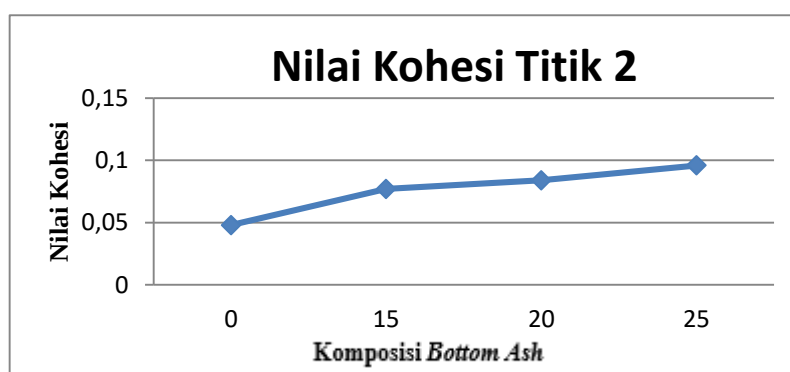


Gambar 5. Hubungan pada titik 1 antara komposisi *bottom ash*

Terdapat peningkatan sudut geser pada tiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash*. Peningkatan paling tinggi terjadi pada komposisi penambahan bubuk *bottom ash* 25% dengan nilai sudut geser sebesar 14,16°. Walaupun peningkatan yang didapatkan tidak terlalu besar dalam setiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash*. Pada titik 2 didapatkan nilai kohesi (c) komposisi 0% yaitu 0,048 kg/cm², komposisi 15% yaitu 0,077 kg/cm², komposisi 20% yaitu 0,084 kg/cm², dan komposisi 25% yaitu 0,096 kg/cm².

Tabel 5. Komposisi *Bottom ash* dan Kohesi Pada Titik 2

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Kohesi (Kg/cm ²)
0	0,048
15	0,077
20	0,084
25	0,096



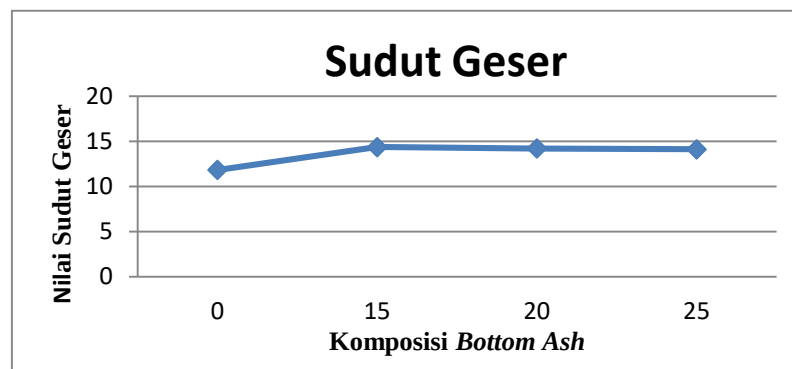
Gambar 6. Hubungan pada Titik 2 antara komposisi *bottom ash* dengan kohesi

Pada sampel tanah titik 2 terdapat peningkatan kohesi yang cukup baik yang terjadi pada tiap-tiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash*. Nilai kohesi paling tinggi yang diperoleh terjadi dari penambahan komposisi bubuk *bottom ash* 25% dengan kohesi sebesar 0,096 kg/cm². Dari hasil yang diperoleh pada titik 2 didapatkan nilai sudut geser (ϕ) komposisi 0% sebesar 11,82°, komposisi 15%

mengalami kenaikan sebesar $14,35^\circ$, tetapi pada komposisi 20% mengalami penurunan sebesar $14,20^\circ$, dan komposisi 25% mengalami penurunan sebesar $14,10^\circ$.

Tabel 6. Komposisi *Bottom ash* dan Sudut Geser Pada Titik 2

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Sudut Geser ($^\circ$)
0	11,82
15	14,35
20	14,20
25	14,10



Gambar 7. Hubungan pada Titik 2 antara komposisi *bottom ash* dengan sudut geser

Diperoleh peningkatan dari sudut geser tiap-tiap komposisi penambahan bubuk *bottom ash* dengan peningkatan paling kecil terjadi pada komposisi penambahan bubuk *bottom ash* 15% dengan nilai sudut geser sebesar $14,35^\circ$ meningkat menjadi $14,20^\circ$ dengan campuran bubuk *bottom ash* 20%.

2. Komposisi *Bottom Ash* Terhadap Kohesi Pada Kedua Titik

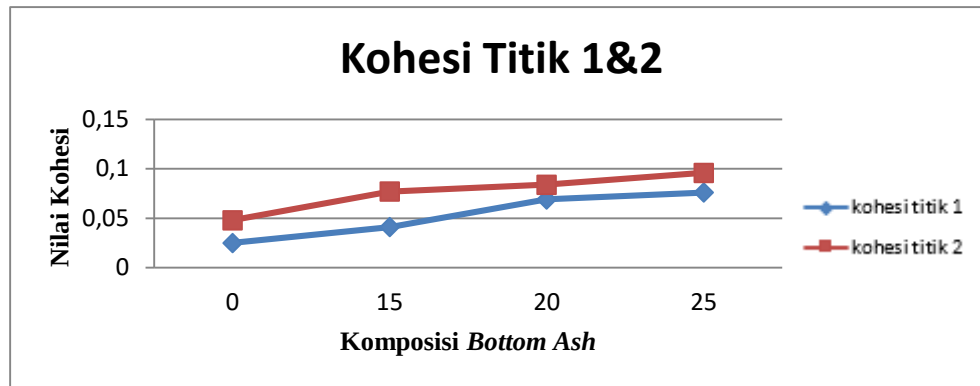
Dari informasi yang diambil dari evaluasi sampel tanah di titik 1 dan titik 2, tercatat parameter kohesi (c). Selanjutnya, nilai kohesi pada sampel tanah di titik 1 dan titik 2 disatukan, lalu digambarkan dalam bentuk grafik kohesi untuk penyajian visual. Grafik tersebut menggambarkan hubungan antara komposisi bubuk *Bottom ash* dan nilai kohesi pada dua titik sampel tanah yang telah disebutkan sebelumnya.

Tabel 7. Komposisi *Bottom Ash* dan Kohesi Titik 1 dan Titik 2

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Kohesi (c) Titik 1	Kohesi (c) Titik 2
0	0,025	0,048
15	0,041	0,077
20	0,069	0,084
25	0,076	0,096

Gambar 8 menunjukkan hasil uji geser langsung pada sampel tanah yang memiliki *bottom ash* ditambahkan ke dalamnya. Jelas bahwa kohesivitas sampel tanah titik 1 dari hasil pengujian meningkat. 15% bubuk *bottom ash* meningkatkan kohesi sebesar $0,041 \text{ kg / cm}^2$, 20% bubuk *bottom ash* meningkatkan kohesi sebesar $0,069 \text{ kg / cm}^2$, dan 25% *bottom ash* meningkatkan kohesi sebesar $0,076 \text{ kg / cm}^2$, semua relatif terhadap kohesivitas tanah asli sebesar 0%. Tingkat kohesi di dalam sampel tanah titik 1 meningkat secara proporsional dengan peningkatan proporsi bubuk *bottom ash* dalam campurannya. Hal ini disebabkan oleh

kemampuan *bottom ash* sebagai bahan aditif untuk menarik partikel-partikel tanah dan menjaga kelembaban tanah. Hasilnya, kekuatan geser dalam tanah juga meningkat sejalan dengan perubahan ini.



Gambar 8. Hubungan Antara Kohesi (c) dengan Komposisi *Bottom Ash*

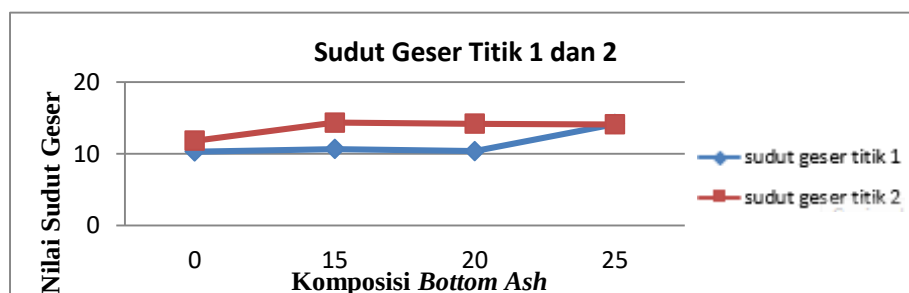
Terdapat peningkatan kohesi untuk sampel tanah titik 2. Diketahui kohesi adalah 0,048 kg/cm² untuk tanah asli (0%), ketika ditambahkan bubuk *bottom ash* 15%, kohesi meningkat menjadi 0,077 kg/cm². Ketika ditambahkan bubuk *bottom ash* 20%, kohesi meningkat menjadi 0,084 kg/cm², dan pada penambahan 25% bubuk *bottom ash*, kohesi meningkat menjadi 0,096 kg/cm². Peningkatan komposisi *bottom ash* dalam sampel tanah titik 2 berkontribusi pada peningkatan kohesi dan kekuatan geser tanah. Pada Gambar 8, terlihat bahwa garis linear dari sampel tanah pada titik 2 terletak di posisi yang lebih dari garis sampel tanah pada titik 1 yang artinya terjadi peningkatan kohesi yang lebih signifikan pada titik 2.

3. Komposisi *Bottom Ash* Terhadap Sudut Geser Pada Kedua Titik

Hasil analisis sampel tanah pada titik 1 dan 2 menunjukkan nilai sudut geser (ϕ). Data sudut geser dari kedua titik tersebut digabungkan untuk membentuk grafik perubahan sudut geser dengan variasi komposisi bubuk *bottom ash*. Grafik tersebut menggambarkan variasi sudut geser sebagai fungsi dari komposisi bubuk *bottom ash* di kedua titik pengamatan.

Tabel 8. Komposisi Pada Titik 1 dan Titik 2 Untuk *Bottom Ash* dan Sudut Geser

Komposisi <i>Bottom ash</i> (%)	Sudut Geser (°) Titik 1	Sudut Geser (°) Titik 2
0	10,32	11,82
15	10,67	14,35
20	10,38	14,20
25	14,16	14,10



Gambar 9. Hubungan antara sudut geser (ϕ) dengan komposisi *bottom ash*

C. Pembahasan

1. Dari hasil uji *direct shear* dengan inklusi *bottom ash* dalam sampel tanah, diamati bahwa sudut geser pada titik 1 (tanpa kandungan *bottom ash*) mengalami peningkatan sebesar $10,32^\circ$. Namun, ketika bubuk *bottom ash* sebanyak 15% ditambahkan, tercatat peningkatan sudut geser menjadi $10,67^\circ$. Pada penambahan bubuk *bottom ash* 20%, sudut geser mengalami peningkatan menjadi $10,38^\circ$, dan pada penambahan 25% bubuk *bottom ash*, sudut geser meningkat drastis menjadi $14,16^\circ$. Penambahan bubuk *bottom ash* menguatkan sampel tanah dengan mengikat partikel di dalamnya, mengakibatkan peningkatan sudut geser pada kedua titik pengujian. Pada titik 2 juga terjadi peningkatan kohesi, dimana sudut geser meningkat dari $1,82^\circ$ (tanah asli 0%) menjadi $14,35^\circ$ pada penambahan 15% bubuk *bottom ash*, $14,20^\circ$ pada penambahan 20%, dan $12,10^\circ$ pada penambahan 25% bubuk *bottom ash*. Peningkatan kohesi juga disebabkan oleh komposisi bubuk *bottom ash* yang lebih tinggi dalam sampel tanah.
2. Hasil pengujian *direct shear* berdasarkan nilai kohesi dan sudut geser yang diperoleh menunjukkan peningkatan kekuatan geser tanah dari bubuk *bottom ash* yang dicampurkan ke dalam sampel tanah. Pengujian terhadap tanah sampel yang dicampurkan dengan bubuk *bottom ash* pada empat kali pengujian dan tingkat pembebanan (gaya normal) yang diberikan berbeda-beda pada setiap sampelnya. Grafik hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser diperoleh melalui pembacaan setiap nilai pada *proving ring* dari sampel tanah dimasukkan ke dalam tabel tegangan geser bersama dengan nilai tegangan geser maksimum. Sebuah garis linear kemudian digambar untuk menghitung nilai kohesi (c) dan sudut geser efektif (ϕ) dari pengujian sampel tanah yang telah dicampur dengan abu dasar (*bottom ash*). Hasil uji *direct shear* yang dilakukan mengindikasikan bahwa tiap contoh sampel tanah yang dicampurkan dengan *bottom ash* dalam perbandingan penambahan 15%, 20%, dan 25%, menunjukkan kenaikan terhadap parameter kohesi (c) dan sudut geser (ϕ).

KESIMPULAN

Terdapat perbedaan kadar air dan berat jenis pada kedua sampel. Sampel 1 memiliki kadar air 55,949% dan berat jenis 2,41 gr/cm², sedangkan sampel 2 memiliki kadar air 54,374% dan berat jenis 2,34 gr/cm². Ini mengindikasikan jenis tanah lempung organik. Batas-batas Atterberg juga berbeda, dengan sampel 1 memiliki batas cair 30,83%, batas plastis 28,915%, dan indeks plastisitas 1,92%. Sementara sampel 2 memiliki batas cair 33,06%, batas plastis 31,679%, dan indeks plastisitas 13,40%. Secara keseluruhan, tanah di Tawalian Timur adalah tanah lempung berlanau dengan plastisitas rendah dan pengembangan sedang. Penambahan Limbah *Bottom ash* dari kedua sampel dengan uji geser langsung (*Direct shear Test*), diperoleh peningkatan setiap kenaikan variasi Limbah *Bottom ash*. Tingkat peningkatan ini juga berpotensi untuk terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah Limbah *Bottom ash* yang ditambahkan pada nilai yang lebih signifikan secara kuantitatif.

SARAN

1. Penambahan Limbah *Bottom ash* dengan konsentrasi mulai dari 0% hingga 25% secara signifikan kompatibel dengan karakteristik tanah. Oleh karena itu, solusi ini bisa diterapkan untuk memperkuat stabilitas tanah di wilayah Desa Tawalian Timur, Kecamatan Tawalian, di Kabupaten Mamasa.
2. Untuk studi mendatang, disarankan untuk menjalankan eksperimen dengan mencampurkan Limbah *Bottom ash* dalam variasi proporsi yang berbeda, sehingga dapat memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai potensi aplikasi material ini dalam konteks stabilisasi tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. G. Pang' Raran, I. L. K. Wong, dan I. Apriyani, "Pengaruh Penambahan Bubuk Gypsum Pada Tanah Lempung Dengan Pengujian *Direct Shear*," *Paulus Civ. Eng. J.*, vol. 4, no. 1, hlm. 53–60, Mar 2022, doi: 10.52722/pcej.v4i1.377. <https://doi.org/10.52722/pcej.v4i1.377>.
- [2] Head, K. H., "Manual of soil laboratory testing". Vol. 2: 509-562. John willey and Sons, New York. 1982.
- [3] E., B. Chairullah, dan H. Yunita, "Pengaruh Penambahan *Bottom ash* Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah Lempung Desa Beureugang Kaway XVI Aceh Barat," *J. Civ. Eng. Stud.*, vol. 3, no. 2, hlm. 106–112, Agu 2021, doi: 10.24815/journalces.v3i2.13487. <http://jim.usk.ac.id/CES/article/view/13487>.
- [4] M. A. Sultan, I. Imran, dan R. Sakti, "Subtitusi Parsial Agregat Halus Dengan *Bottom ash* Pada Pembuatan Bata Semen," *Rekayasa Sipil*, vol. 13, no. 1, hlm. 64–69, Feb 2019., <https://rekayasasipil.ub.ac.id/index.php/rs/article/view/519>.
- [5] R. Syamsuddin, dkk., "Pengaruh Campuran Kadar *Bottom ash* Dan Lama Perendaman Air Laut Terhadap Kuat Tekan, Lendutan, Kapasitas Lentur, Kuat Geser Dan Pola Retak Balok," *J. Rekayasa Sipil*, vol. 9, 2021. <https://rekayasasipil.ub.ac.id/index.php/rs/article/view/292>.
- [6] K. V. Pratama, F. Sarie, dan S. Gandi, "Pengaruh Pencampuran Tanah Gambut Dengan Pasir Dan Abu Tempurung Kelapa Terhadap Daya Dukung Tanah," *UMBJM*, vol. 4, no. 1, 2021. <https://journal.umbjm.ac.id/index.php/density/article/view/846>.
- [7] A. Zulnasari, S. A. Nugroho, dan F. Fatnanta, "Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung Lunak Distabilisasi Dengan Kapur dan Limbah Pembakaran Batubara," *J. Rekayasa Sipil JRS-Unand*, vol. 17, no. 1, hlm. 24, Jul 2021, doi: 10.25077/jrs.17.1.24-36.2021. <http://jrs.ft.unand.ac.id/index.php/jrs/article/view/362>.
- [8] P. S. Linga, I. L. K. Wong, dan E. B. Fitriani, "Analisis Hasil Pengujian California Bearing Ratio Penambahan Slag Nikel Pada Tanah Lempung," *Paulus Civ. Eng. J.*, vol. 4, no. 4, hlm. 564–570, Des 2022, doi: 10.52722/pcej.v4i4.539. <http://ojs.ukipaulus.ac.id/index.php/pcej/article/view/539>.
- [9] C. Sari, I. L. K. Wong, dan H. A. I. Sopacua, "Korelasi Kuat Tekan Bebas (UCT) Dengan Kuat Geser Langsung (*Direct shear Test*) Pada Tanah Lempung," *Paulus Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 2, hlm. 359–369, Jun 2023, doi: 10.52722/pcej.v5i2.646. <http://ojs.ukipaulus.ac.id/index.php/pcej/article/view/646>.
- [10] D. Triadi dan R. M. Rustamaji, "Pengaruh Penambahan Limbah Batu Bara (Fly Ash) Terhadap Uji Kuat Tekan Bebas (UCS) Pada Tanah Timbunan Biasa", *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang* vol.7.no. 3. 2020. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/JMHMS/article/view/42578>.
- [11] N. Nursamiah, dan H. Hasan, "*Studi Stabilisasi Material Sedimen Danau Tempe Dengan Bottom ash Sebagai Alternatif Tanah Timbunan*." Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat ., pp.130-135, 2019. <http://repository.poliupg.ac.id/4160/>.
- [12] M. Anggraini and A. Saleh, "Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Abu Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Semen Terhadap Kuat Tekan Bebas", *JS*, vol. 9, no. 2, pp. 108–115, Dec. 2021. <https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/article/view/22>.