

Pengaruh Stabilisasi Tanah Lunak Menggunakan Geopolimer Terhadap Nilai CBR Laboratorium

Querida Addisty Prasetyo⁽¹⁾, Yerry Kahaditu Firmansyah⁽²⁾, Himatul Farichah⁽³⁾

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, UPN Veteran Jawa Timur
Jl. Rungkut Madya No.1, Gunung Anyar, Kecamatan Gunung Anyar, Kota Surabaya,
Jawa Timur 60294, Indonesia

Email: ¹disty.prasetyo212@gmail.com, ²yerry.kaha@gmail.com,
³himatul_farichah.ts@upnjatim.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 28 Agustus 2024
Direvisi 03 September 2024
Disetujui 05 September 2024
Dipublikasikan 20 Agustus 2025

Keywords:

*California Bearing Ratio (CBR);
Clay soil; Fly ash; Soil
Stabilization*

Kata Kunci:

*California Bearing Ratio (CBR);
Tanah liat; Abu terbang;
Stabilisasi Tanah*

Corresponding Author:

Name:
Querida Addisty Prasetyo
Email:
disty.prasetyo212@gmail.com

Abstract: Clay soil is a type of cohesive soil with low bearing strength, so it requires improvement through a stabilization process. The aim of this research is to identify changes in the physical and mechanical properties of soil with the addition of geopolimer composed of fly ash and alkali activator. The case study in this research is the Lamongan STA 1+270 northern ring road project. The geopolimer variation used consists of fly ash with percentages of 10%, 15% and 20%, with alkali activator sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) 8M with a ratio of 1:1. The test method applied in this research involves testing physical and mechanical properties, including measuring water content, specific gravity, Atterberg limit, plasticity index, and California bearing ratio (CBR) in the laboratory. This research shows that the addition of 15% fly ash and alkali activator provides the most optimal CBR value of 8.23%, an increase from the original soil CBR value of 5.87%. This CBR value indicates that the addition of geopolimer to soft soil can improve the characteristics of the soil. This research concludes that the use of geopolimer can improve the quality of clay soil.

Abstrak: Tanah dengan karakteristik kohesif dan kekuatan dukung yang rendah ialah tanah lempung. Sehingga memerlukan perbaikan melalui proses stabilisasi. Tujuan penelitian ini untuk mengidentifikasi perubahan sifat fisis dan mekanis tanah dengan penambahan geopolimer yang tersusun oleh fly ash dan alkali activator. Studi kasus pada penelitian ini yaitu berada pada proyek jalan lingkaran utara Lamongan STA 1+270. Variasi geopolimer yang digunakan terdiri dari fly ash dengan persentase 10%, 15%, dan 20%, dengan alkali activator sodium silikat (Na_2SiO_3) dan sodium hidroksida (NaOH) 8M dengan rasio 1:1. Metode pengujian yang diterapkan dalam penelitian ini melibatkan pengujian sifat fisik dan mekanik, meliputi pengukuran kadar air, berat jenis, batas atterberg, indeks plastisitas, dan california bearing ratio (CBR) di laboratorium. Penelitian ini menunjukkan

bahwa penambahan fly ash 15% dan alkali activator memberikan nilai CBR paling optimal sebesar 8,23%, meningkat dari nilai CBR tanah asli sebesar 5,87%. Dengan nilai CBR ini, menandakan bahwa adanya penambahan geopolimer pada tanah lunak dapat memperbaiki karakteristik pada tanah tersebut. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan geopolimer dapat meningkatkan kualitas tanah lempung.

PENDAHULUAN

Perkembangan jumlah populasi di Indonesia sejalan dengan peningkatan transportasi yang tersedia. Kondisi ini menyebabkan bertambahnya titik-titik kemacetan, yang mendorong pemerintah untuk melaksanakan pembangunan dan perbaikan infrastruktur serta fasilitas transportasi, terutama jalan raya (Wibisono et al., 2022). Wilayah perkotaan Lamongan, khususnya di ruas Jl. Jaksa Agung Suprpto dan Jl. Panglima Sudirman, sering mengalami kemacetan panjang akibat tingginya volume lalu lintas. Kedua jalan ini merupakan bagian dari jalur logistik nasional yang didominasi oleh angkutan berat (Akmizal & Prasetyo, 2022). Kondisi ini menjadi alasan dibangunnya jalan lingkaran utara Lamongan (JLU) untuk mengurai kemacetan dan mengurangi volume lalu lintas, serta mempercepat waktu tempuh. JLU dibangun sepanjang 7,150 kilometer dan pemilihan trase jalan tersebut ditinjau berdasarkan beberapa faktor, antara lain kondisi topografi, tata guna lahan, kondisi tanah, dan hidrologi.

Hasil analisis pengujian tanah pada STA 1+270 menunjukkan nilai indeks plastisitas 25,29%, kadar air 54,27%, batas plastis 53,70%, dan batas susut 49,63%. Tanah dengan indeks plastisitas lebih dari 17% dikategorikan sebagai tanah lempung dengan plastisitas tinggi dan sifat kohesif (Hangge et al., 2022). Tanah lempung ini memiliki karakteristik seperti kelunakan, kadar air tinggi, rendahnya daya dukung, serta kecenderungan untuk menyusut dan mengembang (Daulay et al., 2022). Dengan demikian, penanganan khusus diperlukan untuk memperbaiki tanah *subgrade* sebelum melanjutkan pekerjaan konstruksi di atasnya.

Tanah lempung terdiri dari kumpulan partikel mikroskopis yang terbentuk akibat pelapukan kimia batuan (Walewangko et al., 2020). Lempung jika terkena air, menjadi lengket dan sangat lunak, serta mengalami pengembangan yang disertai peningkatan tekanan air pori (Zulnasari et al., 2021). Jika tanah tidak memenuhi persyaratan daya dukung, seperti tanah lunak dengan indeks konsistensi tinggi, permeabilitas berlebihan, atau sifat lain yang tidak diinginkan, maka diperlukan stabilisasi untuk meningkatkan kualitasnya. Salah satu metode perbaikan tanah lempung ialah dengan mencampurkan tanah lempung dengan bahan lain untuk memperoleh kualitas yang diinginkan sehingga karakteristik tanah menjadi lebih baik (Bhakti & Wulandari, 2023).

Salah satu metode stabilisasi adalah penggunaan geopolimer (Erwin et al., 2019), yang merupakan hasil dari proses polimerisasi bahan-bahan anorganik (Desimaliana et al., 2024). Geopolimer memanfaatkan aktivasi basa dari limbah industri untuk menghasilkan produk semen dalam tanah yang diolah, sehingga meningkatkan karakteristik tanah (Abdullah et al., 2020). Semen, kapur, dan fly ash adalah stabilisator yang paling umum digunakan, dengan fly ash menjadi pilihan yang lebih ekonomis karena merupakan produk sampingan dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara (Zimar et al., 2022). Namun, penggunaan semen berdampak buruk terhadap lingkungan, terutama karena emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan selama proses produksinya (Wardhono, 2019).

Bahan dasar pembuatan geopolimer ialah bahan yang banyak mengandung silikon (Si) dan aluminium (Al), seperti *fly ash*. Penggabungan aluminium dan silikon dengan aktivator alkali, serta proses pengerasan gel, menghasilkan produk geopolimer yang mengalami pengerasan (Odeh & Al-Rkaby, 2022). Selama polimerisasi, molekul kecil seperti air dilepaskan, terutama dalam pembuatan pasta dan mortar geopolimer. Selain itu, pembuatan geopolimer juga menggunakan NaOH dan Na_2SiO_3 sebagai alkali aktivator (Solikin, 2021). *Fly ash* sebagai bahan yang memiliki senyawa silika dan alumina dan bereaksi dengan alkali aktivator untuk membentuk binder polimer, yang memperkuat struktur tanah. Penggunaan *fly ash* dalam geopolimer juga berkontribusi dalam mengurangi emisi CO_2 dan membantu mitigasi pemanasan global (Rini et al., 2022).

Penelitian menunjukkan bahwa penambahan geopolimer berbasis *fly ash* dapat mempengaruhi nilai CBR tanah. Misalnya, penelitian oleh Hendry, Rahmawati, R., & Andriani, S. menunjukkan bahwa kandungan *fly ash* meningkatkan indeks plastisitas, yang secara tidak langsung meningkatkan nilai CBR (Hendry et al., 2021). Geopolimer sebagai pengikat polimer anorganik buatan, digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi, terutama dalam memperkuat

tanah lunak untuk lapis *subgrade*. Cairan alkali, seperti NaOH dan Na₂SiO₃, dapat mereaksikan Si dan Al untuk menghasilkan binder polimer (Adi et al., 2021).

Nilai CBR diperuntukkan untuk potensi kekuatan material tanah dasar, fondasi bawah, fondasi, serta material daur ulang yang digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan dan landasan terbang (Waruwu et al., 2022). Kemudian material tanah dasar dapat diklasifikasikan sesuai dengan nilai CBR (%) yang diperoleh kedalam tabel kriteria nilai CBR untuk tanah dasar. Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini melakukan perbaikan tanah lempung dengan menggunakan geopolimer yang tersusun dari campuran *fly ash* dan aktivator alkali berupa Na₂SiO₃ dan NaOH 8M dengan rasio 1:1. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi geopolimer terhadap nilai CBR laboratorium, dan menentukan nilai CBR optimum yang layak digunakan sebagai perkerasan jalan raya.

METODE

Penelitian ini menggunakan pengujian karakteristik tanah dalam menganalisis tanah lunak untuk dapat mengetahui klasifikasi tanah yang diujikan. Langkah – langkah pengujian yang dilakukan yaitu:

1. Pengambilan Sampel tanah
Pengambilan sampel tanah berada di Desa Deket Kulon, Kecamatan Deket, Lamongan, Jawa Timur pada proyek Jalan Lingkar Utara Lamongan STA 1+270 berupa jenis tanah lempung.
2. Prosedur Penelitian
Prosedur penelitian ini terdiri dari :
 - a. Pengujian sifat fisis dan mekanis tanah asli
Pengujian sifat fisis tanah meliputi kadar air, berat jenis, *atterberg limit*, dan analisa saringan. Selain itu, untuk pengujian sifat mekanis tanah meliputi standar proctor, berat volume, dan CBR laboratorium.
 - b. Pembuatan geopolimer
 - c. Untuk pembuatan benda uji geopolimer, dilakukan desain campuran untuk material yang digunakan, yaitu *fly ash* tipe C dan pencampur (Na₂SiO₃ dan NaOH). Dalam proses pembuatan geopolimer ini, digunakan molaritas NaOH sebesar 8M dengan rasio perbandingan Na₂SiO₃ terhadap NaOH adalah 1:1.
 - d. Penetapan komposisi alkali aktivator
Pada penelitian ini alkali aktivator yang digunakan yaitu sodium silikat (Na₂SiO₃) dan sodium hidroksida (NaOH). Molaritas NaOH yang digunakan sebesar 8M. Selain itu adapun penentuan jumlah Na₂SiO₃ pada setiap benda uji, ditentukan dari rasio yang digunakan. Pada penelitian ini, menggunakan perbandingan 1:1.
 - e. Penetapan komposisi *fly ash*
Penelitian ini menggunakan *fly ash* tipe C sebagai bahan dasar pembuatan geopolimer. Banyaknya kadar *fly ash* yang digunakan berdasarkan pengujian yang dilakukan dan variasi digunakan.
3. Pembuatan Benda Uji
Sampel tanah yang digunakan lolos saringan no. 200 dan dicampur dengan variasi kadar *fly ash* 0%, 10%, 15%, dan 20% dari berat kering tanah dan alkali aktivator rasio 1:1. Tanah dengan campuran geopolimer ini dilakukan pengujian sifat fisis dan mekanis untuk menentukan karakteristik dan peninjauan mengenai pengaruh geopolimer.
4. Analisa dan Kesimpulan
Hasil penelitian dengan menganalisa sifat fisis dan mekanis tanah lempung dengan campuran bahan stabilisasi berupa geopolimer berdasarkan hasil uji laboratorium.

Metode yang digunakan yaitu eksperimental yang dilakukan di laboratotium mekanika tanah yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio *fly ash* dan alkali activator. *Fly ash* tipe C menggunakan variasi 10%, 15%, dan 20%. Variasi *fly ash* 10% digunakan untuk sampel variasi 1, variasi *fly ash* 15% digunakan untuk sampel variasi 2, dan variasi *fly ash* 20% digunakan untuk sampel variasi 3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Sebelum Adanya Penambahan Bahan Stabilisator

Berdasarkan pengamatan secara visual, sampel tanah asli yang berasal dari area tambak menunjukkan karakteristik khas yaitu memiliki warna abu kehitaman. Tanah tersebut bertekstur padat, membuatnya tidak mudah untuk ditekan ketika dalam keadaan kering. Namun, ketika tercampur dengan air, tekstur tanah berubah menjadi licin dan mudah dibentuk.

Pengamatan visual tersebut kemudian diperkuat dengan hasil uji laboratorium melalui analisa saringan dan batas *atterberg*. Berdasarkan klasifikasi AASHTO, tanah asli digolongkan pada kategori A-7-6 dikarenakan tanah memiliki indeks plastisitas (PI) yang lebih rendah dari batas cairnya (LL). Kondisi ini dapat mempengaruhi stabilitas tanah saat digunakan sebagai material konstruksi, terutama dalam kondisi basah atau lembap.

Selanjutnya, menurut klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*), tanah ini termasuk pada kategori OH. Hal ini disebabkan oleh nilai batas cair yang melebihi 50%. Selain itu, lebih dari 50% tanah tersebut lolos dari ayakan saringan no. 200. Hasil pengujian fisis dan mekanis tanah asli sebelum adanya campuran bahan stabilisator ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil pengujian fisis dan mekanis sebelum adanya penambahan

No.	Uraian	Satuan	Tanah Asli
Uji Fisis Tanah :			
1	Kadar Air (Wc)	%	51,75
2	Berat volume tanah basah (γ)	gr/cm ³	1,59
3	Berat Jenis (Gs)		2,7
4	Batas <i>Atterberg</i> :		
	<i>Liquid Limit</i> (LL)	%	78,74
	<i>Shrinkage Limit</i> (SL)	%	44,42
	<i>Plastis Limit</i> (PL)	%	57,27
	<i>Indeks Plastis</i> (IP)	%	21,48
5	Analisa Saringan :		
	Lolos No. 16	%	100
	Lolos No.40	%	99,2
	Lolos No. 200	%	91,62

Tabel 2. Hasil pengujian fisis dan mekanis sebelum adanya penambahan (lanjutan)

No.	Uraian	Satuan	Tanah Asli
Uji Mekanis Tanah :			
6	Standar <i>Proctor</i> :		
	Berat Volume Kering Maksimum ($\gamma_{d_{maks}}$)	gr/cm ³	1,208
	Kadar Air Optimum (w_{opt})	%	30,62
7	<i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	%	5,87

Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Sesudah Adanya Penambahan Bahan Stabilisator

Pengujian terhadap tanah asli dengan tambahan bahan stabilisator dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan pada sifat fisik dan mekanik sampel tanah akibat penambahan stabilisator dalam beberapa kadar. Rekapitulasi hasil pengujian fisis dan mekanis sesudah adanya penambahan bahan stabilisator disajikan pada Tabel 3 berikut.

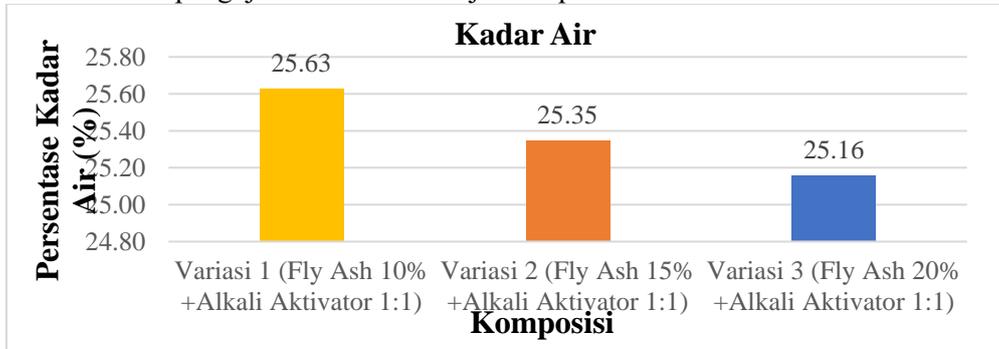
Tabel 3. Hasil pengujian sifat fisis dan mekanis sesudah adanya penambahan

No.	Uraian	Satuan	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Uji Fisis Tanah:					
1	Kadar Air (Wc)	%	25,63	25,35	25,16
2	Berat Jenis (Gs)		1,38	1,17	1,14
3	Batas <i>Atterberg</i> :				
	– <i>Liquid Limit</i> (LL)	%	75,09	73,87	72,24
	– <i>Shrinkage Limit</i> (SL)	%	67,07	67,48	67,58
	– <i>Plastis Limit</i> (PL)	%	53,26	53,16	51,66

No.	Uraian	Satuan	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
-	Indeks Plastis (IP)	%	21,82	20,71	20,58
Uji Mekanis Tanah:					
4	California Bearing Ratio	%	5,01	8,23	3,94

1. Pengujian Kadar Air

Pengujian kadar air sampel variasi 1, variasi 2, dan variasi 3 dilakukan dengan cara mengambil sampel pada pengujian CBR. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat kering yang diperoleh setelah pengeringan di oven (Andreas & Gusmaretta, 2019). Dalam pengujian ini dilakukan menggunakan metode pengeringan dengan oven. Hasil pengujian kadar air ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.

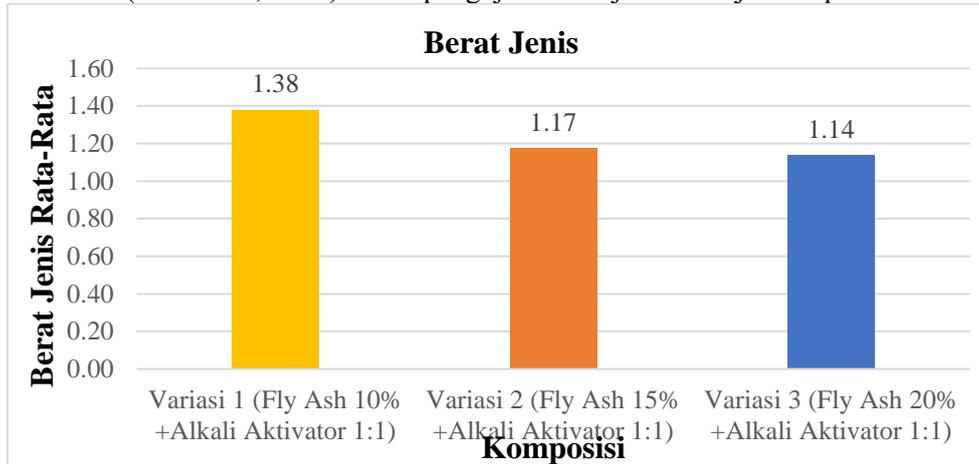


Gambar 1. Diagram hasil pengujian kadar air

Berdasarkan Gambar 1 dapat diketahui bahwa sampel variasi 1 memiliki kadar air tertinggi, yaitu 25,63%, dibandingkan dengan variasi sampel lainnya. Sampel variasi 2 memiliki kadar air sebesar 25,35% dan variasi 3 memiliki kadar air 25,16%. Penurunan kadar air ini menunjukkan bahwa *fly ash* dapat mengurangi kadar air yang mempengaruhi stabilitas tanah dalam konstruksi.

2. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis bertujuan untuk menentukan perbandingan antara berat butiran tanah dan berat air destilasi dalam udara dengan volume yang sama pada suhu tertentu, umumnya pada suhu 30°C (Aziz et al., 2022). Hasil pengujian berat jenis ditunjukkan pada Gambar 2.

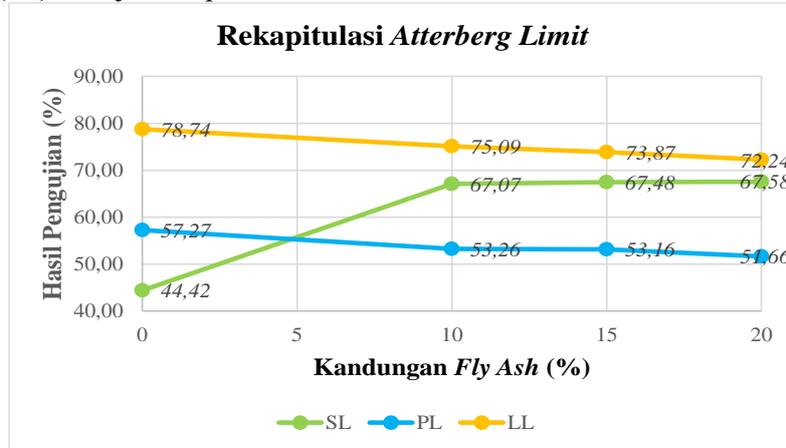


Gambar 2. Diagram hasil pengujian berat jenis

Berdasarkan gambar diatas, dapat diketahui bahwa benda uji pada variasi 1 memiliki berat jenis tertinggi yaitu sebesar 1.38. Tanah dengan berat jenis 1.38 termasuk dalam kategori gambut (Putra et al., 2023). Penambahan *fly ash* pada variasi tanah menunjukkan penurunan yang signifikan dalam hasil berat jenis. Sampel variasi 1 memiliki berat jenis 1,38, diikuti oleh sampel variasi 2 yang memiliki berat jenis 1,17, dan variasi 3 yang memiliki berat jenis 1,14.

3. Pengujian Batas Atterberg

Pengujian batas atterberg diperuntukkan untuk menentukan klasifikasi tanah tersebut. Batas atterberg memiliki tiga pengujian yang meliputi batas cair, batas plastis, dan batas susut (Darmawandi et al., 2020). Ketiganya memberi gambaran mengenai sifat plastisitas dan perilaku tanah berdasarkan nilai kadar air pada pengujian tersebut. Dimana kadar air merupakan faktor penting dalam menentukan keefektifan proses stabilisasi tanah (Aryanto et al., 2021). Hasil dari pengujian batas cair (LL), batas plastis (PL), dan batas susut (SL) ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



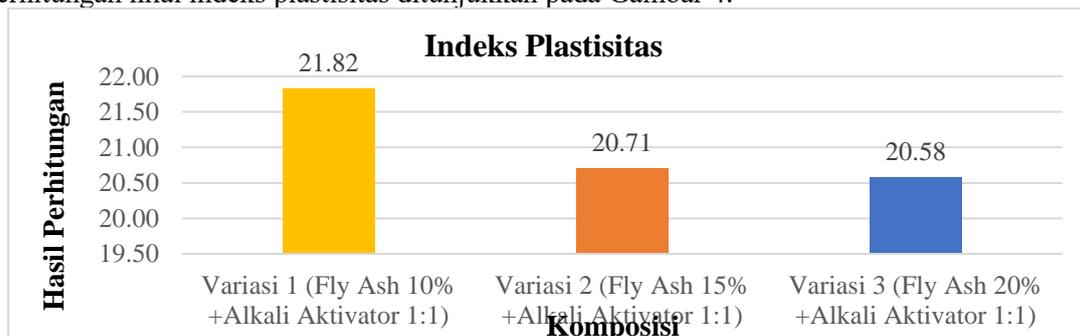
Gambar 3. Hasil pengujian batas atterberg

Berdasarkan gambar 3 didapatkan bahwa hasil batas cair dengan kadar *fly ash* 0% sebesar 78,74%, lalu ketika kadar *fly ash* ditingkatkan menjadi 10% terjadi penurunan batas cair menjadi 75,09%, dan terjadi penurunan batas cair kembali menjadi 73,87% ketika kadar *fly ash* 15%, serta 72,24% pada kadar *fly ash* 20%. Persentase batas cair >43% memiliki tingkat plastisitas ekstrim tinggi (Hardiyatmo, 2017). Tanah dengan kompresibilitas tinggi memiliki daya dukung yang rendah serta dapat mengalami penurunan tanah yang berlebihan atau memiliki stabilitas yang kurang baik (Das, 1995).

Gambar 3 memperlihatkan bahwa penambahan *fly ash* pada variasi tanah menyebabkan penurunan nilai batas plastis (PL). Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya peningkatan kadar *fly ash*, tanah menjadi kurang plastis, sehingga lebih sedikit perubahan bentuk yang terjadi ketika tanah berada di kondisi kadar air yang lebih rendah. Dari pengujian batas susut laboratorium diperoleh nilai batas susut sebesar 44,42% pada sampel tanah asli dengan kadar *fly ash* 0%, 67,07% pada kadar *fly ash* 10%, 67,48% pada kadar *fly ash* 15% dan batas susut pada kadar *fly ash* 20% sebesar 67,58%. Nilai tersebut termasuk tanah dengan nilai batas susut ekstrim tinggi.

a. Hasil Indeks Plastisitas

Berdasarkan rumus $PI = LL - PL$ diperoleh nilai $IP_{\text{tanah asli}} = 21,48\%$. Tanah yang memiliki nilai $PI > 17$ termasuk dengan kategori lempung yang memiliki sifat plastisitas tinggi. Hasil perhitungan nilai indeks plastisitas ditunjukkan pada Gambar 4.

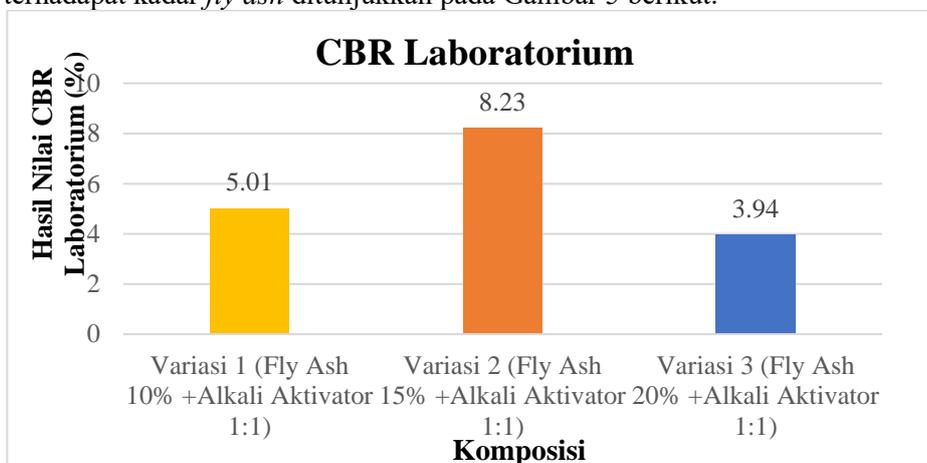


Gambar 4. Diagram hasil indeks plastisitas

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui sampel variasi 1 memiliki indeks plastisitas sebesar 21,82%, sampel variasi 2 sebesar 20,71%, dan sampel variasi 3 sebesar 20,58%. Tanah dengan nilai IP di atas 17% dikategorikan sebagai tanah jenis lempung dengan plastisitas tinggi dan memiliki sifat kohesif yang kuat.

4. Pengujian California Bearing Ratio (CBR)

Pengujian di laboratorium tanah dilakukan untuk memperoleh nilai CBR laboratorium. California Bearing Ratio mengukur perbandingan antara beban penetrasi bahan dengan standar pada kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. (Situmorang et al., 2021). Hasil pengujian nilai CBR terhadap kadar *fly ash* ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Perbandingan nilai cbr dengan kadar *fly ash*

Gambar menunjukkan bahwa nilai CBR mengalami perubahan seiring dengan peningkatan kadar *fly ash* dalam campuran. Diketahui pada kadar *fly ash* 0% atau tanah asli, nilai CBR adalah 5,87%. Tanah *subgrade* dengan nilai 5% - 10% termasuk tanah dengan material sedang (Pasauran et al., 2020). Ketika tanah lempung dicampur dengan kadar *fly ash* 10% (sampel variasi 1), nilai CBR sebesar 5,01%. Ketika tanah lempung dicampur dengan kadar *fly ash* yang ditingkatkan hingga 15%, nilai CBR meningkat signifikan menjadi 8,23%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pada kadar *fly ash* tertentu, terdapat peningkatan stabilitas dan daya dukung tanah. Setelah mencapai puncaknya pada kadar 15%, nilai CBR kembali menurun ketika kadar *fly ash* mencapai 20%, menjadi 3,94%. Penurunan ini mengindikasikan bahwa kelebihan *fly ash* justru dapat mengurangi daya dukung tanah. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan adanya hubungan non-linear antara kadar *fly ash* dan nilai CBR, dengan titik optimal sekitar kadar *fly ash* 15%, di mana nilai CBR mencapai maksimum. Hal ini menandakan bahwa pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah harus dilakukan dengan pengaturan kadar yang tepat untuk mendapatkan peningkatan daya dukung yang optimal.

SIMPULAN

Karakteristik tanah asli pada STA 1+270, berdasarkan hasil uji sifat fisis dan mekanis menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki kadar air sebesar 28,71% dari pengujian CBR, batas cair 78,74%, batas susut 44,42%, batas plastis 57,27%, indeks plastisitas 21,48%, berat jenis 2,7, dan nilai CBR 5,87%. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dapat disimpulkan bahwa tanah tersebut tergolong tanah lempung dengan plastisitas tinggi dan bersifat kohesif, yang berarti tanah ini cenderung memiliki daya dukung rendah dan membutuhkan perbaikan atau stabilisasi lebih lanjut untuk digunakan sebagai *subgrade* dalam konstruksi.

Penambahan geopolimer pada tanah lunak untuk lapis *subgrade* menunjukkan variasi dalam peningkatan nilai CBR. Dari tiga variasi campuran yang diuji, variasi pertama menghasilkan nilai CBR sebesar 5,01%, variasi kedua 8,23%, dan variasi ketiga 3,94%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh penambahan geopolimer terhadap tanah lunak tidak konsisten dan

bervariasi tergantung pada komposisi campuran yang digunakan. Peningkatan yang signifikan pada variasi kedua menunjukkan bahwa komposisi yang tepat dari bahan stabilisasi dapat meningkatkan daya dukung tanah secara efektif.

Berdasarkan temuan dan keterbatasan yang ditemukan dalam penelitian ini, beberapa rekomendasi dapat diajukan untuk penelitian di masa depan. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penggunaan jenis tanah lain, mengingat setiap daerah memiliki karakteristik tanah yang berbeda. Selain itu, disarankan untuk menambahkan parameter kekuatan tanah seperti kuat geser dan kuat tekan untuk mengevaluasi kinerja stabilisasi lebih mendalam. Penelitian selanjutnya juga dapat menambahkan variasi penambahan *fly ash* dan rasio alkali aktivator terhadap tanah lempung guna menentukan kombinasi yang paling efektif. Selain itu, pengujian lebih lanjut terhadap kandungan *fly ash* perlu dilakukan, serta mempertimbangkan penambahan *fly ash* dengan campuran bahan lain untuk mencapai hasil yang lebih optimal dalam meningkatkan daya dukung dan stabilitas tanah.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Walske, M. L. (2020). Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay. *Geosciences*.
- Adi, M. M., Burhanuddin, B., & Darwis, D. (2021). Pengaruh Rasio Agregat Binder Terhadap Prilaku Mekanik Beton Geopolimer Dengan Campuran Abu Sekam Padi Dan Abu Ampas Tebu. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 7(1), 163–172.
- Akmizal, & Prasetyo, Y. D. (2022). *KAJIAN PEMILIHAN TRASE RENCANA PEMBANGUNAN JALAN LINGKAR UTARA LAMONGAN DARI SEGI LALU LINTAS DI WILAYAH PERKOTAAN LAMONGAN, JAWA TIMUR*.
- Andreas, L. O., & Gusmareta, Y. (2019). Pengembangan media pembelajaran mata kuliah mekanika tanah dan teknik pondasi berbasis video tutorial. *CIVED*, 5(4), 5(4).
- Ardiana, A., Lim, A., Muljana, H., Putra, H., & Widjaja, B. (2023). Studi Laboratorium Campuran Biopolimer Glukomanan dan Beeswax untuk Meningkatkan Kuat Geser Tanah Pasir. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta*, 198–207.
- Aryanto, M., Suhendra, S., & Amalia, K. R. (2021). Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Kapur Tohor. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(1), 38–73.
- Aziz, U. A., Riyanto, E., & Mustofa, B. (2022). Pengaruh Penambahan Serbuk Bata Merah Dan Garam Dapur Terhadap Nilai CBR Pada Stabilisasi Tanah Lempung. *Surya Beton: Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, 6(2), 64–73.
- Bhakti, B. M., & Wulandari, S. (2023). PENGARUH PENAMBAHAN SERBUK KACA PADA STABILISASI TANAH LEMPUNG LUNAK DI DAERAH KABUPATEN KARAWANG. *Rekayasa Sipil*, 17, 94–100.
- Darmawandi, A., Waruwu, A., Halawa, T., Harianto, D., & Muammar, M. (2020). Karakteristik tanah lunak Sumatera Utara berdasarkan pengujian kuat tekan bebas. *In Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 3(1), 16–20.
- Das, Braja M. 1994. *Mekanika Tanah Jilid 1*. Jakarta : Erlangga
- Daulay, A. M., Sarifah, J., Pasaribu, B., & Lukman, A. (2022). Pengaruh Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Kapur Dolomit terhadap Nilai CBR Tanah. *In Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 5(1), 30–35.
- Desimaliana, E., Shima, R. D., & Musyaffa, F. (2024). Analisis Biaya terhadap Pengaruh Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Beton Geopolimer. *Journal of Sustainable Construction*, 3(2), 45–53.
- Erwin, Wibisono, G., & Olivia, M. (2019). Stabilisasi Tanah Gambut Menggunakan Geopolimer Hybrid. *JOM FTEKNIK*, 6(1).
- Hange, E. E., Karels, D. W., & Kapitan, A. O. (2022). Pengaruh Karakteristik Tanah Dasar Terhadap Kerusakan Perkerasan Jalan. *Jurnal Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana*, 11(2), 155–168.
- Hardiyatmo, H. C. (2017). *Mekanika Tanah 1 (7th ed., Vol. 1)*. Gadjah Mada University Press.

- Hendry, Rahmawati, R., & Andriani, S. (2021). Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Campuran Fly Ash (FA) Dan Expanded Polystyrene (EPS) Sebagai Alternatif Timbunan Ringan Pada Lapisan Subgrade. *Potensi*, 23(1).
- Odeh, N. A., & Al-Rkaby, A. H. J. (2022). Strenght, Drability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil. *Case Studies in Construction Materials*.
- Pasauran, O., Wong, I. L. K., & Palinggi, M. D. M. (2020). Pengaruh Penambahan Abu Bonggol Jagung Pada Tanah Lempung Terhadap Uji California Bearing Ratio. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(4), 218–226.
- Putra, P., Elpani, P., Fadhilah, A., & Ghony, M. A. (2023). Analisis Perbandingan Berat Jenis Tanah Sampel Batulempung dan Batupasir Pada Titik Bor MHY 52A. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Sains*, 1(2), 73–78.
- Rini, I. D. W. S., Saputra, A. A. I., Maria, M., Anifah, E. M., Gunawan, A., & Arobi, A. I. (2022). Analisis Dampak Lingkungan Pengolahan Limbah Fly ash dan Bottom ash dengan Metode Siklus Daur Hidup (Life Cycle Assessment/LCA) di Industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *SPECTA Journal of Technology*, 6(3), 263–272.
- Situmorang, A. P. P., Hendri, O., & Yani, M. I. (2021). Korelasi Nilai Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Dengan Nilai California Bearing Ratio (Cbr) Tanah Lempung: Correlation Of The Value Of Unconfined Compressive Strength With California Bearing Ration (Cbr) Value Of Clay Soil. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, 4(1), 53–60.
- Solikin, M. (2021). Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1: 1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na₂SiO₃ Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 14(1), 13–20.
- Walewangko, B. Y., Sompie, O. B., & Sumampouw, J. E. (2020). Pengaruh penambahan fly ash dan tras pada tanah lempung terhadap NILAI CBR. *Jurnal Sipil Statik*, 8(1).
- Wardhono, A. (2019). Pengaruh Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang Kelas C. *Unesa*, 1(1).
- Waruwu, A., Gea, F., Hia, J. Y. A., Waruwu, E. M., & Zega, M. (2022). Pengaruh Model Perkuatan Bambu Terhadap Nilai Cbr Tanah Lempung Lunak. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 131–138.
- Wibisono, E. R., Nurcahaya, D. P., Susanti, A., & Widayanti, A. (2022). Evaluasi Kinerja Lalu Lintas Simpang Tak Bersinyal Berdasarkan Pertumbuhan Kendaraan Data Survei di Jalan Raya Babat - Jalan Kalen Kabupaten Lamongan. *Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 5(1).
- Zimar, Z., Robert, D. J., Nguyen, A., & Giustozzi, F. (2022). Application of Clay Fly ASH in Pavement Subgrade Stabilisation. *Journal of Environmental Management* 312.
- Zulnasari, A., Nugroho, S. A., & Fatnanta, F. (2021). Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung Lunak Distabilisasi Dengan Kapur dan Limbah Pembakaran Batubara. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 17(1), 24–36.