

Dampak Penggunaan Abu Marmer terhadap Kuat Geser Tanah Lempung

Aazokhi Waruwu*, Calvin Setiawan, Clarissa Tanton, Mario Endrico Boediono

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan,
Jl. MH Thamrin Boulevard 1100, Kelapa Dua, Kec. Kelapa Dua, Kota Tangerang, Banten, Indonesia 15811

Abstrak

Tanah merupakan suatu bagian terpenting dalam struktur bangunan karena memiliki fungsi sebagai penopang dari bangunan. Kestabilan tanah harus diperhatikan agar konstruksi bangunan aman dan tahan lama. Jenis tanah lempung ada yang memiliki nilai plastisitas yang tinggi dan kuat geser yang rendah. Tanah seperti ini memerlukan stabilisasi dengan penambahan bahan tambah seperti abu marmer. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui penambahan kadar abu marmer yang memberikan dampak optimal dalam memperbaiki sifat plastisitas, kepadatan, dan kuat geser. Bahan tambah yang digunakan adalah abu marmer dengan kadar 3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat tanah kering. Benda uji dibedakan berdasarkan umur pemeraman sebelum diuji dengan triaksial. Berdasarkan dari hasil penelitian didapatkan bahwa penggunaan abu marmer memberikan dampak maksimal dalam memperbaiki sifat plastisitas dan kepadatan maksimal pada penambahan sebanyak 6%. Hal ini diikuti dengan peningkatan kuat geser yang signifikan pada penambahan yang sama. Umur pemeraman yang baik dalam meningkatkan sudut gesek dalam tanah didapatkan pada 14 hari.

Kata kunci: stabilisasi tanah; abu marmer; kuat geser; sudut gesek dalam tanah

Abstract

[Title: The Impact of Using Marble Ash on the Shear Strength of Clay Soil] Soil is an important part of the building structure because it has a function as a support for the building. Soil stability must be considered so that building construction is safe and durable. There are types of clay soils that have high plasticity values and low shear strength. Soils like this require stabilization with the addition of additives such as marble ash. The purpose of this study was to determine whether the addition of marble ash content has an optimal impact on improving the plasticity, density, and shear strength properties. The added material used was marble ash with a content of 3%, 6%, 9%, and 12% by weight of dry soil. The specimens were differentiated based on their curing age before being tested by triaxial. Based on the research results, it was found that the use of marble ash had the maximum impact on improving the plasticity properties and maximum density at an addition of 6%. This was followed by a significant increase in shear strength at the same addition. A good curing age for increasing the angle of internal friction in the soil was obtained at 14 days.

Keywords: soil stabilization; marble ash; shear strength; angle of internal friction

1. Pendahuluan

Tanah memiliki peranan penting dalam dunia konstruksi sebagai material pendukung pondasi dari sebuah aplikasi beban bangunan yang berdiri di atasnya, sehingga diperlukan tanah yang memiliki sifat-sifat yang memadai. Tanah di Indonesia sendiri, memiliki jenis dan

sifat-sifat fisis maupun mekanis yang beragam sehingga tidak jarang ditemukan permasalahan-permasalahan di dalamnya. Salah satu permasalahan yang banyak ditemukan yaitu tanah yang memiliki sifat kembang susut yang tinggi dan memiliki sensitivitas terhadap air yang tinggi, yaitu tanah lempung ekspansif (Setyono dkk. 2018). Tanah lempung merupakan tanah yang memiliki ukuran butiran yang sangat kecil sampai dengan sub mikroskopik (Lay, 2019). Jenis tanah

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: aazokhi.waruwu@uph.edu

lempung lunak termasuk dalam tanah bermasalah bila digunakan sebagai tanah dasar konstruksi, sehingga memerlukan perhatian dalam penanganannya sebelum pembangunan konstruksi bangunan (Naibaho dan Waruwu, 2021). Tanah seperti ini memerlukan penanganan khusus dengan cara menstabilisasikan sifat tanah tersebut.

Stabilisasi tanah merupakan suatu usaha yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat tanah dengan cara menambahkan suatu bahan ke dalam tanah (Polii dkk. 2018). Stabilisasi tanah dapat dilakukan dengan berbagai cara, baik cara mekanik, kimia, maupun kombinasi dari keduanya. Secara mekanik dilakukan dengan menambahkan butiran partikel yang tidak terdapat di dalam tanah, sedangkan secara kimia dapat dilakukan dengan menambahkan bahan kimia ke dalam tanah (Nasarani dkk. 2019)..

Metode stabilisasi tanah secara kimia dilakukan dengan cara mencampurkan tanah dengan bahan tambah seperti abu batu bata, abu batubara, kapur, dan semen (Gustin dan Ridwan 2017; Lay 2019; Pasmardkk. 2022; Polii dkk. 2018; Wardani dkk. 2018; Zumrawi dan Abdalla 2018; Setyono dkk. 2018; Yilmaz dan Demir 2021). Sebagian besar bahan-bahan ini menghasilkan perbaikan karakteristik tanah yang lebih baik. Namun biaya yang dikeluarkan relatif tinggi sehingga dilakukan usaha untuk mencari bahan alternatif seperti limbah marmer sebagai bahan pengganti material stabilisasi. Material ini tidak memerlukan biaya yang tinggi karena diambil dari bahan limbah pabrik marmer.

Serbuk marmer memiliki unsur hampir sama dengan bahan kapur dikarenakan marmer berasal dari kapur yang mengalami proses metamorfosa batuan. Selain itu serbuk marmer mengandung CaO sebagai senyawa yang sangat efektif digunakan untuk stabilisasi yang dimana senyawa ini sangat baik digunakan sebagai pengering untuk tanah yang basah (Indriyanti dan Kasmawati 2018). Penggunaan abu marmer perlu dipertimbangkan sebagai bahan stabilisasi tanah yang efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lempung



Gambar 1. Abu marmer dari limbah marmer

(Pasmardkk. 2022; Setyono dkk. 2018). Campuran abu marmer diharapkan dapat meningkatkan ikatan antar butiran tanah menjadi lebih baik dan lebih kuat. Ikatan antar butir tanah dapat diketahui lebih lanjut melalui uji kuat geser pada sampel tanah. Menurut (Muhyi dkk. 2022), uji kuat geser pada umumnya terdapat tiga jenis yaitu uji geser langsung (*direct shear test*), uji triaksial (*triaxial test*) dan uji tekan bebas (*unconfined compression test*). Pardoyo dkk. (2021) menyarankan kuat geser tanah dapat diuji menggunakan kuat geser langsung. Kuat geser tanah lempung lunak yang diberi perkuatan mengalami peningkatan dibandingkan tanah lempung tanpa perkuatan (Waruwu dan Waruwu 2021). Namun, solusi alternatif dalam perbaikan kuat geser tanah perlu dipertimbangkan melalui penggunaan bahan limbah untuk mengurangi dampak lingkungan.

Berdasarkan penelitian sebelumnya pemanfaatan abu marmer sebagai bahan stabilisasi khususnya untuk meningkatkan kuat geser tanah, masih jarang dilakukan. Penelitian sebelumnya dilakukan pada pengaruh abu marmer terhadap nilai kuat tekan dan CBR tanah, sedangkan pada penelitian fokus pada kuat geser tanah menggunakan hasil uji triaksial. Peningkatan kuat geser perlu ditinjau pada tanah tanah yang diperbaiki dengan limbah abu marmer. Melalui pengujian kuat geser diharapkan dapat mengetahui dampak penggunaan abu marmer sebagai bahan stabilisasi terhadap perubahan parameter kuat geser tanah. Penelitian ini berfokus pada uji kuat geser dari tanah menggunakan alat uji *triaxial*. Melalui pengujian *triaxial* tersebut didapatkan parameter kohesi dan sudut gesek dalam yang berkaitan langsung dengan kestabilan tanah (Susilo dkk. 2018). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dampak penambahan abu marmer terhadap sifat plastisitas tanah, kepadatan tanah, dan kuat geser tanah. Penelitian ini diharapkan dapat menentukan penambahan kadar abu marmer yang optimal dalam meningkatkan kuat geser tanah lempung.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, Karawaci, Tangerang. Penelitian ini dilakukan dengan pengambilan sampel tanah dan material yang nantinya akan diperiksa dan dilakukan pengujian. Material penelitian terdiri dari tanah lempung yang diambil dari proyek Meikarta, Cikarang dan abu marmer diambil dari PT. Jaya Abadi Granita, Serang. Abu marmer sebagai bahan stabilisator tanah seperti terlihat pada Gambar 1.

Sifat plastisitas tanah lempung diuji menggunakan uji *Atterberg limit* untuk mengetahui batas cair (*LL*) dan indeks plastisitas (*PI*). Tanah dari lapangan dikeringkan dan disaring melewati saringan No. 40 sebelum dilakukan pengujian kompaksi. Tanah

yang telah disaring kemudian diuji dengan kompaksi dan kuat geser tanah. Pengujian kompaksi atau sering disebut dengan pengujian kepadatan tanah ini dilakukan dengan menggunakan metode *standard proctor* sesuai dengan ASTM D1557 dengan menggunakan sampel tanah sebanyak 10 kg dibagi menjadi menjadi 5 sampel tanpa dan dengan abu marmer. Kadar abu marmer yang digunakan sebagai stabilisator adalah sebesar 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12%. Bahan tambah untuk stabilisasi tanah menggunakan kapur 3-9%, semen 3-10%, dan abu terbang 10-25% (Hardiyatmo, 2020). Kadar air optimum dan kepadatan maksimum didapatkan dari hasil uji kompaksi.

Benda uji untuk kuat geser dicampur sedemikian menggunakan kadar air optimum dari uji kompaksi. Pengujian kuat geser tanah dilakukan dengan menggunakan alat triaksial seperti yang terlihat pada Gambar 2. Alat ini dapat menguji sampel tanah dengan menerapkan beban secara aksial (Ningrum dan Nawir 2019). Selain tinjauan terhadap kadar abu marmer, waktu pemeraman sampel juga menjadi bagian dari penelitian ini. Waktu pemeraman yang diteliti adalah 1 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Lankaran dkk. (2022) menyatakan bahwa kuat geser tanah mengalami peningkatan kuat geser yang luar biasa pada pemeraman 7-28 hari, ini disebabkan karena dalam waktu itu terjadi penyatuan tanah dengan bahan tambah dan bidang kontak tanah dengan campuran semakin banyak. Variasi uji dan jumlah sampel untuk pengujian triaksial dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil uji kuat geser didapatkan parameter kuat geser baik nilai kohesi maupun sudut

gesek dalam tanah. Perilaku lainnya yang didapatkan dari pengujian ini dapat dilihat dari hubungan tegangan-regangan dan hubungan kadar abu marmer dan tegangan deviator untuk menggambarkan kuat geser tanah terhadap beban aksial.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, maka diuraikan beberapa hasil dan pembahasan terkait sifat plastisitas tanah, kepadatan tanah, dan kuat geser tanah termasuk pengaruh kadar abu marmer dan waktu pemeraman terhadap perubahan parameter kuat geser baik kohesi maupun sudut gesek dalam tanah.

3.1. Hasil Uji Sifat Plastisitas Tanah

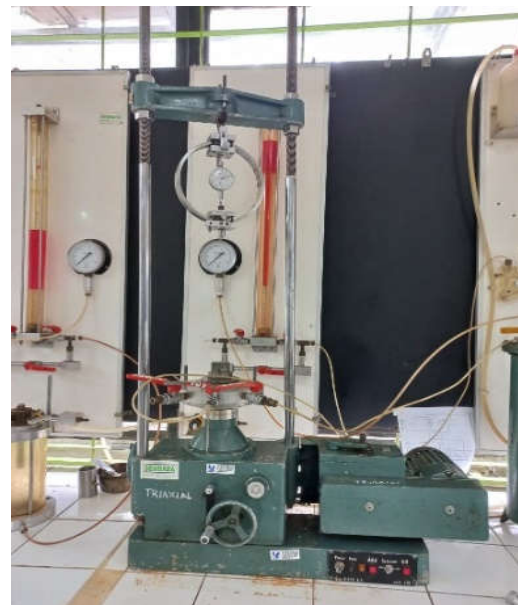
Berdasarkan hasil uji saringan didapatkan bahwa tanah berbutir halus yang lolos saringan No.200 adalah sebesar 70,23%. Hasil uji *Atterberg limit* untuk mendapatkan nilai batas cair (*LL*) dan indeks plastisitas (*PI*) dapat dilihat pada Gambar 3. Tanah lempung tanpa tambahan abu marmer menunjukkan nilai dengan batas cair sebesar 49,11% dan nilai indeks plastisitas sebesar 33,82%, nilai *PI* > 17% termasuk tanah lempung dengan plastisitas tinggi (Hardiyatmo 2002; Darmawandi dkk. 2020). Akan tetapi penambahan abu marmer sebanyak 6-12% dapat mengubah sifat plastisitas lempung menjadi sedang dengan *PI* antara 7-17%. Dengan demikian, abu marmer memberi dampak pada perubahan sifat plastisitas tanah apabila menggunakan abu marmer di atas 6%.

3.2. Hasil Uji Kompaksi

Hasil uji kompaksi pada tanah asli dan tanah dengan tambahan abu marmer ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Sampel uji triaksial

Sampel ID	Abu marmer (%)	Waktu (hari)	Jumlah Sampel
Tr01	0%	1	3
Tr3%1	3%	1	3
Tr3%7	3%	7	3
Tr3%14	3%	14	3
Tr3%28	3%	28	3
Tr6%1	6%	1	3
Tr6%7	6%	7	3
Tr6%14	6%	14	3
Tr6%28	6%	28	3
Tr9%1	9%	1	3
Tr9%7	9%	7	3
Tr9%14	9%	14	3
Tr9%28	9%	28	3
Tr12%1	12%	1	3
Tr12%7	12%	7	3
Tr12%14	12%	14	3
Tr12%28	12%	28	3



Gambar 2. Alat triaksial di laboratorium

Uji kompaksi menghasilkan nilai berat isi kering maksimum dan kadar air optimum. Berdasarkan pada hasil pengujian kompaksi, terdapat perubahan terhadap berat isi kering maksimum (γ_{d-maks}) dan kadar air optimum (w_{opt}) ketika dicampurkan dengan berbagai kadar abu marmer. Kepadatan tanah meningkat maksimum diikuti dengan penurunan kadar air optimum pada penggunaan abu marmer sebanyak 6%. Kadar air optimum untuk setiap campuran digunakan untuk benda uji kuat geser dengan kadar abu marmer yang sesuai. Hal ini disebabkan karena butiran-butiran tanah saling terikat akibat adanya bahan tambah abu marmer, pori tanah berkurang diikuti dengan pengurangan kadar air dan peningkatan kepadatan tanah. Berat isi kering tanah yang semakin meningkat cenderung berdampak pada kadar air yang semakin berkurang (Seyrek, 2018).

3.3. Hasil Uji Kuat Geser Tanah

Hasil uji kuat geser dengan triaksial ditunjukkan pada hubungan tegangan normal dan tegangan geser dalam bentuk lingkaran Mohr seperti pada Gambar 4. Setiap benda uji dianalisis dengan lingkaran Mohr, ini diperlukan untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah berupa nilai kohesi maupun sudut gesek dalam tanah. Jari-jari dari lingkaran Mohr ini merupakan tambahan tekanan yang diberikan di setiap benda uji sampai mengalami keruntuhan geser. Tambahan tekanan ini sering dinamakan sebagai tegangan deviator ($\Delta\sigma$).

Setiap variasi sampel diuji sebanyak 3 benda uji yang dibedakan berdasarkan tekanan sel masing-masing 100 kPa, 150 kPa, dan 200 kPa. Pola hubungan tegangan dan regangan dapat dilihat pada Gambar 5. Hubungan tegangan dan regangan di awal-awal pembebanan aksial membentuk hubungan linier dan diteruskan dengan kondisi plastis sampai runtuh dengan semakin tingginya beban yang diterapkan, hal ini menunjukkan kuat geser tanah sudah tercapai.

Hubungan kadar abu marmer terhadap tegangan deviator ($\Delta\sigma$) untuk setiap umur pemeraman benda uji ditunjukkan pada Gambar 6 sampai Gambar 9. Nilai tegangan deviator ini menunjukkan batas kemampuan tanah dalam menahan beban sebelum mengalami keruntuhan geser. Tegangan yang didapatkan sampai tanah mengalami keruntuhan geser dinamakan sebagai kuat geser tanah.

Berdasarkan hasil pengujian kuat geser

Tabel 2. Hasil uji kompaksi

Jenis Sampel	γ_{d-maks} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
Tanah asli	1,50	21,0
Tanah + 3% abu marmer	1,51	21,0
Tanah + 6% abu marmer	1,55	17,5
Tanah + 9% abu marmer	1,49	20,0
Tanah + 12% abu marmer	1,49	21,0

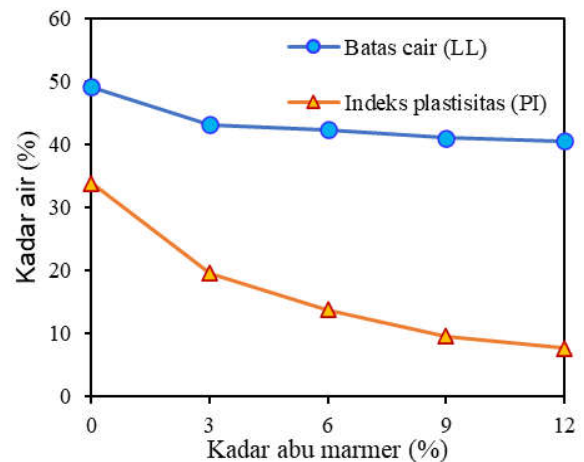
didapatkan bahwa tegangan deviator ($\Delta\sigma$) tanah meningkat secara signifikan pada 3-6% abu marmer, namun terjadi penurunan pada 9% dan sedikit meningkat pada 12% abu marmer. Ini dapat disebabkan karena kekuatan geser campuran abu marmer dalam tanah semakin meningkat akibat saling mengunci antara butiran tanah (Vigneshwar dkk., 2017). Walaupun demikian peningkatan $\Delta\sigma$ yang terjadi pada 12% abu marmer masih lebih rendah dibandingkan pada benda uji 6% abu marmer. Hal ini terjadi untuk semua umur benda uji. Peningkatan kuat geser yang signifikan pada 6% kadar abu marmer relevan dengan kepadatan tanah maksimal dan perubahan sifat plastisitas tanah pada penambahan abu marmer yang sama.

Berdasarkan peningkatan tegangan deviator ($\Delta\sigma$), maka dapat dikatakan bahwa penambahan abu marmer sebesar 6% untuk setiap umur pemeraman yang dilakukan menunjukkan dampak yang signifikan pada peningkatan kuat geser tanah. Peningkatan kuat geser pada 6% abu marmer merupakan yang tertinggi untuk semua umur pemeraman benda uji.

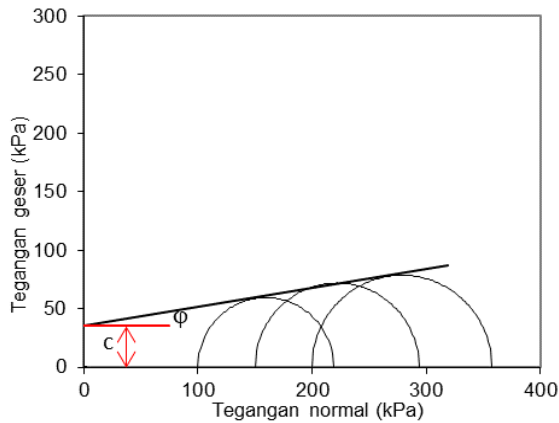
3.4. Dampak Abu Marmer terhadap Parameter Kuat Geser Tanah

Parameter kuat geser tanah terdiri dari kohesi dan sudut gesek dalam tanah. Dampak yang ditinjau pada penelitian ini terdiri dari dampak perubahan kohesi dan sudut gesek dalam tanah akibat penambahan abu marmer dan dampak yang diakibatkan oleh umur pemeraman benda uji.

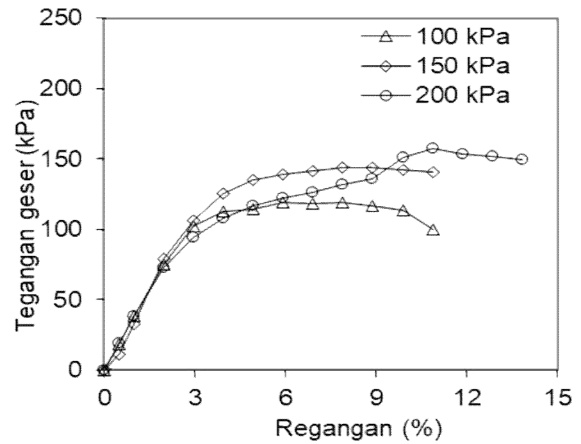
Hasil uji kuat geser pada tanah lempung tidak terganggu (*undisturbed*) menunjukkan nilai kohesi (c) sebesar 8 kPa dan sudut gesek dalam tanah (ϕ) sebesar 1°. Tanah ini termasuk tanah kohesif dan bukan tanah granuler, karena memiliki nilai ϕ yang mendekati 0. Peningkatan kedua parameter ini berdampak pada peningkatan kuat geser tanah sehingga daya dukungnya semakin lebih baik.



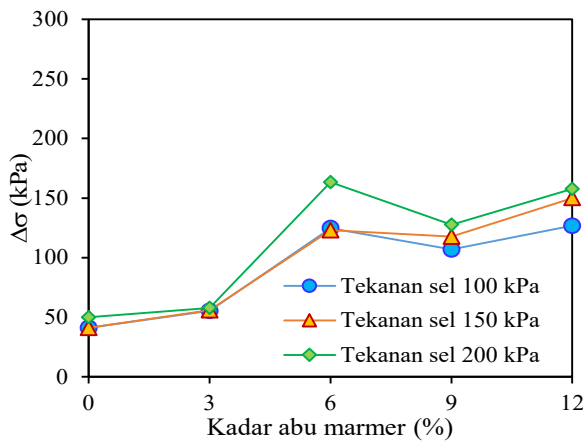
Gambar 3. Pengaruh abu marmer terhadap plastisitas tanah



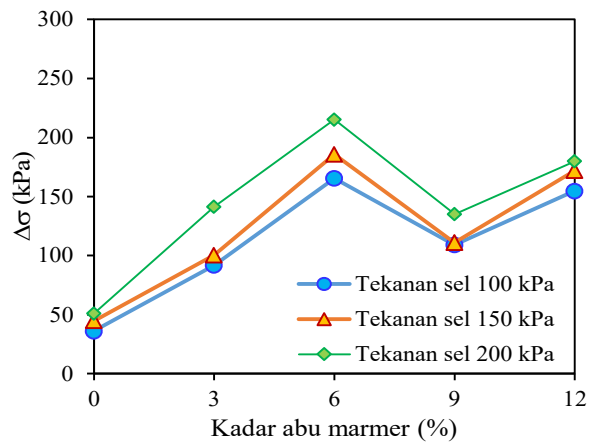
Gambar 4. Bentuk lingkaran Mohr dari pengujian triaksial



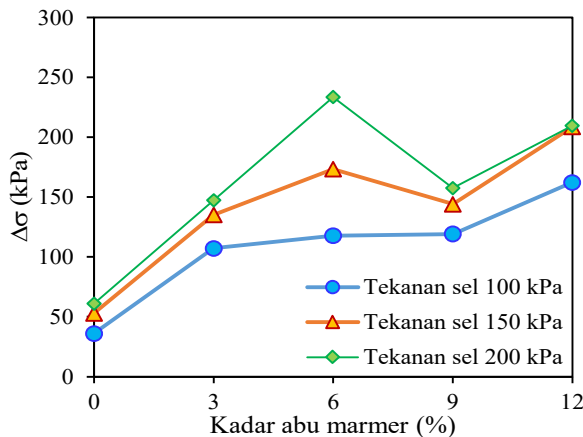
Gambar 5. Pola hubungan antara tegangan geser dengan regangan



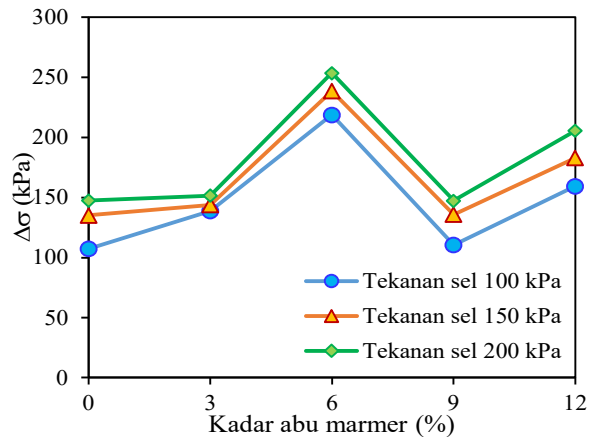
Gambar 6. Pengaruh abu marmer terhadap tegangan deviator pada pemeraman 1 hari



Gambar 7. Pengaruh abu marmer terhadap tegangan deviator pada pemeraman 7 hari



Gambar 8. Pengaruh abu marmer terhadap tegangan deviator pada pemeraman 14 hari



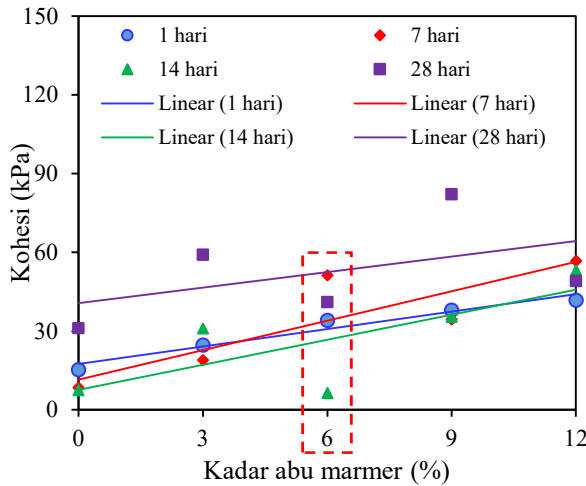
Gambar 9. Pengaruh abu marmer terhadap tegangan deviator pada pemeraman 28 hari

Pengaruh penambahan abu marmer terhadap perubahan nilai kohesi dapat dilihat pada Gambar 10. Nilai kohesi tanah terlihat memiliki kecenderungan peningkatan seiring dengan penambahan kadar abu

marmer. Penambahan abu marmer mampu meningkatkan daya lekat antar butir tanah sehingga nilai kohesi cenderung semakin tinggi. Daya lekat tanah terkait dengan kohesi tanah. Ini terlihat dari hasil

penelitian (Zorluer dan Gucek, 2014), bahwa nilai kohesi *undrained* (C_u) tanah lempung yang distabilisasi dengan abu marmer dan abu terbang mengalami peningkatan, ini sejalan dengan peningkatan kuat tekan tanah (q_u).

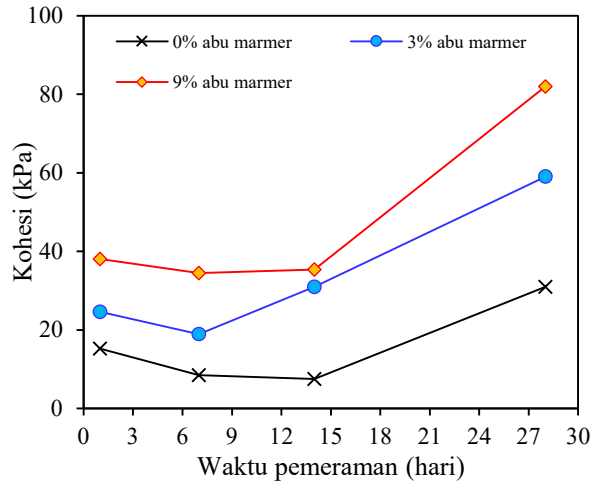
Pengaruh umur pemeraman tanah yang telah dicampur abu marmer terhadap perubahan nilai kohesi dapat dilihat pada Gambar 11. Secara umum pemeraman tanah berdampak pada peningkatan nilai kohesi tanah terutama pada umur pemeraman 28 hari. Peningkatan yang baik terlihat pada penambahan abu marmer 3% dan 9%. Terutama untuk 9% abu marmer, nilai kohesi terlihat cukup tinggi pada umum pemeraman 28 hari. Ini dapat disebabkan tanah semakin keras pada umur 28 hari dan kondisi ini dapat mengubah parameter kohesi tanah yang semakin tinggi.



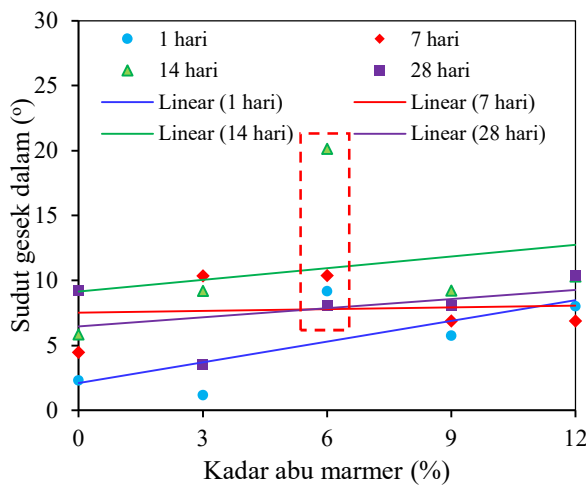
Gambar 10. Pengaruh kadar abu marmer terhadap nilai kohesi tanah

Pengaruh penambahan abu marmer pada perubahan nilai sudut gesek dalam tanah ditunjukkan pada Gambar 12. Secara keseluruhan sudut gesek dalam tanah mengalami peningkatan yang cukup baik pada penambahan 6% abu marmer. Sedangkan untuk 9-12% terlihat nilai sudut gesek dalam tanah tidak mengalami perubahan yang berarti. Ini dapat diartikan gesekan antar butir dalam tanah lebih optimal mengalami peningkatan untuk tanah dengan penambahan 6% abu marmer.

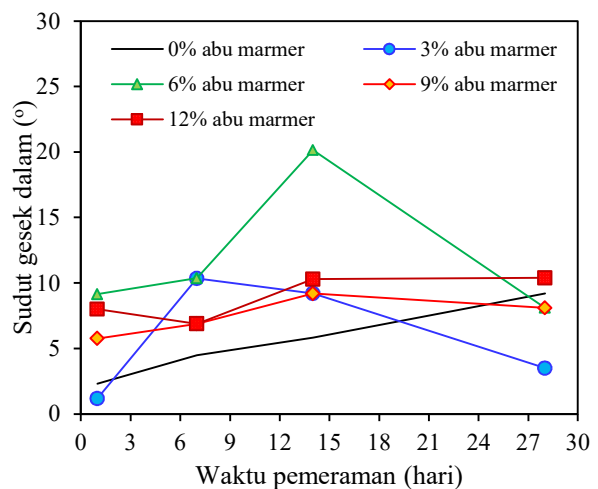
Fenomena yang didapatkan dari hasil penelitian ditunjukkan bahwa untuk sudut gesek dalam tanah terjadi peningkatan dan nilai kohesi berkurang pada penambahan 6% abu marmer (Gambar 10 dan Gambar 12). Nilai kombinasi dari keduanya memberi kontribusi pada kuat geser tanah. Pengaruh yang terbaik dalam hal peningkatan kuat geser didapatkan pada 6% abu



Gambar 11. Pengaruh waktu pemeraman terhadap nilai kohesi tanah



Gambar 12. Pengaruh kadar abu marmer terhadap Nilai sudut gesek dalam tanah



Gambar 13. Pengaruh waktu pemeraman terhadap Nilai sudut gesek dalam tanah

marmer. Hal ini sesuai dengan hasil peningkatan tegangan deviator tanah yang selalu lebih tinggi pada semua waktu pemeraman yang digunakan pada penelitian ini (Gambar 6 dan Gambar 9).

Tinjauan perubahan sudut gesek dalam tanah untuk setiap umur pemeraman benda uji dalam dilihat pada Gambar 13. Peningkatan sudut gesek dalam tanah mencapai maksimal pada umur pemeraman 14 hari, setelah itu terjadi penurunan nilai sudut gesek dalam tanah. Peningkatan yang signifikan ditunjukkan pada tanah dengan 6% abu marmer.

Pemeraman tanah terlihat berpengaruh pada kohesi dan sudut gesek dalam tanah, kohesi cenderung menurun sampai umur 14 hari dan meningkat pada umur 28 hari, sebaliknya sudut gesek dalam tanah terlihat meningkat sampai umur 14 hari dan menurun pada umur 28 hari (Gambar 11 dan Gambar 13). Fenomena ini dapat terjadi bahwa pada masa pemeraman, air dalam tanah meresap ke dalam butir-butir tanah sampai pada umur 14 hari, akibatnya kohesi berkurang tetapi sudut gesek dalam tanah meningkat, namun pada masa 14-28 hari didapatkan air dalam butir tanah menguap keluar dan membasah permukaan dan berakibat pada peningkatan kohesi dan penurunan sudut gesek dalam tanah. Secara keseluruhan kombinasi dari kedua parameter geser tanah ini terlihat memberikan pengaruh yang tinggi pada 28 hari, hal ini dipertegas dengan kenaikan tegangan deviator tertinggi pada umur 28 hari (Gambar 9). Hal ini sesuai teori dinyatakan bahwa kekuatan campuran tanah dengan bahan tambah naik secara berangsur-angsur selama umur pemeraman (Hardiyatmo, 2020). Secara keseluruhan didapatkan bahwa peningkatan kohesi tanah dipengaruhi oleh peningkatan kadar abu marmer dan umur pemeraman benda uji, sedangkan peningkatan maksimum dari sudut gesek dalam tanah didapatkan pada 6% abu marmer dengan umur pemeraman maksimum 14 hari.

Peningkatan sudut gesek dalam tanah lebih dominan dalam peningkatan kuat geser tanah, untuk itu dapat dikatakan bahwa perbaikan tanah dengan abu marmer lebih efektif pada kadar abu marmer 6% dengan umur pemeraman sampai 14 hari. Pemilihan kadar abu marmer 6% diperkuat dengan tegangan deviator tertinggi maksimal dengan kuat geser tertinggi dan ditambah lagi dengan hasil kepadatan tanah maksimal dan indeks plastisitas tanah yang signifikan yang cenderung terjadi pada tanah dengan 6% abu marmer.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis pengujian, maka dapat disimpulkan beberapa hal di antaranya: berdasarkan hasil uji *Atterberg limit* didapatkan bahwa penambahan 6% abu marmer dapat memperbaiki sifat plastisitas tanah dari lempung plastisitas tinggi menjadi sedang. Peningkatan kuat geser tanah dapat diketahui

dari bertambahnya tegangan deviator tanah. Hasil pengujian menunjukkan tanah dengan penambahan 6% abu marmer mampu memberikan kuat geser tertinggi hal ini relevan dengan kepadatan tanah maksimal yang didapatkan pada campuran ini. Nilai kohesi didapatkan kecenderungan peningkatan seiring dengan peningkatan kadar abu marmer dan umur pemeraman benda uji, sedangkan parameter sudut gesek dalam tanah menunjukkan peningkatan maksimal pada penambahan 6% abu marmer yang diperam dengan umur pemeraman paling lama 14 hari.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Universitas Pelita Harapan yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini melalui hibah penelitian internal tahun akademik 2022/2023 Nomor: 043/LPPM-UPH/I/2023.

Daftar Pustaka

- Darmawandi, A., Waruwu, A., Halawa, T., Harianto, D., & Muammar. (2020). Karakteristik Tanah Lunak Sumatera Utara Berdasarkan Pengujian Kuat Tekan Bebas. *Semnastek UISU*, 1, 16–20.
- Gustin, K. E., & Ridwan, M. (2017). Pengaruh Penambahan Limbah Bata Ringan pada Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Wiyung Surabaya Terhadap Nilai California Bearing Ratio (CBR). *Rekayasa Teknik Sipil*, 3(3), 224–230.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Gajah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2020). *Perbaikan Tanah*. UGM Press.
- Indriyanti, I., & Kasmawati, K. (2018). Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. *Jurnal Teknik Hidro*, 11(2), 14–25.
- Lankaran, Z. E., Nik Daud, N. N., Rostami, V., & Yusoff, Z. M. (2022). Consolidated Drained Triaxial Test on Treated Coastal Soil and Finite Element Analysis Using PLAXIS 2D. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(7263333), 15 pages.
- Lay, R. R. (2019). Stabilisasi Tanah Lempung Desa Niukbaun Menggunakan Campuran Tanah Kapur Dan Semen. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 179–192.
- Muhyi, A. Al, Roesyanto, R., & Hasibuan, G. C. R. (2022). Pengaruh Penambahan Bubuk Gypsum Terhadap Kuat Geser Tanah Berdasarkan Pengujian Triaksial Serta Pemodelan dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Syntax Admiration*, 3(9), 1102–1114.
- Naibaho, A. G., & Waruwu, A. (2021). Kajian Kapasitas Kelompok Tiang pada Tanah Lunak

- Menggunakan Skala Kecil Laboratorium. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 179–186.
- Nasarani, H. W., Rifa'i, A., & Hardyatmo, H. C. (2019). Pengaruh Penambahan Abu Vulkanik pada Tanah Lunak terhadap Modulus Geser Maksimum Berdasarkan Pengujian Triaksial U-U. *Jurnal Tekno Global*, 8(1), 15–21.
- Ningrum, P., & Nawir, H. (2019). Perilaku lintasan tegangan hasil uji triaksial pada tanah lempung karawang. *Jurnal Rab Construction Research*, 4(1), 78–90.
- Pardoyo, B., Wirawan, B. A., & Huda, K. (2021). Analysis of the Residual Red Soil Shear Test with the Slurry Method in the Regency of Semarang. *Jurnal Teknik*, 42(1), 97–105.
- Pasmar, D., Fattah, A., P, A. P., & Abadi, F. A. (2022). *Stabilisasi Tanah Lempung dengan Limbah Marmer Sebagai Material Tanah Dasar (Subgrade)*. 7(1), 13–17.
- Polii, S. N., Sompie, O. B. A., & Manaroinsong, L. D. K. (2018). Pengaruh Penambahan Abu Batu Bara Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung. *Tekno*, 16(69), 11–15.
- Setyono, E., Sunarto, & Gumilang, A. M. (2018). Pengaruh Penggunaan Bahan Serbuk Marmer Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif. *Media Teknik Sipil*, 16(2), 99–107.
- Seyrek, E. (2018). Engineering Behavior of Clay Soils Stabilized with Class C and Class F Fly Ashes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(2), 273–287.
- Susilo, A. J., Sentosa, G. S., Sumarli, I., & Prihatiningsih, A. (2018). Karakteristik Parameter Kekuatan Tanah yang Dipadatkan dengan Uji Triaksial Metode UU. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, Dan Ilmu Kesehatan*, 2(2), 572–579.
- Vigneshwar, S. K., Gobinath, S., Thirumalai, R., Babu, S. S., & Vigneswaran, G. (2017). Triaxial Behaviour of Stabilized Soil by Quarry Dust. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(1), 273–287.
- Wardani, S. P. R., Muhrozi, M., Setiaji, A. R. A., & Riwu, D. R. (2018). Stabilisasi Tanah Ekspansive dengan Menggunakan Tanah Putih untuk Tanah Dasar di Daerah Godong Kabupaten Grobogan Jawa Tengah. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 24(1), 1–8.
- Waruwu, A., & Waruwu, E. M. (2021). Kajian Interaksi Tanah-Bambu Ditinjau Dari Parameter Kuat Geser. *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 20(2), 150–160.
- Yilmaz, F., & Demir, E. (2021). Strength and Durability Performance of Clayey Soil Stabilized with Lime and Marble Powder. *Journal of Science & Technology*, 9(2), 511–520.
- Zorluer, I., & Gucek, S. (2014). The Effects of Marble Dust and Fly Ash on Clay Soil. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(1), 59–67.
- Zumrawi, M. M. E., & Abdalla, E. A. E. (2018). Stabilization of Expansive Soil Using Marble Waste Powder. *Second Conference of Civil Engineering in Sudan*, 2(December), 266–271.