

Implementasi *Fly ash* sebagai Bahan Stabilisasi pada Tanah Berkualitas Rendah

Muh Alpian Yacub^{1*}, Andi Marini Indriani³, Gunaedy Utomo³

^{1*,2,3} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Balikpapan

*Email: 207011563@uniba-bpn.ac.id

Abstract

This research shows the effectiveness of fly ash as a soil stabilization material and the factors that influence the level of stabilization. Fly ash was chosen because of its significant economic and environmental benefits. The main aim of this research is to determine how much influence fly ash has on the unconfined compressive strength value of the soil. Tests include Water Content, Sieve Analysis, Specific Gravity, Standard Compaction, and Unconfined Compressive Strength, with fly ash mixture variations of 8%, 16%, and 24%. Each variation was tested at five maturity periods: 3 days, 7 days, 14 days, 21 days, and 28 days. The results show that the addition of 24% fly ash results in a decrease in soil specific gravity of 8.65% and an increase in the MDD value of 6.56%. Unconfined compressive strength (UCS) testing showed the highest Q_u increase of 54.04% with the addition of 24% fly ash after 28 days of curing, with a Q_u value reaching 2.29 kg/cm² (224.51 kPa). This research shows that the addition of fly ash significantly increases the stability and bearing capacity of the soil.

Keywords : Stabilization, unconfined compressive strength, specific gravity, standard compaction, fly ash

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah dan faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat stabilisasi. *Fly ash* dipilih karena manfaatnya yang signifikan secara ekonomi dan lingkungan. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh *fly ash* terhadap nilai kuat tekan bebas tanah. Pengujian mencakup Kadar Air, Analisa Saringan, Berat Jenis, Pemadatan Standar, dan Kuat Tekan Bebas, dengan variasi campuran *fly ash* sebesar 8%, 16%, dan 24%. Setiap variasi diuji pada lima masa peram: 3 hari, 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa penambahan 24% *fly ash* menghasilkan penurunan berat jenis tanah sebesar 8,65% dan peningkatan nilai MDD sebesar 6,56%. Pengujian kuat tekan bebas (UCS) menunjukkan peningkatan Q_u tertinggi sebesar 54,04% pada penambahan 24% *fly ash* setelah 28 hari pemeraman, dengan nilai Q_u mencapai 2,29 kg/cm² (224,51 kPa). Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* secara signifikan meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah.

Kata kunci: Stabilisasi, kuat tekan bebas, berat jenis, pemadatan standar, *fly ash*

1. Pendahuluan

Dengan semakin meningkatnya populasi di Indonesia, lahan untuk pembangunan rumah tinggal semakin berkurang. Lahan yang ideal untuk membangun rumah juga semakin langka, sehingga yang tersisa adalah lahan dengan daya dukung tanah yang rendah [1]. Oleh karena itu, diperlukan upaya-upaya untuk mengurangi kerusakan dan risiko yang mungkin terjadi [2].

Tanah berfungsi sebagai landasan bagi struktur bangunan. Kestabilan tanah memiliki peran penting dalam menentukan kemampuan tanah untuk menopang konstruksi yang dibangun di atasnya [3]. Pada tanah lunak terdapat dua masalah pokok. Pertama, masalah daya dukung tanah yang rendah. Kedua, masalah penurunan yang besar. Sifat tanah lunak yang lain, yang juga kurang menguntungkan adalah mempunyai kadar air yang tinggi [4]. Tanah adalah material yang terdiri dari partikel mineral padat yang tidak terikat secara kimia, dengan rongga di antara partikel-partikel tersebut diisi oleh cairan dan gas. Berdasarkan ukuran partikelnya, tanah diklasifikasikan menjadi empat jenis: kerikil, pasir, lanau, dan lempung [5].

Stabilisasi tanah dapat dilakukan melalui metode mekanis dan kimia. Perbaikan mekanis dapat dilakukan dengan menggunakan serat tanah untuk menggantikan bahan tanah yang tidak memenuhi standar, sementara perbaikan kimia melibatkan penambahan bahan aditif [6], salah satunya yaitu menggunakan *fly ash*. Secara umum, stabilisasi tanah adalah proses memperbaiki sifat-sifat tanah dengan menambahkan bahan tertentu, sehingga dapat meningkatkan kekuatan tanah dan mempertahankan kekuatan gesernya [7]. Metode pelaksanaan pekerjaan stabilisasi juga harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kesalahan dan kerugian materi [8].

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batubara yang memiliki sifat serupa dengan semen dan bentuknya menyerupai abu. Limbah batubara ini ditangkap oleh alat filtrasi partikel sebelum gas buangnya mencapai cerobong asap pembangkit listrik [9]. *Fly ash* memiliki berat jenis yang

rendah, sehingga dapat mengurangi beban berat sendiri ketika digunakan sebagai campuran untuk stabilisasi tanah, seperti pada konstruksi jalan, stabilitas lereng, perkuatan dinding penahan, dan reklamasi tanah [10]. Bahan pozzolan seperti *fly ash* digunakan sebagai pengganti semen untuk mengurangi dampak lingkungan serta meningkatkan kinerja mekanik tanah [11].

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk memperbaiki kondisi tanah lunak dengan menambahkan bahan lain. Hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa pencampuran *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) pada tanah terkontaminasi batubara sebesar 5% meningkatkan kekuatan geser tanah hingga tiga kali lipat [12]. Sementara itu, tanah terkontaminasi dengan 10% dan 15% batubara mengalami peningkatan kekuatan geser masing-masing sebesar tujuh dan lima belas kali lipat dibandingkan dengan tanah asli. Bakteri *Bacillus subtilis* dapat digunakan dalam proses *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) untuk memperbaiki tanah yang terkontaminasi batubara [13]. Setelah perlakuan, nilai kuat geser tanah meningkat lebih dari 200% dibandingkan dengan tanah tanpa perlakuan. Selain itu, pada uji *California Bearing Ratio* (CBR), MICP meningkatkan nilai CBR lebih dari 150% dibandingkan dengan tanah yang tidak mendapatkan perlakuan. Penelitian lain menjelaskan bahwa terjadi peningkatan signifikan terlihat pada kuat tekan bebas (UCS) tanah yang diolah. UCS meningkat seiring dengan penambahan proporsi *fly ash* dan semen serta dengan bertambahnya umur pengeringan. UCS tanah yang tidak diolah adalah 86,88 kPa setelah satu hari pengeringan. Namun, UCS maksimum mencapai 167,75 kPa dengan campuran 20% *fly ash* dan 8% semen, menunjukkan peningkatan sebesar 48,20% dari nilai awal [14].

Penelitian ini menggunakan uji kuat tekan bebas (UCS) untuk menentukan nilai Q_u pada tanah. Pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan pada tanah hingga terpisah dari butirannya. Selain itu, penelitian

ini juga mengevaluasi pengaruh penambahan *fly ash* terhadap proses stabilisasi tanah. Kelebihan dari penelitian ini terletak pada pendekatannya yang lebih komprehensif dalam mengeksplorasi efek *fly ash* terhadap tanah, dengan variasi persentase dan periode pemeraman yang lebih luas, sehingga menghasilkan data yang lebih representatif. Selain itu, penelitian ini memberikan wawasan baru mengenai mekanisme kerja *fly ash* dalam jangka panjang, yang masih jarang dibahas dalam penelitian-penelitian sebelumnya.

2. Metoda Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PLTU di Kota Balikpapan, Kalimantan Timur, Indonesia. Sampel tanah dan *fly ash* diambil dari lokasi yang sama menggunakan metode konvensional dengan cara diskop. Bahan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam kantong sampel dan dibungkus dengan karung. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan langsung di laboratorium Universitas Balikpapan untuk mengidentifikasi perubahan pada tanah setelah dicampur dengan *fly ash*. Seluruh proses penelitian dilakukan di laboratorium Universitas Balikpapan.



Gambar 1. Proses Pengambilan Sampel Tanah

Pengujian meliputi Kadar Air, Analisa saringan, dan untuk Berat Jenis Tanah, Pemadatan Standar Tanah, dan Kuat Tekan Bebas Tanah dengan variasi campuran *fly ash* sebesar 8%, 16%, dan 24%. Untuk uji Kuat Tekan Bebas, setiap variasi campuran diuji pada lima masa peram, yaitu 3 hari, 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari, dengan masing-masing masa peram terdiri dari 3 sampel dan 2 sampel untuk cadangan. Sebagai pembanding, pengujian dilakukan juga pada tanah tanpa campuran *fly ash* dan tanpa masa peram untuk

mengukur Berat Jenis Tanah, Pemadatan Standar Tanah, dan Kuat Tekan Bebas. Pengujian laboratorium dilakukan dengan mengambil sampel tanah dan *fly ash*, kemudian diuji untuk mengetahui karakteristik masing-masing sampel. Pemeriksaan karakteristik sampel bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi sebenarnya dari sampel tersebut. Pengujian laboratorium dilakukan sesuai dengan standar yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Pengujian

No	Jenis Tanah	Jenis Pengujian	Sifat Pengujian	Jumlah Sampel	SNI
1.	Tanah Lempung Organik	Kadar Air	Fisik	3	SNI 1965-2008
		Analisa Saringan		3	SNI 3423-2008
		Berat Jenis		6	SNI 1964-2008
		Pemadatan Standar	Mekanis	5	SNI 1742:2008
		Kuat Tekan Bebas		5	SNI 3638:2012
2.	Tanah Lempung Organik + <i>Fly ash</i>	Berat Jenis + <i>Fly ash</i> 8%	Fisik	6	SNI 1964-2008
		Berat Jenis + <i>Fly ash</i> 16%		6	
		Berat Jenis + <i>Fly ash</i> 24%		6	
		Pemadatan Standar + <i>Fly ash</i> 8%	Mekanis	6	SNI 1742:2008
		Pemadatan Standar + <i>Fly ash</i> 16%		7	
		Pemadatan Standar + <i>Fly ash</i> 24%		7	
		Kuat Tekan Bebas + <i>Fly ash</i> 8%		25	SNI 3638:2012
		Kuat Tekan Bebas + <i>Fly ash</i> 16%		25	
		Kuat Tekan Bebas + <i>Fly ash</i> 24%		25	

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian yang dilakukan yaitu pengaruh penambahan *fly ash* pada stabilisasi tanah. Tanah yang dijadikan benda uji ini berasal dari Balikpapan. Dari data yang telah didapatkan yaitu sifat-sifat tanah yang kami jadikan sampel pada penelitian ini beserta pengaruh yang ditimbulkan dengan pencampuran *fly ash*. Kemudian data tersebut digunakan untuk menganalisis kepadatan tanah optimum dari

tanah asli yang kami gunakan dan juga stabilisasi tanah asli yang dicampur dengan *fly ash*. Adapun persentase campuran *fly ash* yang kami gunakan antara lain 8%, 16%, dan 24%. Setelah pengujian di laboratorium Teknik Sipil, Universitas Balikpapan maka dilakukan pengolahan data untuk memperoleh data karakteristik tanah asli yang dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 2. Jenis Pengujian Sifat Fisik Tanah *Untreated*

Jenis Pengujian		Hasil	Satuan
Sifat Fisik Tanah <i>Untreated</i>			
1.	Kadar Air Tanah	5,835	%
2.	Analisa Saringan		
a.	Lolos 200	65,36	%
3.	Berat Jenis Tanah	2,516	gr/cm ³
Sifat Mekanis Tanah <i>Untreated</i>			
4.	Pemadatan Standar Tanah		
a.	Kepadatan Kering Maksimum (MDD)	1,37	gr/cm ³
b.	Kadar Air Optimum (OMC)	15,4	%
5.	Kuat Tekan Bebas Tanah	1,49	Kg/cm ²
		145,75	kPa

3.1 Sifat fisik dan Mekanis Tanah *Untreated*

Berdasarkan hasil pengujian kadar air tanah asli pada Tabel 4 didapatkan nilai kadar air rata-rata tanah yang berada di sekitar PLTU Balikpapan sebesar 5,835%. Pengujian analisa saringan tanah ini diperoleh tanah yang lolos saring No. 200 dengan nilai rata-rata sebanyak 65,36%. Dari hasil pengujian analisa saringan tanah yang didapatkan, menjelaskan bahwa tanah ini termasuk kategori Tanah berbutir halus (*Fine-grained Soil*), yaitu tanah yang lolos saringan No. 200 yang jumlahnya lebih dari setengah berat total sampel tanah itu sendiri atau $> 50\%$ sampel dari tanah tersebut, hal ini merujuk pada *United Soil Classification System* (USCS). Berdasarkan data di atas didapatkan angka Berat Jenis rata-rata 2,516 sehingga tanah ini berada di antara kategori tanah lempung organik dan gambut tapi lebih dominan mendekati kategori tanah lempung organik yang berada di angka 2,58-5,65 berdasarkan Tabel 1. Nilai pada hasil pengujian Berat Jenis tanah *untreated* ini akan di jadikan nilai awal untuk membandingkan hasil Berat Jenis tanah dengan campuran variasi persentase *Fly ash* 8%, 16% dan 24%. Pada uji pemadatan

standar didapatkan nilai pada Kepadatan Kering Maksimal (MDD) tanah *untreated* sebesar $1,37 \text{ gr/cm}^3$ dan Kadar Air Optimum (OMC) Sebesar 15,4 %. Nilai pada hasil pengujian pemadatan standar tanah *untreated* ini akan di jadikan nilai awal untuk membandingkan hasil tanah dengan campuran variasi persentase *Fly ash* 8%, 16% dan 24%.

Dan untuk uji kuat tekan bebas (UCT) didapatkan nilai sebesar $1,49 \text{ kg/cm}^2$ atau 145,75 kPa. Nilai pada hasil pengujian pemadatan standar dan kuat tekan bebas tanah *untreated* ini akan di jadikan nilai awal untuk membandingkan hasil tanah dengan campuran variasi persentase *Fly ash* 8%, 16% dan 24%.

3.2 Sifat fisik dan Mekanis Tanah Campuran *Fly Ash*

Hasil pengujian sifat fisik dan mekanis tanah campuran *fly ash* terdiri dari uji berat jenis, pemadatan standar tanah dan kuat tekan bebas.

Berat Jenis Tanah + *Fly Ash*

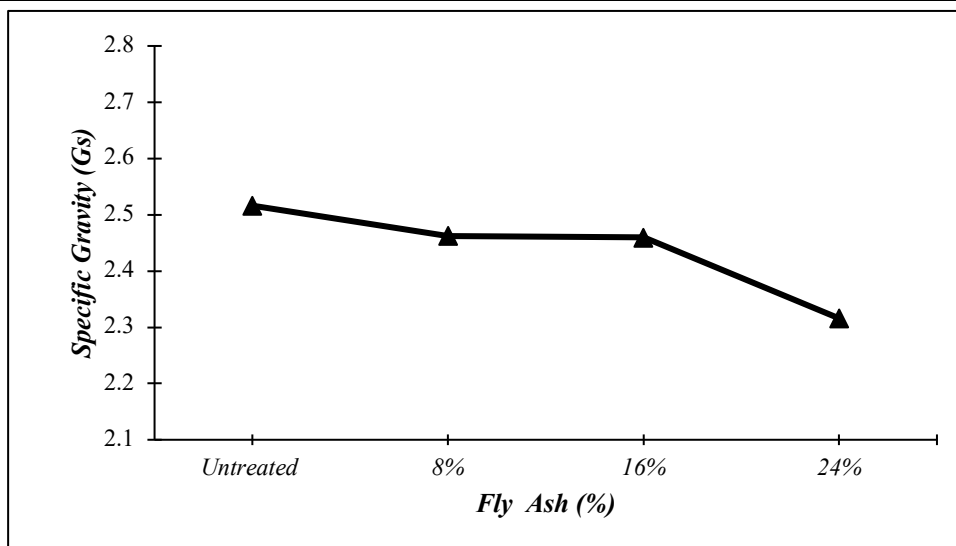
Hasil pengujian berat jenis + *fly ash* dengan variasi 8%, 16%, dan 24% yang dapat di sajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Kombinasi Pengujian Berat Jenis Tanah + Variasi *Fly ash*

No.	Jenis Pengujian	Hasil (Gs)	Berat Jenis Tanah <i>Untreated</i>	Persentase Penurunan Berat Jenis Tanah + <i>Fly ash</i> Terhadap Berat Jenis Tanah <i>Untreated</i> (%)
1.	Berat Jenis Tanah + <i>Fly ash</i> 8%	2,462	2,516	2,19 %
2.	Berat Jenis Tanah + <i>Fly ash</i> 16%	2,459	2,516	2,30 %
3.	Berat Jenis Tanah + <i>Fly ash</i> 24%	2,316	2,516	8,65 %

Grafik dari hasil pengujian Berat jenis tanah *Untreated* , Berat jenis tanah + *Fly ash* 8%, Berat jenis tanah + *Fly*

ash 16%, dan Berat jenis tanah + *Fly ash* 24%, dapat disajikan pada Gambar 2.

Gambar 2. Grafik hubungan Berat Jenis Tanah & Variasi *Fly ash*

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 2 dapat diketahui bahwa semakin bertambahnya variasi persentase *Fly ash* pada tanah dapat menurunkan nilai berat jenis tanah. Nilai berat jenis tanah *Untreated* sebesar 2,516, nilai ini dijadikan nilai awal sehingga dapat menghitung persentase penurunan setiap bertambahnya *Fly ash* yang ditentukan. Berat jenis tanah + *Fly ash* 8% sebesar 2,462, nilai pada berat jenis tanah + *Fly ash* 8% ini mengalami penurunan sebanyak 2,19 %. Berat jenis tanah + *Fly ash* 16% sebesar 2,459, nilai pada berat jenis tanah + *Fly ash* 16% ini mengalami penurunan sebanyak 2,30 %. Berat jenis tanah + *Fly ash* 24% sebesar 2,316, nilai pada berat jenis tanah + *Fly ash* 24% ini mengalami penurunan sebanyak 8,65 %. Berdasarkan penjelasan tadi dapat

disimpulkan bahwa persentase penurunan yang paling tinggi yaitu antara Berat jenis tanah *Untreated* dan Berat jenis tanah + *Fly ash* 24%.

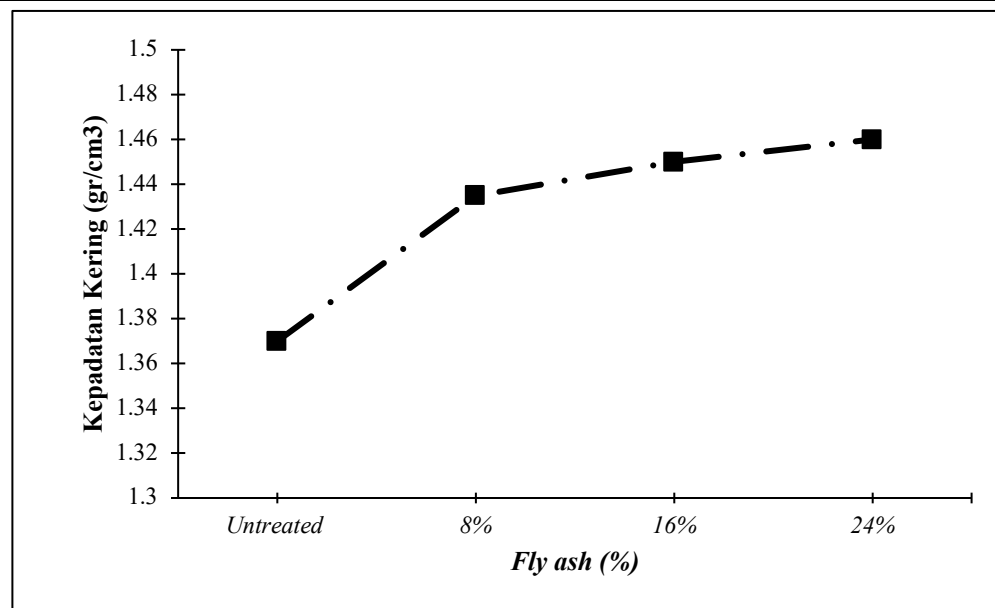
Hal ini sejalan dengan hasil penelitian [15], bahwa proses terbentuknya *Fly ash* berasal dari proses pembakaran batubara, yang tersisa adalah partikel-partikel mineral yang lebih ringan, seperti silika, alumina, dan oksida logam lainnya. Karena proses ini, abu terbang cenderung memiliki partikel yang lebih porous sehingga menyebabkan penurunan pada nilai berat jenis tanah yang memiliki kandungan *Fly ash*.

Pemadatan Standar + *Fly Ash*

Pada pengujian pemadatan standar pada tanah + *fly ash* dengan variasi 8%, 16%, dan 24%.

Tabel 4. Peningkatan Kepadatan Kering (MDD) tanah dan variasi *Fly ash*

No.	Persentase <i>Fly ash</i> (%)	Kepadatan Kering / MDD (gr/cm ³)	Kepadatan Kering / MDD Tanah <i>Untreated</i> (gr/cm ³)	Peningkatan Kepadatan Kering Tanah + <i>Fly ash</i> Terhadap Tanah <i>Untreated</i> (%)
1.	8%	1,435	1,37	4,74 %
2.	16%	1,45	1,37	5,84 %
3.	24%	1,46	1,37	6,56 %

Gambar 3. Peningkatan Kepadatan Kering (MDD) tanah dan variasi *Fly ash*

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 3 dapat diketahui bahwa semakin bertambahnya variasi persentase *Fly ash* pada tanah dapat meningkatkan nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) pada tanah. Nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) tanah *Untreated* sebesar 1,37 gr/cm³, nilai ini dijadikan nilai awal sehingga dapat menghitung persentase kenaikan setiap bertambahnya *Fly ash* yang ditentukan. Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 8% mendapatkan nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebesar 1,435 gr/cm³, nilai pada Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 8% ini mengalami peningkatan pada nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebanyak 4,74% dari nilai awal. Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 16% mendapatkan nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebesar 1,45 gr/cm³, nilai pada Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 16% ini mengalami peningkatan pada nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebanyak 5,84% dari nilai

awal. Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 24% mendapatkan nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebesar 1,46 gr/cm³, nilai pada Pemadatan Standar Tanah + *Fly ash* 24% ini mengalami peningkatan pada nilai Kepadatan Kering Maksimum (MDD) sebanyak 6,56% dari nilai awal. Berdasarkan penjelasan tadi dapat disimpulkan bahwa persentase peningkatan yang paling tinggi yaitu antara pemadatan standar tanah *Untreated* dan pemadatan standar tanah + *Fly ash* 24%.

Hal ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa dengan ditambahkan *Fly ash* pada tanah menghasilkan ikatan antar partikel tanah menjadi lebih kuat, meningkatkan kepadatan dan kekuatan tanah secara keseluruhan. [16].

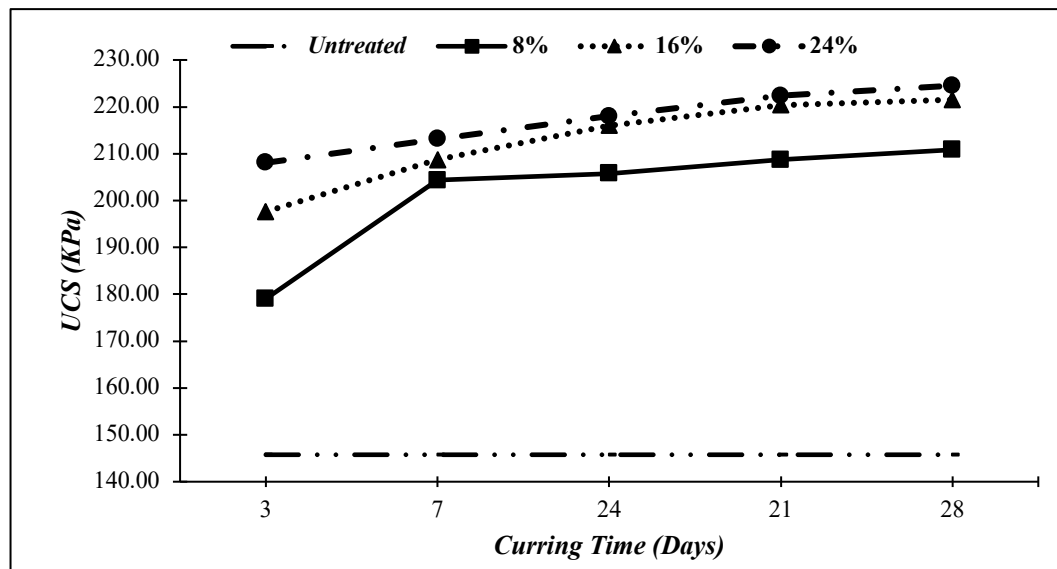
Kuat Tekan Bebas (UCT) tanah + *Fly ash*

Hasil pengujian kuat tekan bebas + *fly ash* dengan variasi 8%, 16%, dan 24% dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Kombinasi Kenaikan UCS terhadap Tanah *Untreated* dengan variasi *Fly ash*

No.	Persentase <i>Fly ash</i>	Tegangan (Qu) / UCS		Masa Peram	Kenaikan UCS Terhadap Tanah <i>Untreated</i>
	(%)	(Kg/cm2)	(KPa)		(%)
1.	0%	1,49	145,75	-	0,0 %
2.	8%	1,83	179,04	3	22,84 %
		2,08	204,34	7	40,19 %

No.	Persentase <i>Fly ash</i>	Tegangan (Qu) / UCS		Masa Peram	Kenaikan UCS Terhadap Tanah <i>Untreated</i>
	(%)	(Kg/cm ²)	(KPa)	(Hari)	(%)
3.	16%	2,10	205,77	14	41,18%
		2,13	208,73	21	43,21 %
		2,15	210,84	28	44,65 %
		2,02	197,62	3	35,59 %
		2,13	208,67	7	43,17%
		2,20	216,00	14	48,19%
		2,25	220,38	21	51,20 %
		2,26	221,52	28	51,98 %
		2,12	208,06	3	42,75 %
4.	24%	2,17	213,12	7	46,22%
		2,22	217,97	14	49,55%
		2,27	222,36	21	52,56 %
		2,29	224,51	28	54,04 %



Gambar 4. Grafik Kombinasi Kenaikan UCS terhadap Tanah Untreated dengan variasi *Fly ash*

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 4 dapat disimpulkan bahwa penambahan *fly ash* dapat meningkatkan nilai kepadatan, hal ini searah dengan nilai Qu yang didapatkan semakin meningkat dikarenakan adanya kombinasi sifat *pozzolanik* dan ukuran butiran halus *fly ash* menyebabkan campuran tanah dan *fly ash* memiliki sifat-sifat yang memungkinkan untuk mencapai kepadatan maksimum yang lebih tinggi dengan kadar air yang lebih rendah.

Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa yang menjelaskan bahwa peningkatan kuat tekan tanah yang disebabkan oleh reaksi mineral abu

terbang yang mengikat partikel kalium hidroksida dari tanah liat adalah sebuah fenomena yang terjadi dalam proses pengerasan tanah menggunakan abu terbang [17]. Kalium hidroksida (KOH) merupakan salah satu senyawa yang dapat ditemukan dalam tanah liat, dan ketika abu terbang dicampur dengan tanah tersebut, terjadi reaksi kimia antara abu terbang dan KOH. Reaksi ini menghasilkan pembentukan produk yang memiliki kemampuan mengikat partikel tanah, yang pada gilirannya meningkatkan kuat tekan tanah. Hal ini berarti bahwa campuran abu terbang dengan

tanah liat dapat menghasilkan campuran tanah yang lebih padat dan kuat secara mekanis.

4. Kesimpulan

Pengujian kuat tekan bebas (UCS) dengan penambahan *fly ash* bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan kekuatan tanah setelah proses stabilisasi, di mana metode yang digunakan melibatkan pencampuran tanah dengan *fly ash* dalam proporsi 8%, 16%, dan 24%, kemudian diperam selama 3, 7, 14, 21, dan 28 hari untuk mengamati pengaruh waktu pemeraman terhadap kekuatan tanah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada campuran tanah dengan *fly ash* 24%, nilai Q_u mencapai 2,29 Kg/cm² atau 224,51 kPa, yang merupakan peningkatan sebesar 54,04% dibandingkan dengan tanah *untreated*. Temuan ini memperdalam pemahaman mengenai efektivitas penggunaan bahan limbah seperti *fly ash* untuk meningkatkan stabilitas tanah, yang berpotensi diterapkan dalam proyek konstruksi berkelanjutan. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah tidak hanya efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah, tetapi juga mendukung praktik konstruksi yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah industri secara produktif.

5. Saran

Pada penelitian selanjutnya variasi untuk campuran *fly ash* dapat dikembangkan lagi dan untuk pengujiannya bisa dikembangkan dengan uji kuat geser dan lain sebagainya.

6. Daftar Pustaka

- [1] Y. Febrian Onggara, D. Tjandra, And J. I. Suwono, "Analisa Stabilisasi Tanah Lunak Dengan Campuran Portland Cement Dan Fly Ash Untuk Diaplikasikan Pada Bangunan Rumah Tinggal 2 Lantai," *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, Vol. 11, No. 2, 2022, Accessed: Jul. 11, 2024. [Online]. Available: <https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/12934>
- [2] Leliana A, "Pengaruh Penambahan Fly Ash Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas Pada Tanah Lempung Ekspansif Di Daerah Magetan Jawa Timur," *Rekayasa Teknik Sipil*, Vol. 1, No. 15, Pp. 1–8, 2015, Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: 10064-Article Text-13171-1-10-20141202
- [3] M. Purba, "Tudi Pengaruh Campuran Abu Terbang (Fly Ash) Sisa Pembakaran Batubara Terhadap Sudut Geser Dalam Tanah Nonplastis," *Polimedia*, Vol. 23, No. 2, May 2020, Accessed: Jul. 11, 2024. [Online]. Available: <https://ojs.polmed.ac.id/index.php/polimedia/article/view/17>
- [4] R. Indera, E. Mina, And T. Rahman, "Stabilisasi Tanah Dengan Menggunakan Fly Ash Dan Pengaruhnya Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (Studi Kasus Jalan Raya Bojonegara, Kab. Serang)," *Jurnal Fondasi*, Vol. 5, 2016, Accessed: Aug. 02, 2024. [Online]. Available: <https://eprints.untirta.ac.id/16479/2/36%201251-2720-1-Pb.Pdf>
- [5] F. A. Silaban And Roesyanto, "Kajian Efektifitas Semen Dan Fly Ash Dalam Stabilitas Tanah Lempung Dengan Uji Triaxial Cu Dan Aplikasi Pada Stabilisasi Lereng," *Garuda Kemdikbud*, 2023, Accessed: Jul. 11, 2024.
- [6] A. M. Indriani, T. Harianto, A. R. Djamaluddin, And A. Arsyad, "Bioremediation Of Coal Contaminated Soil As The Road Foundations Layer," *International Journal Of Geomate*, Vol. 21, No. 84, Pp. 76–84, Aug. 2021, Doi: 10.21660/2021.84.J2124.
- [7] Aniek Prihatiningsih And Stanislaus, "Studi Perbandingan Pencampuran 4 Jenis Limbah Yang Sulit Didaur Ulang Terhadap Peningkatan Properti Tanah," *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, Vol. 2, No. 3, Pp. 117–123, Aug. 2019, Accessed: Aug. 01, 2024. [Online]. Available: <https://journal.untar.ac.id/index.php/jmts/article/view/5815>
- [8] A. M. Indriani And G. Utomo, "Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (Micp) Terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara," *Cived*, Vol. 10, No. 1, P. 53, Mar. 2023, Doi: 10.24036/Cived.V10i1.122318.
- [9] M. Yusar And I. Indrastuti, "Effect Of Use Fly Ash On Soil Stability In Batam Meisterstadt Project," *Journal Of Civil Engineering And Planning*, Vol. 3, No. 2, Pp. 161–168, Dec. 2022, Doi: 10.37253/Jcep.V3i2.730.

- [10] R. Aziz, M. Muhandi, And A. Ika Putra, "Perbaikan Tanah Lempung Dengan Metode Kolom Konfigurasi Segitiga Dari Campuran Fly Ash Dan Bottom Ash," *Sainstek (E-Journal)*, Vol. 10, No. 1, Pp. 39–50, Jun. 2022, Doi: 10.35583/Js.V10i1.7.
- [11] M. Muntaha, R. H. A. Fitrie, F. Wahyuni, And Y. Tajunnisa, "The Use Of Alkaline Activators With High Calcium Fly Ash As Soft Clay Stabilization Materials," *International Journal Of Geomate*, Vol. 25, No. 109, Pp. 9–17, 2023, Doi: 10.21660/2023.109.3286.
- [12] A. Marini, T. Harianto, D. A. R. Djamaluddin, And A. Arsyad, "Studi Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara," *Konferensi Nasional Teknik Sipil 13*, Sep. 2019, Accessed: Jul. 18, 2024. [Online].
- [13] A. M. Indriani, T. Harianto, A. R. Djamaluddin, And A. Arsyad, "Study On Bio-Cementation Of Ex-Coal Mining Soil As A Road Construction Material," *International Symposium On Construction Resources For Environmentally Sustainable Technologies*, Vol. 9, No. 11, Pp. 193–201, Mar. 2021, Doi: 10.1680/Bcmpge.60531.010.
- [14] P. Rai *Et Al.*, "Effect Of Fly Ash And Cement On The Engineering Characteristic Of Stabilized Subgrade Soil: An Experimental Study," *Geofluids*, Vol. 2021, 2021, Doi: 10.1155/2021/1368194.
- [15] P. Rai *Et Al.*, "Effect Of Fly Ash And Cement On The Engineering Characteristic Of Stabilized Subgrade Soil: An Experimental Study," *Geofluids*, Vol. 2021, 2021, Doi: 10.1155/2021/1368194.
- [16] E. E. Hange, R. A. Bella, And M. C. Ullu, "Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif," Apr. 2021. Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://sipil.ejournal.web.id/index.php/jts/article/view/397/355>
- [17] C. Turan, A. A. Javadi, And R. Vinai, "Effects Of Class C And Class F Fly Ash On Mechanical And Microstructural Behavior Of Clay Soil—A Comparative Study," *Materials*, Vol. 15, No. 5, Mar. 2022, Doi: 10.3390/Ma15051845.