

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Lunak Menggunakan Tanah Pedel dan *Silica Fume* terhadap Kinerja Mekanis dan Kimiawi Tanah

Rifka Ananda<sup>1)</sup>, Syahril S<sup>2)</sup>, Dicky Arisikam<sup>3)</sup>

<sup>1, 2)</sup> Departemen Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559

<sup>3)</sup> Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. Khp Hasan Mustopa No.23, Kec. Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat 40124

Email: [rifka.ananda.mtri24@polban.ac.id](mailto:rifka.ananda.mtri24@polban.ac.id)<sup>1)</sup>, [syahril\\_polban@yahoo.com](mailto:syahril_polban@yahoo.com)<sup>2)</sup>, [arisikamdicky@gmail.com](mailto:arisikamdicky@gmail.com)<sup>3)</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1321>

(Received: 23 August 2025 / Revised: 24 November 2025 / Accepted: 28 January 2026)

### Abstrak

Tanah lunak memiliki karakteristik daya dukung rendah, konsistensi lunak, potensi penurunan tinggi, dan stabilitas rendah yang dapat menyebabkan ketidakmampuan tanah dalam menahan beban konstruksi, sehingga penerapan metode perbaikan tanah menjadi keharusan. Penelitian ini menggunakan metode stabilisasi untuk memperbaiki tanah dengan penambahan tanah pedel dan *silica fume* untuk meningkatkan sifat mekanis dan kimiawi tanah, melalui pengujian UCS, triaksial, dan ED-XRF. Variasi tanah pedel yang digunakan yaitu 3%, 6%, 9%, dan 12%, kemudian persentase optimum tanah pedel dikombinasikan dengan 7,5% *silica fume*. Hasil menunjukkan bahwa tambahan tanah pedel 9% merupakan variasi paling optimum, terjadi peningkatan kuat tekan bebas hingga 691%, kohesi 296%, dan sudut geser 115% jika dibandingkan tanah asli pada masa peram 14 hari. Kombinasi tanah pedel 9% dan *silica fume* 7,5% juga meningkatkan kuat tekan, kohesi dan sudut geser tanah berturut turut hingga 756%, 311%, dan 138% jika dibandingkan dengan tanah asli pada masa peram yang sama. Peningkatan ini dipengaruhi reaksi kimia pembentukan *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dari interaksi CaO pada tanah pedel dan SiO<sub>2</sub> *silica fume*.

Kata kunci: *Stabilisasi, Tanah Lunak, Tanah Pedel, Silica Fume, Calcium Silicate Hydrate (CSH)*

### Abstract

Soft soil is characterized by low bearing capacity, soft consistency, high settlement potential, and low stability, which can lead to the soil's inability to support construction loads; therefore, the application of soil improvement methods becomes essential. This study employs a stabilization method to improve soil by adding pedel soil and silica fume to enhance the mechanical and chemical properties of the soil, through UCS, triaxial, and ED-XRF tests. The pedel soil contents used were 3%, 6%, 9%, and 12%, after which the optimum pedel soil percentage was combined with 7.5% silica fume. The results show that the addition of 9% pedel soil is the most optimum variation, resulting in increases in unconfined compressive strength of up to 691%, cohesion by 296%, and internal friction angle by 115% compared to the natural soil at a curing period of 14 days. The combination of 9% pedel soil and 7.5% silica fume further increased the unconfined compressive strength, cohesion, and internal friction angle by 756%, 311%, and 138%, respectively, compared to the natural soil at the same curing period. These improvements are influenced by the chemical reaction forming Calcium Silicate Hydrate (CSH) from the interaction between CaO in the pedel soil and SiO<sub>2</sub> in the silica fume.

Keywords: *Stabilization, Soft Soil, Pedel Soil, Silica Fume, Calcium Silicate Hydrate (CSH)*

## 1. Latar Belakang

Proses pembangunan infrastruktur terutama transportasi sering sekali mengalami hambatan, satu diantaranya adalah keadaan tanah yang buruk di suatu daerah. Buruknya kondisi tanah ditandai dengan konsistensi tanah yang lunak, di mana tanah memiliki kompresibilitas tinggi, daya dukung rendah dan stabilitas yang rendah (He *et al.*, 2024; Aryanto *et al.*, 2021; Haris *et al.*, 2023). Sifat tanah yang kurang baik menyebabkan tanah tidak dapat memikul beban konstruksi dan dapat menyebabkan kegagalan konstruksi dikemudian hari (Syahril *et al.*, 2025; Umar *et al.*, 2023). Salah satu metode yang digunakan sebagai upaya penanganan pada tanah lunak adalah stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah adalah tindakan mencampurkan tanah lunak dengan bahan tertentu untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas suatu tanah (Reiterman *et al.*, 2022; Rivera *et al.*, 2020; Falah and Muteb, 2023).

Penggunaan bahan tambah ramah lingkungan menjadi pilihan dalam stabilisasi tanah saat ini, salah satunya dengan menggunakan tanah pedel. Tanah pedel adalah produk alami dari tambang, tanah pedel pada penelitian ini diperoleh di wilayah Kecamatan Bojonegoro, Jawa Timur. Tanah pedel memiliki warna putih kekuningan dan bertekstur kapur menyerupai limestone seperti yang terlihat pada Gambar 1. Tanah pedel umumnya hanya digunakan oleh masyarakat sebagai timbunan sehingga penggunaannya saat ini masih belum optimal. Penggunaan bahan tambah lainnya adalah silica fume. *Silica fume* merupakan produk sampingan dari pembuatan silikon yang banyak mengandung senyawa silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) (Brescia-Norambuena *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Hamada *et al.*, 2023). Sebagai produk sampingan, *silica fume* tidak berkontribusi langsung terhadap emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) di lingkungan (Sampathkumar *et al.*, 2024). Sifat *silica fume* yang pozzolanik dapat mengikat partikel antar tanah dan dapat mempengaruhi daya dukung tanah yang semakin meningkat dan mempercepat pembentukan senyawa ikatan yang kuat (Sufa *et al.*, 2022; Yaniem *et al.*, 2024; Syahril *et al.*, 2025).



Gambar 1 Proses Pembuatan Benda Uji

Studi literatur mengenai tanah pedel sebagai material stabilisasi belum dilakukan sehingga menjadi satu keterbaruan pada penelitian ini. Maka dari itu, sebagai acuan, pemilihan limestone dipilih karena visual yang menyerupai tanah pedel. Penambahan limestone pada tanah dapat meningkatkan kuat tekan bebas dan kuat geser pada tanah serta mereduksi kadar air berlebih pada tanah (Ibrahim *et al.*, 2020; Ewa *et al.*, 2023; Hassan, 2023). Penambahan *silica fume* sebagai bahan

tambah juga dapat meningkatkan kinerja mekanis tanah, di mana terjadi peningkatan nilai kuat tekan, kuat geser dan California Bearing Ratio (CBR) pada tanah (Jiang *et al.*, 2021; Sufa *et al.*, 2022; Zaini and Hasan, 2023)

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai pengaruh stabilisasi tanah lunak menggunakan tanah pedel dan *silica fume* melalui pengujian triaxial dan *Unified Compressive Strength* (UCS). Penelitian ini akan berfokus pada analisis perubahan mekanis dan kimiawi yang terjadi pada tanah akibat penambahan bahan aditif. Sebelumnya, belum terdapat studi yang membahas kinerja mekanis dan kimiawi tanah pedel sebagai material stabilisasi, maka penelitian ini memiliki nilai kebaruan yang hasilnya diharapkan dapat diterapkan pada permasalahan tanah lunak di Indonesia, khususnya di Pulau Jawa, dengan mengoptimalkan pemanfaatan tanah pedel dan *silica fume* sebagai material stabilisasi yang berkelanjutan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Material

Penelitian ini menggunakan 3 material utama yaitu tanah asli yang berasal dari Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah, tanah asli yang digunakan tergolong kedalam jenis tanah lempung lunak berdasarkan sebaran tanah lunak di Indonesia tahun 2019 (Wardoyo *et al.*, 2019) Tanah Pedel yang digunakan sebagai bahan stabilisasi diambil dari Kabupaten Bojonegoro, Jawa Tengah. Tanah pedel memiliki tekstur dan visual menyerupai limestone, di mana limestone memiliki kandungan yang didominasi oleh kalsium oksida (CaO) (Ibrahim *et al.*, 2020; Ewa *et al.*, 2023; Mustafa *et al.*, 2021). *Silica fume* juga digunakan sebagai bahan tambah dalam penelitian ini, di mana lebih dari 90% kandungan silika amorf (SiO<sub>2</sub>) yang terdapat di dalam *silica fume* (Yaniam *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; Al-Gharbawi *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2020).

### 2.2 Pembuatan Sampel

Penelitian diawali dengan pembuatan benda uji melalui pengeringan tanah asli, kemudian tanah asli dicampurkan dengan air pada kadar air optimum dan bahan tambah. Tanah pedel ditambahkan berdasarkan berat basah tanah dengan variasi 3%, 6%, 9%, dan 12%. Selanjutnya, persentase tanah pedel optimum dipilih untuk dicampur dengan *silica fume* 7,5%. Pembuatan benda uji dilakukan dengan mencetak tanah menggunakan tabung silinder berukuran tinggi 76 mm dan diameter 38 mm yang kemudian diuji kuat tekannya melalui pengujian *Unified Compressive Strength* (UCS) dan uji kuat geser melalui pengujian Triaksial *Undrained-Unconsolidated*. Proses Pengujian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Proses Pembuatan Benda Uji

### 2.3 Metode Pengujian

Metode pengujian pada penelitian ini berfokus pada pengujian *Unified Compressive Strength* (UCS) dan pengujian Triaksial *Undrained-Unconsolidated* yang kemudian didukung dengan pengujian *Energy Dispersive X ray Fluorescence Spectroscopy* (ED-XRF) untuk mendapatkan kandungan kimiawi tanah pedel yang sebelumnya belum diketahui. Metode pengujian dijabarkan sebagai berikut:

#### A. Pengujian *Unified Compressive Strength* (UCS)

Pengujian UCS dilaksanakan mengacu pada ASTM D 2216-13, dengan prinsip di mana benda uji diberi tekanan secara vertikal yang diikuti dengan pembacaan beban pada waktu waktu tertentu hingga benda uji mengalami keruntuhan. Pengujian ini digunakan untuk menentukan kuat tekan bebas tanah ( $q_u$ ), yang selanjutnya digunakan untuk mengestimasi kuat geser tak terdrainase atau kohesi ( $c_u$ ) pada tanah. Persamaan yang digunakan dalam pengujian UCS dijabarkan pada beberapa parameter berikut.

$$q_u = \frac{P_{maks}}{A_i} \quad (1)$$

Keterangan

$\Delta\sigma_i$  = Tegangan ke-i ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_{maks}$  = Beban axial maksimum (kg)

$A_i$  = Luas permukaan benda uji terkoreksi regangan ke-i ( $\text{cm}^2$ )

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (2)$$

Keterangan

$c$  = Kohesi tanah ( $\text{kg/cm}^2$ )

#### B. Pengujian Triaksial *Undrained-Unconsolidated*

Jenis pengujian triaksial *undrained-unconsolidated* berarti pengujian yang tidak mengizinkan terjadinya konsolidasi dan drainase pada sampel tanah, Pengujian ini mengacu pada ASTM 2850 – 87 di mana beban beban *cell* dan beban deviator diberikan kepada beban yang dilapisi oleh membran karet di sekeliling benda uji untuk mencegah terjadinya drainase selama masa pengujian. Persamaan yang digunakan dalam pengujian triaksial dijabarkan pada beberapa parameter sebagai berikut.

$$\Delta\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (3)$$

Keterangan

$\Delta\sigma_i$  = Tegangan deviator untuk regangan ke-i ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_i$  = Beban axial (terkalibrasi) untuk regangan ke-i (kg)

$A$  = Luas penampang rata-rata ( $\text{cm}^2$ )

$$\sigma_{fi} = \sigma_{3i} + \Delta\sigma_i \quad (4)$$

Keterangan

$\sigma_{fi}$  = Tegangan axial runtuh dari benda uji ke-i ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma_{3i}$  = Tegangan keliling dari benda uji ke-i ( $\text{kg/cm}^2$ )

$$OC_i = \frac{\sigma_{1i} + \sigma_{1i}}{2} \quad (5)$$

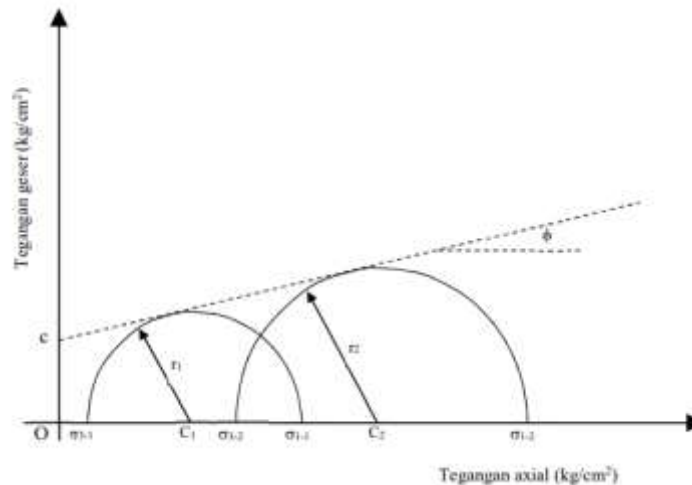
$$r_i = \frac{\sigma_{1i} + \sigma_{3i}}{2} \quad (6)$$

Keterangan

$OC_i$  = Jarak Pusat Lingkaran ( $\text{kg/cm}^2$ )

$r_i$  = Jari Jari Lingkaran Mohr

Dari persamaan 5 dan 6 dapat digambar lingkaran mohr yang ditampilkan pada Gambar 3, sehingga didapatkan nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser tanah ( $\phi$ ).



Gambar 3 Lingkaran Mohr

Sumber: (Das *et al.*, 1995)

Dari Gambar 3 di atas, nilai kohesi ( $c$ ) adalah jarak vertikal dari pusat sumbu ke titik potong garis singgung kedua lingkaran sumbu vertikal, sedangkan nilai Sudut geser dalam ( $\phi$ ) adalah sudut kemiringan garis singgung kedua lingkaran terhadap sumbu horizontal.

### C. Pengujian *Energy Dispersive Xray Fluorescence Spectroscopy* (ED-XRF)

Pengujian XRF bertujuan untuk mengetahui variasi unsur kimia serta persentase kandungan tiap unsur dalam sampel (Nengsih *et al.*, 2022) dengan memanfaatkan *detector* SDD untuk mendeteksi sinar-X sekunder yang muncul setelah sampel dieksitasi. Instrumen ini bekerja dengan membedakan energi foton, menentukan unsur spesifik berdasarkan letak energi khususnya, serta menentukan kadar suatu unsur berdasarkan jumlah foton yang terdeteksi (Xing *et al.*, 2022; Nurbia and Affandi, 2024).

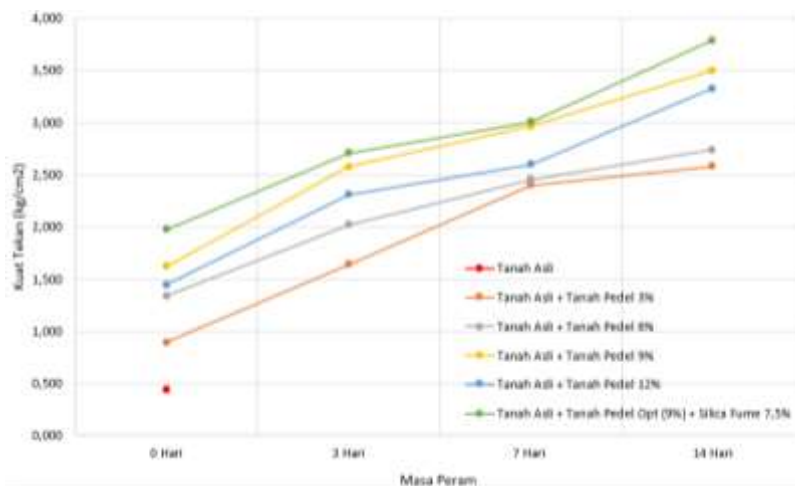
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Pengujian *Unified Compressive Strength* (UCS)

Hasil pengujian *Unified Compressive Strength* (UCS) pada tanah asli dan tanah dengan campuran disajikan pada Tabel 1 di mana nilai kuat tekan bebas ( $qu$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan nilai kohesi ( $cu$ ) diperoleh dari persamaan 2. Nilai pada Tabel 1 kemudian divisualisasikan kedalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 1 Hasil pengujian *unified compressive strength* (UCS)

No	Variasi	Peram (Hari)	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Tanah Asli	-	0,442	0,221
		0	0,892	0,446
2	Tanah Asli + Tanah Pedel 3%	3	1,640	0,820
		7	2,398	1,199
		14	2,578	1,289
3	Tanah Asli + Tanah Pedel 6%	0	1,334	0,667
		3	2,019	1,010
		7	2,450	1,225
4	Tanah Asli + Tanah Pedel 9%	14	2,735	1,368
		0	1,620	0,810
		3	2,574	1,287
5	Tanah Asli + Tanah Pedel 12%	7	2,961	1,481
		14	3,499	1,749
		0	1,446	0,723
6	Tanah Asli + Tanah Pedel 9% + <i>Silica fume</i> 7,5%	3	2,308	1,154
		7	2,596	1,298
		14	3,325	1,662
6	Tanah Asli + Tanah Pedel 9% + <i>Silica fume</i> 7,5%	0	1,975	0,987
		3	2,705	1,353
		7	3,006	1,503
		14	3,786	1,893



Gambar 4 Grafik Hasil Uji *Unconfined Compressive Strength* (UCS)

Berdasarkan uji *Unconfined Compressive Strength* (UCS) pada Gambar 4, diperlihatkan bahwa nilai kuat tekan bebas ( $q_u$ ) tanah seiring dengan penambahan tanah pedel hingga persentase 9% dengan nilai kuat tekan bebas ( $q_u$ ) tanah pada masa peram 0 hari sebesar 1,62 kg/cm<sup>2</sup> dan selama masa peram, di mana nilai meningkat 266% dibandingkan dengan kuat tekan bebas tanah asli dengan nilai 0,442 kg/cm<sup>2</sup>. Kekuatan tanah semakin meningkat hingga 3,499 kg/cm<sup>2</sup> selama 14 hari masa peram atau meningkat 116% jika dibandingkan dengan masa peram 0 hari. Persentase penambahan tanah pedel 9% ini kemudian digunakan kembali untuk dikombinasikan dengan *silica fume* dengan persentase 7,5%, hingga dihasilkan kuat tekan bebas maksimum sebesar 1,975 kg/cm<sup>2</sup> pada masa peram 0 hari di mana terjadi peningkatan 22% jika dibandingkan dengan tanah asli dan 9% tanah pedel. Sesuai pada buku berjudul *An Introduction Soil Mechanics* (Holtz dan

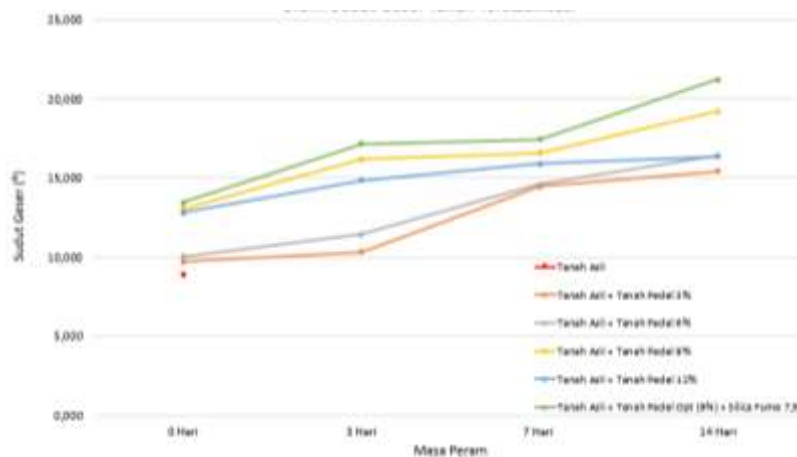
Kovacs., 1981), peningkatan nilai kuat tekan bebas ( $qu$ ) ini mengindikasikan peningkatan kohesi ( $cu$ ). Di sisi lain, hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian terdahulu di mana peningkatan kuat tekan bebas pada tanah dapat tercapai dengan ditambahkan bahan limestone dan *silica fume* (Ibrahim *et al.*, 2020; Ewa *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2021).

### 3.2 Pengujian Triaksial *Undrained-Unconsolidated*

Hasil pengujian triaksial *undrained-unconsolidated* diperoleh nilai tegangan dan regangan yang selanjutnya dilakukan penggambaran lingkaran mohr seperti yang terlihat pada Gambar 3 untuk memperoleh nilai kohesi ( $cu$ ) dan sudut geser tanah ( $\phi$ ). Hasil pengujian triaksial pada tanah asli dan tanah dengan campuran ditampilkan pada Tabel 2 yang kemudian nilai pada Tabel 2 divisualisasikan kedalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 2 Hasil pengujian triaksial *undrained-unconsolidated*

No	Variasi	Peram (Hari)	$Cu$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	Tanah Asli	-	0,292	8,889
		0	0,533	9,683
2	Tanah Asli + Tanah Pedel 3%	3	0,608	10,302
		7	1,047	10,302
		14	1,117	15,401
3	Tanah Asli + Tanah Pedel 6%	0	0,751	10,003
		3	0,856	11,431
		7	1,111	14,575
4	Tanah Asli + Tanah Pedel 9%	14	1,199	16,365
		0	0,776	13,022
		3	0,904	16,181
5	Tanah Asli + Tanah Pedel 12%	7	1,083	16,564
		14	1,157	19,167
		0	0,696	12,787
6	Tanah Asli + Tanah Pedel 9% + <i>Silica fume</i> 7,5%	3	0,840	14,819
		7	0,993	15,872
		14	1,056	16,346
		0	0,849	13,422
		3	0,973	17,149
		7	1,114	17,437
		14	1,203	21,182



Gambar 5 Grafik Sudut Geser Tanah Terstabilisasi

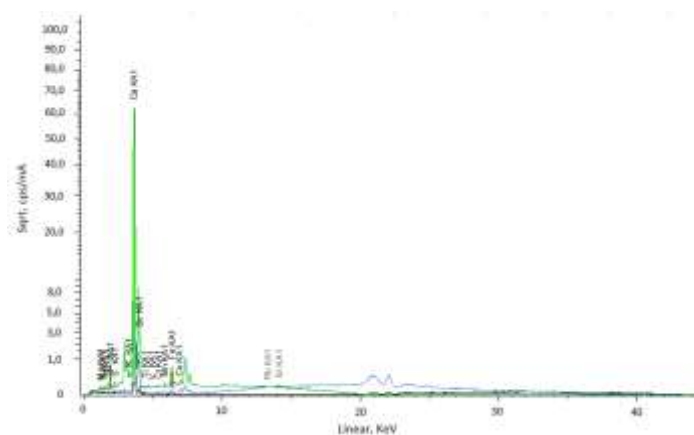
Pada Gambar 5, diperoleh nilai kohesi dan sudut geser maksimum dihasilkan dari campuran tanah dan tanah pedel 9% dengan nilai kohesi ( $c_u$ ) dan sudut geser ( $\phi$ ) berturut turut 0,76 kg/cm<sup>2</sup> dan 13,22° pada masa peram 0 hari, kemudian meningkat hingga 49% pada masa peram ke 14 hari untuk nilai kohesi ( $c_u$ ) dan meningkat hingga 47% pada masa peram 14 hari untuk nilai sudut geser tanah ( $\phi$ ). Penambahan *silica fume* 7,5% juga meningkatkan nilai kuat tekan bebas tanah hingga 1,203 kg/cm<sup>2</sup> dan kuat geser hingga 21,182° pada masa peram 14 hari, kedua nilai ini meningkat 4% dan 10% berturut turut jika dibandingkan dengan campuran tanah dan tanah pedel 9% pada masa peram yang sama.

### 3.3 Analisis Kinerja Kimiawi

Meningkatnya kekuatan tanah pada tanah yang dicampur dengan bahan tambah mengindikasikan terjadinya perubahan komposisi material dan terjadi reaksi pada mineral mineral di dalam material tercampur. Pada tanah pedel dilakukan pengujian *Energy Dispersive X Ray Fluorescence Spectroscopy* (ED-XRF) yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 3 dan Gambar 6.

Tabel 3 Kandungan Mineral Tanah Pedel

Formula	Concentration (%)	Peak Position (keV)	Compound
CaO	93.15	3.692	Calcium Oxide
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.17	1.487	Aluminum Oxide
SiO <sub>2</sub>	1.18	1.740	Silicon Oxide
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68	6.404	Iron Oxide
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	4.090	Scandium Oxide
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	2.014	Phosphorus Oxide
K <sub>2</sub> O	0.07	3.314	Potassium Oxide
MnO	0.05	5.899	Manganese Oxide
TiO <sub>2</sub>	0.05	4.512	Titanium Oxide
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	4.952	Vanadium Oxide
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	5.415	Chromium Oxide



Gambar 6 Hasil X-Ray Fluorescence (XRF) Spectra Tanah Pedel

Dari hasil pengujian XRF, tanah pedel mengandung material dominan berupa kalsium oksida (CaO) sebesar 93,15%, hasil pengujian ini selaras dengan pengujian XRF pada limestone, di mana pada limestone terdapat 45-72% kandungan kalsium oksida (CaO) (Ibrahim *et al.*, 2020; Ewa *et al.*, 2023; Mustafa *et al.*, 2021). Tanah lempung memiliki muatan permukaan negatif karena adanya substitusi isomorfik

pada mineral lempung, saat ditambahkan tanah pedel yang dominan mengandung kalsium Oksida (CaO), tanah pedel akan melepaskan ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) yang bermuatan positif untuk mengikat lempung bermuatan negatif, Akibatnya gaya tolak menolak elektrostatis antar partikel lempung berkurang, sehingga antar partikel bisa lebih mengikat, proses ini mengubah struktur tanah lempung yang semula bersifat dispersif menjadi lebih padat dan stabil.

Saat ditambahkan dengan *silica fume*, kekuatan tanah kembali meningkat, hal tersebut terjadi dikarenakan kandungan *silica fume* yang didominasi oleh senyawa silika amorf ( $\text{SiO}_2$ ). Senyawa silika ini bereaksi dengan ion kalsium pada tanah yang sudah dicampurkan tanah pedel melalui reaksi pozzolan. Reaksi pozzolan dapat terjadi jika bereaksi dengan air, di mana senyawa kalsium, silika yang diberi air akan mengalami reaksi hidrasi sehingga menciptakan *calcium silicate hydrate* (CSH). Senyawa ini berperan besar dalam meningkatkan kuat tekan bebas dan kekuatan struktur tanah.

## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian UCS dan triaksial diperoleh persentase penambahan tanah pedel 9% merupakan persentase paling optimal dibandingkan variasi campuran tanah pedel lainnya, di mana selama 14 hari masa peram kuat tekan bebas tanah meningkat 691% dibandingkan dengan tanah asli. Pada variasi dan masa peram yang sama peningkatan juga terjadi pada parameter kohesi dan sudut geser tanah di mana terjadi peningkatan kohesi hingga 296% dan sudut geser tanah sebesar 115%. Penambahan *silica fume* sebanyak 7,5% dikombinasikan pada persentase tanah pedel optimum yaitu 9%. Pengaruh penambahan *silica fume* 7,5% juga memberikan pengaruh positif pada nilai kuat tekan bebas, dan kuat geser tanah. Peningkatan kuat tekan bebas tanah meningkat hingga 756% pada masa peram hari ke 14 jika dibandingkan dengan kuat tekan bebas tanah asli tanpa campuran. Nilai kohesi dan sudut geser tanah juga meningkat pada variasi dan masa peram yang sama berturut turut hingga 311% dan 138%. Peningkatan kekuatan tanah terjadi karena adanya reaksi kimiawi, di mana tanah pedel dengan kandungan kalsium (CaO) hingga 93,15% mengikat mineral lempung negatif dan kandungan silika amorf ( $\text{SiO}_2$ ) yang tinggi pada *silica fume* akan bereaksi dengan kalsium pada tanah pedel dan menciptakan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) yang berperan dalam meningkatkan kekuatan ikatan antar tanah.

### 4.2 Saran

variasi paling optimal dalam meningkatkan kuat tekan, kohesi, dan sudut geser tanah. Oleh karena itu, persentase ini dapat direkomendasikan sebagai acuan awal dalam aplikasi perbaikan tanah lunak di lapangan. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi kadar tanah pedel dan *silica fume* yang lebih beragam, serta masa peram lebih panjang untuk mengetahui perkembangan kekuatan tanah dalam jangka panjang.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

### Daftar Kepustakaan

- Al-Gharbawi, A.S.A., Najemalden, A.M. and Fattah, M.Y., 2023. Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(1).
- Aryanto, M., Suhendra, S. and Amalia, K.R., 2021. Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Kapur Tohor. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(1), pp.38–43. Available at: DOI 10.33087/talentasipil.v4i1.47.
- Brescia-Norambuena, L. et al., 2021. Improving concrete underground mining pavements performance through the synergic effect of silica fume, nanosilica, and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 285.
- Das, B.M., Endah, N. and Mochtar, I.B., 1995. *Mekanika Tanah Jilid 1(Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)*, Erlangga.
- Ewa, D.E., Egbe, E.A., Ukpata, J.O. and Etika, A., 2023. Sustainable subgrade improvement using limestone dust and sugarcane bagasse ash. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 2(1). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100028>.
- Falah, M.W. and Muteb, H., 2023. Applying different soil stabilization mechanisms: a review. *Archives of Civil Engineering*, 69(4), pp.339–358. Available at: <https://doi.org/10.24425/ace.2023.147663>.
- Hamada, H.M. et al., 2023. Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24(1), pp.8887–8908. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.147>.
- Haris, H., Adawiyah, R. and Gazali, A., 2023. Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Campuran Abu Sekam Padi Dan Semen Di Tinjau Terhadap Nilai CBR Di Kecamatan Marabahan Kabupaten Barito Kuala. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 6(1), pp.74–86. Available at: <http://dx.doi.org/10.31602/jk.v6i1.11648>.
- Hassan, H.J.A., 2023. Utilizing Glass Powder and Limestone Dust as An Alternative to Portland Cement for Stabilization of Clayey Soils. *The Journal of Duhok University*, 26(2), pp.189–200. Available at: <https://journal.uod.ac/index.php/uodjournal/article/view/3058>.
- He, K. et al., 2024. Experimental Study on the Effect of the Displacement Rate on the Shear Strength of Coastal Soft Soil. *Buildings*, 14(11), p.3491. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings14113491>.
- Ibrahim, H.H. et al., 2020. Improving the geotechnical properties of high expansive clay using limestone powder. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), p.112. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00366-z>.
- Jiang, N. et al., 2021. Strength characteristics and microstructure of cement stabilized soft soil admixed with silica fume. *Materials*, 14(8), pp.1–11. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma14081929>.
- Mustafa, Y.M.H. et al., 2021. Utilization of Portland cement with limestone powder and cement kiln dust for stabilization/solidification of oil-contaminated marl soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), pp.3196–3216. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10590-w>.
- Nengsih, R.F. et al., 2022. Identification of Clay Element Content in Fabric Dyeing Process Using X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Jurnal Fisika*, 12(1), pp.9–5. Available at: <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jf/index>.
- Nurbia and Affandi, S., 2024. Identifikasi Unsur Penyusun Sedimen Sungai Klagison Kota Sorong Papua Barat Daya Menggunakan Metode X-Ray Fluorescence (XRF). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(1), pp.207–211.

- Reiterman, P. et al., 2022. Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization. *Case Studies in Construction Materials*, 16(1). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00900>.
- Rivera, J.F., Orobio, A., Mejía De Gutiérrez, R. and Cristelo, N., 2020. Clayey soil stabilization using alkali-activated cementitious materials. *Materiales de Construcción*, 70(337), pp.1–12. Available at: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.07519>.
- Sampathkumar, V. et al., 2024. Strength Characteristics of Bentonite Nano Clay Stabilized with Addition of Lime, Fly Ash, and Silica Fume for Soil Environmental Sustainability. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 13(2), pp.160–167.
- Singh, P., Dash, H.K. and Samantaray, S., 2020. Effect of silica fume on engineering properties of expansive soil. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Elsevier Ltd, pp. 5035–5040.
- Sufa, I.F., Ardalli, J.K., Soedarsono and Fitriyana, L., 2022. Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Penambahan Bahan Silica Fume dan Limbah Gypsum. *Konstelasi Ilmiah Mahasiswa Unissula 7 (KIMU 7)*. 19 January 2022 pp. 257–264.
- Syahril et al., 2025. Improvement of Clay Properties with Calcite and Silica Fume: Shear and Unconfined Compressive Strength Focus., 52(1). Available at: <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.52.1.5>.
- Umar, I.H., Lin, H. and Ibrahim, A.S., 2023. Laboratory Testing and Analysis of Clay Soil Stabilization Using Waste Marble Powder. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(16). Available at: <https://doi.org/10.3390/app13169274>.
- Wang, X. et al., 2020. Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 237. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117514>.
- Wardoyo et al., 2019. *Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia*,
- Xing, Y. et al., 2022. Evaluation of 20 Elements in Soils and Sediments by ED-XRF of Monochromatic Excitation. *Metals*, 12(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/met12111798>.
- Yaniam, Y., Kalita, A., Tashi, K. and Perme, T., 2024. A review on Comparative study of using Silica Fume and Areca Fiber on Soil Stabilization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1365(1). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1365/1/012002>.
- Zaini, M.S.I. and Hasan, M., 2023. Effectiveness of Silica Fume Eggshell Ash and Lime Use on the Properties of Kaolinitic Clay. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 13(4).
- Zhang, J., Pei, X., Zhang, G. and Wei, L., 2023. Experimental studies on mechanical and expansion characteristics of cement-stabilized saline soil reinforced with activated silica fume. *Case Studies in Construction Materials*, 19.