

# PEMANFAATAN LIMBAH GROUND GRANULATE BLAST FURNACE SLAG SEBAGAI BAHAN GEOPOLIMER UNTUK STABILISASI TANAH DASAR (UTILIZATION OF GROUND GRANULATE BLAST FURNACE SLAG WASTE AS GEOPOLYMER MATERIAL FOR SUBGRADE STABILIZATION)

Rama Indera Kusuma<sup>1\*)</sup>, Fadhila Putri Cahyani<sup>1)</sup>, Enden Mina<sup>1)</sup>, Woelandari Fathonah<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Banten, Indonesia

<sup>\*)</sup>rama@untirta.ac.id

Diterima: 15 Februari 2024; direvisi: 28 November 2024; disetujui: 01 Desember 2024;

## ABSTRAK

*Ground Granulate Blast Furnace Slag (GGBFS) merupakan produk sampingan atau limbah bukan logam dari proses produksi besi dan baja. Pemanfaatan GGBFS saat ini sudah banyak diaplikasikan sebagai bahan tambah pada campuran mortar, karena memiliki sifat pozzolanik, dapat juga digunakan sebagai bahan untuk stabilisasi tanah subgrade yang tidak masuk dalam persyaratan teknis perkerasan jalan. GGBFS dijadikan bahan geopolimer bersama dengan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebagai alkali aktivator untuk menghasilkan ikatan polimer yang padat seperti semen. Konsentrasi NaOH 10 M yang digunakan adalah dengan rasio larutan 2,0 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> terhadap NaOH), variasi kadar GGBFS sebesar 0% dan 20%, serta variasi kadar S/L (GGBFS terhadap aktivator) sebesar 1/2 dan 1/2,5; yang dicampur dengan tanah asli untuk membuat sampel kuat tekan bebas/Unconfined Compression Test (UCT), dengan pemeraman benda uji UCT dilakukan dengan waktu 0, 7, 14, dan 28 hari. Dari hasil pengujian sampel Tanah asli berjenis tanah OH. Hasil pengujian UCT sampel tanah asli tanpa stabilisasi dengan waktu peram 28 hari sebesar 1,59 kg/cm<sup>2</sup>, sedangkan sampel tanah yang distabilisasi (tanah 80%, GGBFS 20%, alkali activator S/L (1/2,5)) adalah sebesar 29,386 kg/cm<sup>2</sup>. Hasil UCT menunjukkan kenaikan nilai kekuatan tanah yang signifikan sehingga geopolimer dengan bahan GGBFS dan (NaOH; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dapat digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah sebagaimana penggunaan semen Portland.*

**Kata Kunci:** geopolimer, GGBFS, kuat tekan bebas, stabilisasi tanah dasar, alkali aktivator

## ABSTRACT

*Ground Granulate Blast Furnace Slag (GGBFS) is a by-product or non-metallic waste from the iron and steel production process. GGBFS is currently widely applied as an additive to mortar mixtures because it has pozzolanic properties. It can also be used as a material for stabilizing subgrade soil that is not included in the technical requirements for road pavement. GGBFS is a geopolymer material with NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> as an alkali activator to produce a solid polymer bond like cement. The concentration of 10 M NaOH used is with a solution ratio of 2.0 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> to NaOH), variations in GGBFS content of 0% and 20%, and variations in S/L content (GGBFS to activator) of 1/2 and 1/2.5; which is mixed with the original soil to make a sample of an Unconfined Compression Test (UCT), with the curing of the UCT test specimens carried out for 0, 7, 14, and 28 days. From the test results, the original soil sample is of the OH soil type. The results of UCT testing of original soil samples without stabilization with a curing time of 28 days were 1.59 kg/cm<sup>2</sup>, while the stabilized soil sample (80% soil, 20% GGBFS, alkali activator S/L (1/2.5)) was 29.386 kg/cm<sup>2</sup>. The results of UCT testing showed a significant increase in soil strength values, so geopolymers with GGBFS and (NaOH; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) materials can be used as soil stabilization materials like Portland cement.*

**Keywords:** geopolymer, GGBFS, unconfined compression test, subgrade stabilization, alkaline activator

## PENDAHULUAN

Tanah dalam pekerjaan konstruksi sipil merupakan suatu pendukung utama fondasi dalam konstruksi. Dalam pelaksanaan pekerjaan perkerasan jalan tidak semuanya kondisi tanah memenuhi persyaratan teknis. Namun, terdapat juga kondisi tanah yang tidak memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Kondisi ini juga dapat ditemui pada ruas Jalan Kubang Laban Terate Kecamatan Kramatwatu Kabupaten Serang Banten dengan kondisi jalan berlubang dan bergelombang. Dari hasil pengujian DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) pada tanah dasar jalan di lokasi didapatkan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) sebesar 3,413% , nilai CBR tanah dasar yang kurang dari 6% hendaknya dilakukan stabilisasi (Marga 2017). Selain itu, pengujian UCT pada tanah dasar mendapatkan nilai  $q_u$  sebesar 1,096 kg/cm<sup>2</sup> atau 0,1075 MPa nilai  $q_u$  tersebut belum memenuhi standar ASTM D 4609 tentang konstruksi jalan khususnya lapisan tanah dasar yang mensyaratkan nilai  $q_u$  tanah >0,8 MPa (Abdila *et al.* 2022) sehingga diperlukan stabilisasi pada tanah dasar tersebut.

Berbagai macam metode stabilisasi tanah di antaranya adalah stabilisasi dengan bahan aditif berupa bahan kimia, semen, dan bahan limbah seperti *fly ash* yang memiliki karakteristik seperti semen (Kurniawan and Hadimuljono 2020). Penggunaan semen dalam stabilisasi tanah sangat sering dilakukan karena semen sangat mudah didapatkan dan produksinya melimpah. Namun, efek negatif dari industri semen terhadap lingkungan sangatlah mengkhawatirkan, di mana bahan baku tidak terbarukan yang digunakan dalam pembuatan semen akan semakin berkurang dan menipis, kerusakan pada alam, habitat hewan dan tumbuhan yang akan menimbulkan ketidakseimbangan ekologi. Proses pembuatan semen di pabrik menimbulkan berbagai macam polusi (udara, air, tanah) yang berpengaruh pada perubahan iklim dunia (Mohamad *et al.* 2022). Oleh karena itu, diperlukan invensi dan pengembangan bahan-bahan terbarukan ataupun dari penggunaan kembali bahan limbah industri sebagai bahan pengganti semen seluruhnya atau sebagian.

Penelitian pengganti semen saat ini mendapatkan bahwa bahan seperti abu terbang (*fly ash*), abu sekam padi, abu sawit (Kusuma *et*

*al.* 2023; Kusuma and Mina 2015; Mina and Kusuma 2016), terdapat juga limbah hasil proses pembakaran baja dan besi yaitu GGBFS (*Ground Granulate Blast Furnace Slag*) atau semen slag merupakan material limbah bukan organik yang memiliki sifat seperti semen (Pöllmann 2021). Produksi baja yang melimpah di lokasi pabrik baja terbesar di Indonesia terdapat di Kota Cilegon Banten, berbanding lurus dengan limbah yang dihasilkan sehingga perlu pemanfaatan limbah khususnya GGBFS untuk stabilisasi tanah. GGBFS untuk penelitian ini berasal dari PT Krakatau Semen Indonesia (KSI) yang memiliki kandungan CaO; SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; seperti tercantum dalam Tabel 1. GGBFS dapat diaplikasikan pada tanah dengan bermacam-macam metode. Namun, dalam penelitian ini akan digunakan sebagai bahan geopolimer sebagai pengganti penggunaan semen (Noolu *et al.* 2021).

**Tabel 1.** Spesifikasi GGBFS PT KSI

Parameter	Kandungan Senyawa Kimia dan Fisika	
	Aluminium Trioxide	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Calcium Oxide	CaO	37%
Magnesium Oxide	MgO	10%
Silicon Dioxide	SiO <sub>2</sub>	40%
Chloride	Cl	0,10%
Loss On Ignition	LOI	3%
Glass Content	Glass	97
Moisture Content	Moisture	1 %AR
Blaine Permeability	Blaine	420 m <sup>2</sup> /kg
Strength Activity Index	3 days	45%
	7 days	70%
	28 days	95%

Sumber: (PT Krakatau Semen Indonesia 2024)

Geopolimer merupakan material yang dihasilkan dari reaksi dari bahan yang banyak mengandung aluminium dan silikat dengan alkali aktivator (AA), dengan hasil akhir berupa material yang memiliki sifat mengikat dengan material lain. Alkali aktivator yang digunakan dalam pembuatan geopolimer dibuat dari larutan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, dan bahan yang alumina, silikat terdapat pada limbah hasil pembakaran seperti GGBFS (Duxson *et al.* 2007; de Oliveira *et al.* 2022). Proses geopolimerisasi dengan bahan GGBS dapat dilihat pada Gambar 1. Tanah yang distabilisasi dengan geopolimer memiliki kekuatan dan daya

tahan yang unggul dibandingkan dengan stabilisator konvensional. Selain itu, produk yang dihasilkan memiliki struktur padat dan kompak yang memiliki sifat seperti semen (Sahoo and Prasad Singh 2022).

Stabilisasi tanah menggunakan bahan geopolimer GGBFS dapat meningkatkan nilai Kuat Tekan Bebas, di mana konsentrasi molar aktivator alkali, serta rasio alkali aktivator terhadap GGBFS dapat memengaruhi nilai kuat tekan bebas tanah yang distabilisasi (Singhi, Laskar, and Ahmed 2016). Rasio GGBFS terhadap aktivator alkali 1,5 dan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap NaOH sebesar 2,0 dengan pemeraman 7 hari mendapatkan UCT sebesar 3,15MPa (Abdila *et al.* 2021).



Sumber: Singh (2018)

**Gambar 1.** Diagram skema proses geopolimerisasi sampel yang mengandung pengikat VA dan GGBFS

## HIPOTESIS

Pemanfaatan geopolimer berbahan limbah GGBFS dapat digunakan sebagai pengganti semen dalam usaha perbaikan tanah. Semakin encer rasio S/L (GGBFS terhadap Alkali Aktivator), nilai UCT tanah akan semakin meningkat.

## METODOLOGI

Penelitian stabilisasi tanah menggunakan geopolimer berbahan limbah GGBFS dilakukan melalui beberapa tahapan. Dimulai dengan melakukan survei kondisi jalan di daerah kota/kabupaten Serang dan dipilih Jalan Raya Kubang Laban, Desa Terate, Kecamatan Kramatwatu, Kabupaten Serang, Banten, koordinat GPS  $6^{\circ}00'08.0\text{S } 106^{\circ}05'08.8\text{E}$  dapat

kita lihat peta lokasi pada Gambar 2, sekaligus melakukan pengujian DCP untuk mengetahui nilai CBR tanah dasar dari hasil pengujian didapatkan nilai CBR 3,413%. Sampel tanah diambil dalam kondisi tanah terganggu (*disturbed*) dengan cara menggali tanah dengan kedalaman 15 cm – 30 cm agar bersih dari tanah humus dan akar tanaman, dilanjutkan dengan mengambil sampel tanah dengan menggunakan cangkul kemudian dimasukkan ke dalam karung dan diikat.

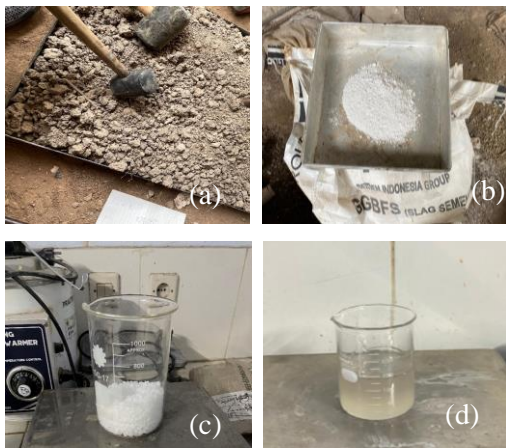


**Gambar 2.** Lokasi Pengambilan Tanah di Jalan Raya Kubang Laban, Desa Terate, Kabupaten Serang, koordinat GPS  $6^{\circ}00'08.0\text{S } 106^{\circ}05'08.8\text{E}$ .

Pengumpulan bahan limbah berupa GGBFS dilakukan di Kota Cilegon dari beberapa perusahaan potensial. PT Krakatau Semen Indonesia adalah satu perusahaan yang memberikan GGBFS untuk dijadikan bahan penelitian. Bahan kimia lainnya berupa NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  mudah didapatkan dari lokapasar (*Marketplace*) di Indonesia. Semua bahan penelitian, baik tanah, GGBFS, NaOH, maupun  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  diuji di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Untirta (Gambar 3).

Pada penelitian ini bahan kimia yang digunakan adalah NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  proanalisis yang memiliki kemurnian 99,95% produk dari Merck yang memiliki sertifikat COA (*Certificate of Analysis*). Sampel tanah pengujian menggunakan variasi rasio aktivator dengan konsentrasi NaOH 10 M dengan rasio larutan 2,0 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap NaOH), variasi kadar GGBFS sebesar 0% dan 20%, serta variasi kadar *Solid(S)/Liquid(L)* (GGBFS terhadap alkali aktivator) sebesar 1/2 dan 1/2,5 yang akan di campur dengan tanah dari Jalan Kubang Laban, yang kemudian dilakukan pemeraman, yaitu 0, 7, 14, dan 28 hari, yang kemudian dilakukan pengujian UCT pada tiap sampel tanah pengujian. Dari pengujian ini

didapatkan karakteristik sifat fisik tanah, pengaruh penambahan geopolimer sesuai dengan variasi yang telah ditentukan berdasarkan waktu pemeraman. Dengan demikian, geopolimer berbahan GGBF dapat menjadi salah satu alternatif solusi pengganti semen dalam perbaikan tanah yang ramah lingkungan.



**Gambar 3.** (a) Tanah asli;(b) GGBFS;(c) NaOH; (d) Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

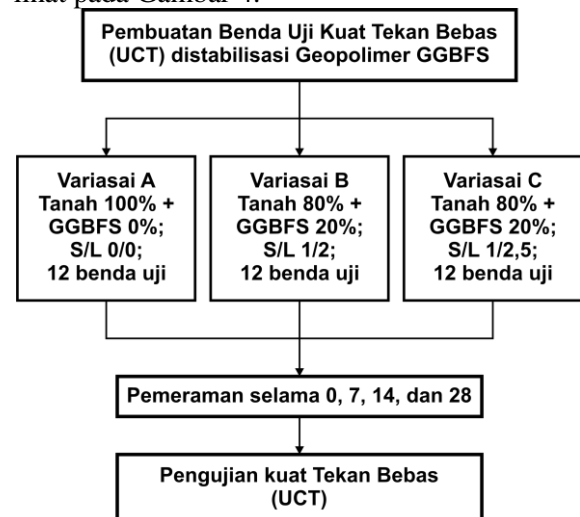
Pengujian tanah asli berupa uji kadar air, berat jenis tanah, batas cair, batas plastis, analisis ukuran butir, dilakukan untuk mengetahui jenis tanah berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS) apabila dalam menentukan tanah tersebut tanah organik atau tidak organik maka diperlukan pengujian tambahan, yaitu *Liquid Limit Ratio* (LLR)(ASTM 2005) dimana perbandingan nilai batas cair tanah kering oven dengan batas cair tanah kering udara. Nilai LLR < 0,75 maka tanah tersebut masuk kategori tanah organik (Murthy 2002). Penelitian ini melakukan pengujian pemadatan tanah standar untuk mendapatkan nilai berat kering tanah serta kadar air optimum tanah asli. Dalam pengambilan sampel tanah yang distabilisasi oleh geopolimer GGBFS maka diperlukan pembuatan geopolimer GGBFS terlebih dahulu dimana bahan tambah berupa geopolimer dengan bahan baku GGBFS serta alkali aktivator (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH) 1 Molaritas (M) alkali aktivator tidak dapat memberikan kekuatan pada tanah, diperlukan lebih dari 8 Molaritas (M) untuk mendapatkan kekuatan yang lebih baik dari tipe konvensional (Gokul *et al.* 2021). Dimana konsentrasi NaOH yang dipilih adalah 10 M dengan rasio larutan 2,0

(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> terhadap NaOH), variasi kadar GGBFS sebesar 0% dan 20% sebagai pembanding dengan tanah asli, serta variasi kadar S/L (GGBFS terhadap Alkali Aktivator) sebesar 1/2 dan 1/2,5 (Tabel 2).

**Tabel 2.** Variasi Sampel Uji UCT

Variasi Sampel	Tanah	GGBFS (S)	S/L	
			GGBFS (S)	AA (L)
A	100%	0%	0	0
B	80%	20%	1	2
C	80%	20%	1	2,5

Geopolimer GGBFS yang telah dibuat tersebut akan dicampurkan dengan tanah asli sesuai dengan variasi dan waktu pemeraman yang telah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses mencetak sampel UCT. Sampel UCT yang telah dibuat sesuai dengan variasi dan waktu pemeraman yang telah ditentukan kemudian diuji untuk mengetahui perubahan nilai UCT berdasarkan variasi dan waktu pemeraman (0, 7, 14, 28) hari, tiap variasi sampel dibuat 3 buah benda uji dengan total jumlah sampel uji sebanyak 36 buah. Hasil pengujian kemudian dianalisis dan dibahas untuk mengetahui pengaruh geopolimer GGBFS terhadap nilai UCT, serta memberikan kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya. Bagan alir penelitian dapat kita lihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Bagan Alir Penelitian



## HASIL DAN ANALISIS

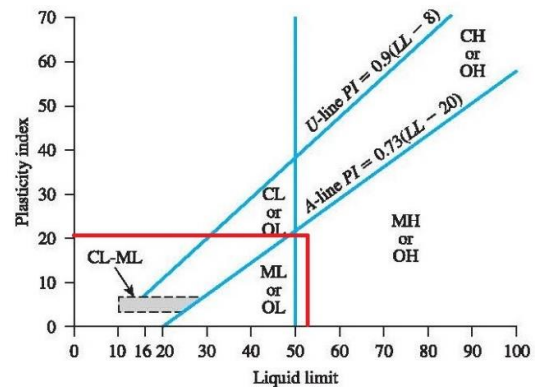
Tanah yang diambil sebagai sampel dari Jalan Kubang Laban diuji di Lab Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Untirta untuk mengetahui karakteristik, sifat, serta mekanis tanah tersebut. Hasil pengujian dapat kita lihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Tanah Kubang Laban

Nama Pengujian	Nilai/Hasil	Keterangan
Kadar Air (w)	17,65%	
Analisis Berat Butir	50,6%	Lolos saringan No.200
Berat Jenis (Gs)	2,49	
Batas Cair (LL)	53%	
Batas Plastis (PL)	23,16%	
Indeks Plastisitas (PI)	20,18	
DCP	3,413%	

Dengan menggunakan klasifikasi tanah USCS seperti pada Gambar 5, tanah Jalan Kubang Laban termasuk pada golongan MH (anorganik) atau OH (organik). Untuk memastikan lebih lanjut mengenai klasifikasi tanah organik dan anorganik, diperlukan pengujian LLR (*Liquid Limit Ratio*) yang merupakan perbandingan nilai batas cair dari tanah yang dioven dengan nilai batas cair tanah kering udara, dari hasil pengujian LLR diperoleh nilai 0,72. Nilai LLR < 0,75 menjadikan tanah tersebut masuk ke dalam

kategori tanah organik berjenis (OH), yaitu tanah organik dengan batas cair tinggi.



Sumber: Das (2021)

**Gambar 5.** Grafik Kalasifikasi Tanah USCS

Pengujian mekanis tanah berupa uji pemadatan tanah standar mendapatkan nilai kadar air optimum tanah ( $\omega_{opt}$ ) sebesar 27,79% dengan nilai berat isi kering tanah maksimum ( $\gamma_{dry}$ ) sebesar 1,14 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai-nilai tersebut akan dijadikan dasar dalam perhitungan kebutuhan bahan dan tanah dalam pembuatan sampel uji.

Perubahan karakteristik sifat fisik tanah diuji dengan penambahan dari alkali aktivator, dimana prosentase bahan GGBFS tetap di 20% terhadap berat kering tanah, dilakukan dengan beberapa pengujian, di antaranya pengujian berat jenis (Gs), batas cair (LL), batas plastis (PL) serta mencari nilai indeks plastisitas (IP) tanah. Hasil pengujian tersebut dapat kita lihat pada Tabel 4 di bawah ini.

**Tabel 4.** Pengaruh Penambahan Alkali Aktivator pada Parameter (Gs,LL,PL,dan PI)

Variasi Sampel Tanah	Berat Jenis (Gs)	Batas cair (LL)	Batas Plastis (PL)	IP
A (Tanah 100%;GGBFS 0%; S/L 0)	2,49	53%	32,82%	20,18
B (Tanah 80%;GGBFS 20%; S/L 1/2)	2,6	37%	26,32%	10,68
C (Tanah 80%;GGBFS 20%; S/L 1/2,5)	2,76	33%	23,16%	9,84

Pengujian sampel tanah (A, B, C) dilanjutkan dengan pengujian kuat tekan bebas (UCT) tanah dengan besar gaya per satuan luas pada saat benda uji mengalami keruntuhan atau pada saat regangan mencapai 20% (ASTM 2016). Dari pengujian ini kita dapat mengetahui kekuatan tanah yang telah distabilisasi dengan

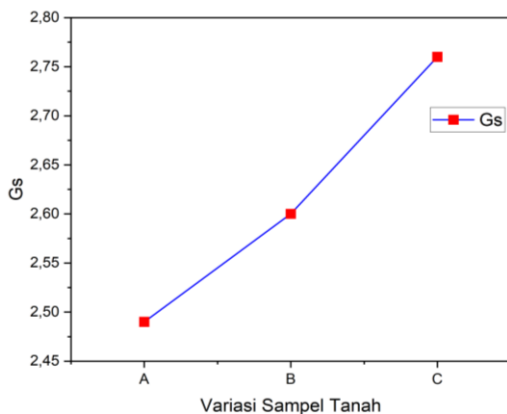
bahan geopolimer GGBFS menerima gaya yang diberikan sampai tanah tersebut hancur atau terpisah dengan butiran-butirannya, serta efektivitas bahan geopolimer GGBFS dalam meningkatkan kekuatan nilai kohesi butir-butir tanah. Hasil pengujian UCT Sampel tanah (A, B, C) dengan waktu pemeraman dapat kita lihat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Hasil Pengujian UCT pada Sampel tanah (A,B,C) dengan waktu peram (0,7,14 dan 28) hari.

Variasi	Waktu pemeraman	Nilai UCT ( $qu$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )			Rata-rata	Konsistensi
		Sampel				
		1	2	3		
Tanah A (Tanah Asli)	0 Hari	1,208	0,937	1,144	1,096	Stiff
	7 Hari	1,184	1,183	1,196	1,096	Stiff
	14 Hari	1,237	1,250	1,263	1,250	Stiff
	28 Hari	1,776	1,275	1,720	1,590	Stiff
Tanah B (Tanah 80%, GGBFS 20%, S/L 1/2)	0 Hari	5,641	6,415	10,047	7,368	Hard
	7 Hari	12,961	11,309	12,411	12,227	Hard
	14 Hari	17,834	16,188	14,394	16,139	Hard
	28 Hari	19,503	18,489	17,730	18,574	Hard
Tanah C (Tanah 80%, GGBFS 20%, S/L 1/2,5)	0 Hari	4,354	3,932	5,366	4,551	Hard
	7 Hari	30,305	29,580	27,328	29,071	Hard
	14 Hari	24,311	32,597	30,594	29,168	Hard
	28 Hari	24,510	29,969	33,673	29,384	Hard

## PEMBAHASAN

Pada pengujian berat jenis ( $G_s$ ) tanah tanpa distabilisasi geopolimer memiliki nilai 2,49. Namun, setelah distabilisasi geopolimer berbahan GGBFS variasi (B) mengalami kenaikan menjadi 2,6 dengan menaikkan rasio (S/L) pada tanah variasi (C) nilai berat jenis ( $G_s$ ) naik menjadi 2,76 kenaikan nilai berat jenis ini pada Gambar 6. Kondisi ini sama seperti hasil penelitian (Aziz *et al.* 2020) yang mengindikasikan bahwa sampel tanah yang makin padat akibat reaksi geopolimerisasi GGBFS yang diaktivasi oleh larutan alkali menjadi lebih padat seiring dengan penambahan rasio aktivator padat (S) GGBFS terhadap alkali aktivator (L).



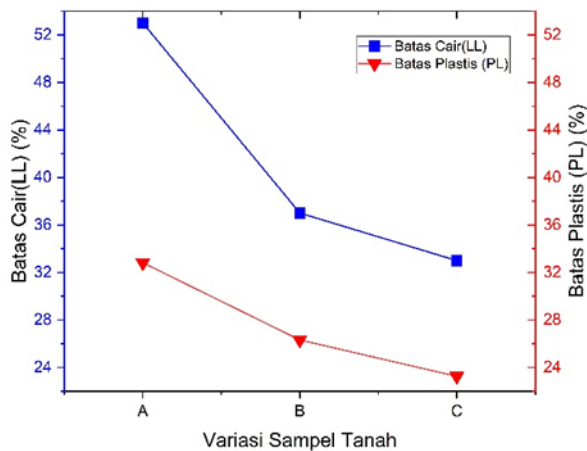
**Gambar 6.** Grafik Variasi Sampel Tanah terhadap nilai  $G_s$

Kenaikan nilai  $G_s$  mengindikasikan terjadinya peningkatan volume butiran padat akibat proses pengikatan pada tanah yang kemudian menggumpal seiring dengan

kenaikan nilai rasio (S/L). Hal ini pun mengakibatkan nilai batas cair, batas plastis, serta indeks plastisitas tanah menjadi menurun yang ditengarai akibat kekuatan ikatan pada sampel tanah tergantung pada konsentrasi alkali aktivatornya (Ghadir and Ranjbar 2018) sehingga daya ikat antarpartikel semakin kuat dan menjadikannya semakin padat. Hal ini membuat nilai (LL, PL, PI) semakin menurun dan menjadikan sifat tanah yang awalnya berpotensi tinggi mengembang setelah distabilisasi berubah menjadi berpotensi rendah mengembang (Peck, Hanson, and Thornburn 1991).

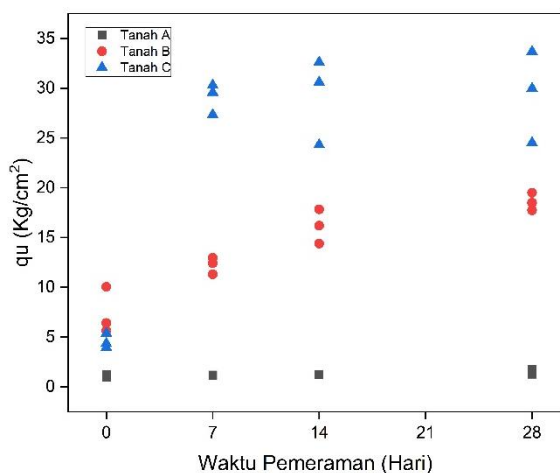
Perubahan sifat tanah dapat terjadi dari penambahan bahan yang memiliki sifat pozzolan seperti abu terbang (*fly ash*), yang mengurangi tebalnya penyebaran permukaan tanah lempung dalam membentuk difusi lapisan ganda (*double layer*) serta menyebabkan partikel-partikel kecil tanah lempung bersatu membentuk massa yang lebih besar dan menggumpal (Sivapullaiah, Prashanth, and Sridharan 1996). Penambahan zat aditif atau bahan stabilisasi pada tanah lempung mengakibatkan terjadinya reaksi pertukaran kation yang mengakibatkan penurunan lapisan ganda (*double layer*) (Lambe and Whitman 2008). Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penurunan ketebalan lapisan ganda, berkurangnya gaya tolak menolak antarpartikel tanah lempung sehingga partikel-partikel tanah liat bergerak menuju satu sama lain dan berkumpul melekat. Kemudian, terjadi penggumpalan partikel yang memiliki kekuatan kimia yang kuat antarpartikel (Sharma and Sivapullaiah 2016) yang menyebabkan nilai batas cair (LL), batas plastis (PL) dan indeks

plastisitas (PI) tanah lempung yang telah distabilisasi geopolimer berbahan GGBFS mengalami penurunan seiring peningkatan rasio (S/L) seperti pada grafik Gambar 7.



**Gambar 7.** Grafik Penurunan ( LL,PL) akibat peningkatan rasio (S/L)

Pada Tabel 5 Hasil pengujian UCT Sampel tanah (A, B, C) dapat kita deskripsikan pada Gambar 8 yang memperlihatkan terdapat perubahan nilai UCT (qu) akibat semakin encernya rasio S/L.



**Gambar 8.** Grafik nilai qu sampel Tanah (A,B,C) terhadap waktu pemeraman

Tanah A tanpa distabilisasi dengan bahan apa pun pada pengujian UCT pada waktu pemeraman 0 hari sampai 28 hari terdapat kenaikan nilai UCT, tetapi tidak terlalu signifikan dan cenderung datar. Artinya, tidak terlalu banyak perubahan pada daya rekat antarpartikel tanah. Kondisi sampel tanah A memiliki sifat konsistensi *stiff*.

Nilai UCT terhadap Konsistensi tanah pada Tabel 5 bersumber dari Tabel 6.

**Tabel 6.** Konsistensi dan Kekuatan Lempung

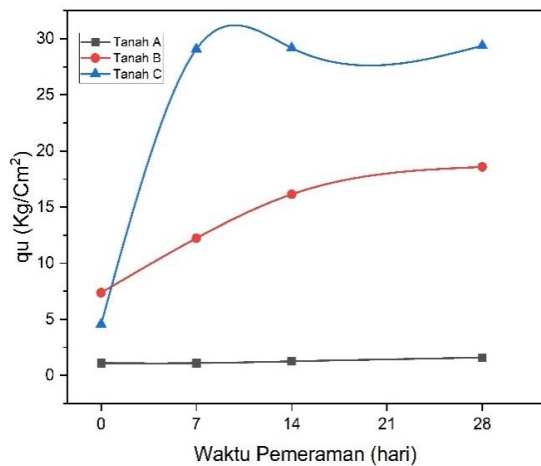
Konsistensi	UCT (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
<i>Very Soft</i>	< 0,25
<i>Soft</i>	0,25 - 0,5
<i>Medium</i>	0,5 - 1
<i>Stiff</i>	1 - 2
<i>Verry Stiff</i>	2 - 4
<i>Hard</i>	> 4

Sumber: (Hary Christady 2017)

Pada Tabel 5, tanah A tidak mengalami perubahan sifat konsistensi sejak dari waktu 0 hari hingga 28 hari, di mana tanah A tidak mendapatkan perlakuan stabilisasi tanah bersifat *stiff*. Tanah B dan Tanah C mengalami perubahan sifat karena telah distabilisasi menjadi konsistensi *Hard* walaupun masa peram hanya 0 hari. Kondisi ini membuktikan bahwa geopolimer berbahan GGBFS mampu meningkatkan daya rekat antar partikel butiran tanah 5 s.d. 7 kali lipat dari kekuatan tanah yang tidak distabilisasi geopolimer berbahan GGBFS.

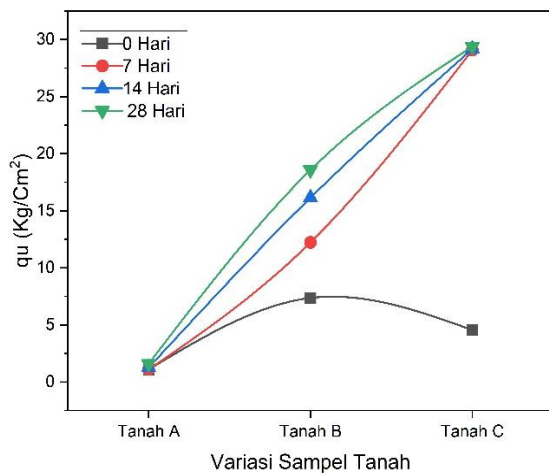
Nilai qu pada 0 hari untuk Tanah B (7,368 kg/cm<sup>2</sup>) meningkat dengan nilai qu pada hari ke-7 untuk Tanah B ( 12,227 kg/cm<sup>2</sup>). Peningkatan nilai qu dari 0 hari sampai ke 7 hari sangat signifikan untuk tanah B mencapai 66,2% dimana perilaku reaksi pengerasan bahan geopolimer GGBFS ini mirip dengan mekanisme daya ikat semen pada beton, di mana kekuatan beton pada hari ke-7 mencapai sekitar 65% (PBI 1971 NI-2 1979).

Tanah C nilai qu untuk 0 hari sampai dengan hari ke-7 mengalami peningkatan nilai qu yang sangat signifikan dengan persentase kenaikan mencapai 538,78% sedangkan untuk hari ke-14 dan hari ke-28 tidak mengalami kenaikan secara signifikan cenderung tetap hanya 1,07% kenaikan nilai qu rata-ratanya (Gambar 9). Pada Tanah C, kecepatan proses pengikatan antar butiran sudah hampir selesai 98% pada hari ke-7. Kondisi ini dipengaruhi oleh kandungan kalsium yang terkandung dalam GGBFS mampu mengikat dan mengeras lebih cepat (Jeremiah *et al.* 2021), di atas 7 hari hampir tidak ada lagi proses pengerasan ikatan antarbutiran pada tanah.



**Gambar 9.** Rata-rata nilai  $q_u$  Tanah (A,B,C) terhadap waktu pemeraman

Penambahan rasio larutan AA menjadi 2,5 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap  $\text{NaOH}$ ) terbukti efektif dalam meningkatkan nilai  $q_u$  tanah serta meningkatkan proses sementasi serta daya ikat antar butiran pada sampel tanah. Dalam penelitian ini diperoleh nilai  $q_u$  maksimum pada Tanah C (Tanah 80%, GGBFS 20%, S/L 1/2,5) dengan nilai rata-rata  $q_u$  29,384  $\text{kg}/\text{cm}^2$  pada hari ke-28, naik 1747,766% dari nilai  $q_u$  rata-rata Tanah A pada hari ke -28 sebesar 1,590  $\text{kg}/\text{cm}^2$  seperti pada Gambar 10.



**Gambar 10.** Rasio (S/L) Tanah (A,B,C) terhadap nilai  $q_u$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Hasil stabilisasi pada Tanah C dengan nilai  $q_u$  sebesar 29,384  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (2,88 MPa) dan nilai PI 9,84% membuktikan bahwa stabilisasi tanah menggunakan geopolimer berbahan GGBFS 20%, konsentrasi  $\text{NaOH}$  10 M dengan rasio larutan 2,5 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap  $\text{NaOH}$ ), kadar S/L (GGBFS terhadap Alkali Aktivator)

1/2,5 dapat digunakan sebagai bahan stabilisasi hijau untuk perkuatan tanah dasar.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Geopolimer berbahan GGBFS dapat digunakan secara andal dalam memperbaiki sifat dan konsistensi tanah. Tanah C (Tanah 80%, GGBFS 20%, S/L 1/2,5) mendapatkan hasil uji terbaik dalam nilai  $q_u$  29,384  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Pada hari ke-28, naik 1747,766% dari nilai rata-rata  $q_u$  Tanah A (tanah asli), serta waktu tercepat dalam proses ikatan dan pengerasan butiran tanah pada hari ke-7 dengan nilai  $q_u$  29,071  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Rasio S/L 1/2,5 pada larutan (L) AA menjadi 2,5 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terhadap  $\text{NaOH}$ ) dan kandungan kalsium menjadi peran kunci dalam hasil ini karena terbukti efektif dalam meningkatkan nilai  $q_u$  tanah serta meningkatkan proses sementasi serta daya ikat antarbutiran pada sampel tanah. Geopolimer GGBFS dapat menjadi alternatif hijau bahan perbaikan tanah dasar selain produk semen konvensional.

### Saran

Untuk penelitian lanjutan perlu pengujian dengan penambahan rasio S/L lebih tinggi lagi untuk mengetahui nilai  $q_u$  optimum serta diperlukan foto SEM, XRD pada sampel uji untuk mengetahui perilaku, kondisi mikroskopis sampel setelah distabilisasi geopolimer berbahan GGBFS.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang tulus kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan naskah dan kontribusi dalam penelitian ini. Terima Kasih kepada Ketua Jurusan dan Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Sipil Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas kerjasama dan dukungan dalam proses penelitian ini. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak

## DAFTAR PUSTAKA

Abdila, Syafiadi Rizki, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Romisuhani Ahmad, Dumitru Doru Burduhos Nergis, Shayfull Zamree Abd Rahim, Mohd Firdaus Omar, Andrei Victor Sandu, Petrica Vizureanu, and Syafwandi. 2022.



- Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review. *Materials* 15 (1): 375.
- Abdila, Syafiadi Rizki, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Romisuhani Ahmad, Shayfull Zamree Abd Rahim, Małgorzata Rychta, Izabela Wnuk, Marcin Nabiałek, et al. 2021. Evaluation on the Mechanical Properties of Ground Granulated Blast Slag (GGBS) and Fly Ash Stabilized Soil via Geopolymer Process. *Materials* 14 (11): 2833.
- ASTM. 2005. Designation D 4318-05, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In .
- ASTM, D2166. 2016. 2166; Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *West Conshohocken, PA, United States*.
- Aziz, Ikmal Hakem, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, M A A Mohd Salleh, Emy Aizat Azimi, Jitrin Chairprapa, and Andrei Victor Sandu. 2020. Strength Development of Solely Ground Granulated Blast Furnace Slag Geopolymers. *Construction and Building Materials* 250:118720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118720>.
- Das, Braja M. 2021. *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage learning.
- Duxson, Peter, Ana Fernández-Jiménez, John L Provis, Grant C Lukey, Angel Palomo, and Jannie S J van Deventer. 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science* 42:2917–33.
- Ghadir, Pooria, and Navid Ranjbar. 2018. Clayey Soil Stabilization Using Geopolymer and Portland Cement. *Construction and Building Materials* 188:361–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>.
- Hary Christady, H. 2017. *Mekanika Tanah 1 Edisi 7*. UGM.
- Jeremiah, Jeremiah J, Samuel J Abbey, Colin A Booth, and Anil Kashyap. 2021. Geopolymers as Alternative Sustainable Binders for Stabilisation of Clays—A Review. *Geotechnics* 1 (2): 439–59. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1020021>.
- Kurniawan, Paulus, and Basuki Hadimuljono. 2020. *Applied Geotechnics for Engineers 2*. Vol. 2. Penerbit Andi.
- Kusuma, Rama Indera, Woelandari Fathonah, Enden Mina, and Yuda Inayatullah. 2023. Soil Stabilization on Cibingbin Village Roads Using Rice Husk Ash and Cement. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil* 12 (2): 240–49.
- Kusuma, Rama Indera, and Enden Mina. 2015. Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Menggunakan Abu Sawit Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil* 4 (2).
- Lambe, T W, and R V Whitman. 2008. *Soil Mechanics Si Version*. Series in Soil Engineering. Wiley India. [https://books.google.co.id/books?id=FE\\_5y11jMAoC](https://books.google.co.id/books?id=FE_5y11jMAoC).
- Marga, Bina. 2017. Manual Perkerasan Jalan (Revisi Juni 2017). *Jurnal Infrastruktur PUPR*. Jakarta.
- Mina, Enden, and Rama Indera Kusuma. 2016. Pengaruh Fly Ash Terhadap Nilai CBR Dan Sifat-Sifat Propertis Tanah Studi Kasus: Jalan Raya Bojonegara KM 19 Serang Banten. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil* 5 (2).
- Mohamad, Nabilla, Khairunisa Muthusamy, Rahimah Embong, Andri Kusbiantoro, and Mohd Hanafi Hashim. 2022. Environmental Impact of Cement Production and Solutions: A Review. *Materials Today: Proceedings* 48:741–46.
- Murthy, V N S. 2002. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. CRC press.
- Noolu, Venkatesh, G Mallikarjuna Rao, B Sudheer kumar reddy, and Rama Vara Prasad Chavali. 2021. Strength and Durability Characteristics of GGBS Geopolymer Stabilized Black Cotton Soil. *Materials Today: Proceedings* 43:2373–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.939>.
- Oliveira, Leandro B de, Afonso R G de Azevedo, Markssuel T Marvila, Elaine C Pereira, Roman Fediuk, and Carlos Mauricio F Vieira. 2022. Durability of Geopolymers with Industrial Waste. *Case Studies in Construction Materials* 16:e00839.
- PBI 1971 NI-2. 1979. Peraturan Beton Bertulang Indonesia. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.
- Peck, Ralph B, Walter E Hanson, and Thomas H Thornburn. 1991. *Foundation Engineering*. John Wiley & Sons.
- Pöllmann, Herbert. 2021. *Industrial Waste: Characterization, Modification and Applications of Residues*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- PT Krakatau Semen Indonesia. 2024. Product Specifications. <https://krakatausemenindonesia.Co.Id/Halaman/Spesifikasi-Produk>. 2024. <https://krakatausemenindonesia.co.id/halaman/spesifikasi-produk>.
- Sahoo, Soumyaprakash, and Suresh Prasad Singh.

2022. Strength and Durability Properties of Expansive Soil Treated with Geopolymer and Conventional Stabilizers. *Construction and Building Materials* 328:127078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127078>.
- Sharma, Anil Kumar, and P V Sivapullaiah. 2016. Ground Granulated Blast Furnace Slag Amended Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer. *Soils and Foundations* 56 (2): 205–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.004>.
- Singh, Nakshatra B. 2018. Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material. *Minerals* 8 (7): 299.
- Singhi, Binod, Aminul Islam Laskar, and M Ali Ahmed. 2016. Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending. *Arabian Journal for Science and Engineering* 41 (2): 393–400. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1677-y>.
- Sivapullaiah, P V, J P Prashanth, and A Sridharan. 1996. Effect of Fly Ash on the Index Properties of Black Cotton Soil. *Soils and Foundations* 36 (1): 97–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf.36.97>.