

Kajian Daya Dukung Tanah Lempung Distabilisasi dengan Abu Marmer

Study of the Bearing Capacity of Stabilized Clay with Marble Ash

Felicia Celline¹, Rionaldi Sinaga², Darryl Gregory Gandawijaya³, Aazokhi Waruwu^{4*}

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan

Jl. MH Thamrin Boulevard 1100, Klp. Dua, Kec. Klp. Dua, Kota Tangerang, Banten, Indonesia

* Penulis korespondensi : azokhiw@gmail.com

Tel.: +62-21-546-0901

Diterima: Mei 27, 2023; Direvisi: Nov 4, 2023; Disetujui: Apr 19, 2024

DOI: 10.25299/saintis.2024.vol24(01).12710

Abstrak

Tanah dasar memiliki peranan penting dalam menjaga keamanan dan kestabilan konstruksi yang dibangun di atasnya. Salah satu jenis tanah bermasalah adalah tanah lempung lunak. Tanah ini memiliki daya dukung rendah, sehingga memerlukan perbaikan sebelum pembangunan konstruksi di atasnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan perubahan daya dukung tanah yang distabilisasi abu marmer. Penelitian ini dilakukan pada tanah lempung lunak dengan penambahan abu marmer sebesar 3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat kering tanah dengan variasi pemeraman 1 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Karakteristik tanah yang ditinjau diantaranya indeks plastisitas, kepadatan, dan kohesi *undrained*. Daya dukung tanah dapat dianalisis berdasarkan kohesi *undrained* pada setiap kadar abu marmer yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan perbaikan nilai indeks plastisitas dari 33,82% berkurang menjadi 7,69%, kepadatan dengan berat isi kering 1,50 gr/cm³ meningkat menjadi 1,55 gr/cm³, dan kohesi *undrained* tanah meningkat dari 0,134 kg/cm² menjadi 1,58 kg/cm² akibat penambahan abu marmer. Perbaikan karakteristik dan daya dukung tanah yang optimal didapatkan pada penambahan 6% abu marmer dengan masa pemeraman maksimum 7 hari.

Kata Kunci: Tanah Lempung, Abu Marmer, Kohesi Undrained, Daya Dukung.

Abstract

Subgrade soil has an important role in maintaining the safety and stability of construction built on it. One type of problematic soil is soft clay. This land has a low bearing capacity, so it requires improvement before building on it. The aim of this research is to obtain changes in the bearing capacity of soil stabilized by marble ash. This research was carried out on soft clay soil with the addition of marble ash at 3%, 6%, 9%, and 12% of the dry weight of the soil with curing variations of 1 day, 7 days, 14 days, and 28 days. The soil characteristics reviewed include plasticity index, density, and undrained cohesion. Soil bearing capacity can be analyzed based on undrained cohesion at each level of marble ash used. The results showed an improvement in the plasticity index value from 33.82% decreased to 7.69%; density with a dry unit weight of 1.50 gr/cm³ increased to 1.55 gr/cm³; and soil undrained cohesion increased from 0.134 kg/cm² to 1.58 kg/cm² due to the addition of marble ash. Optimal improvements in soil characteristics and bearing capacity were obtained by adding 6% marble ash with a maximum curing period of 7 days.

Keywords: Clay Soil, Marble Ash, Undrained Cohesion, Bearing Capacity.

PENDAHULUAN

Konstruksi teknik sipil tidak terlepas dari pekerjaan tanah yang erat kaitannya dengan ilmu di bidang geoteknik. Tanah memiliki peran sangat penting dalam menopang beban bangunan di atasnya [1]. Ketahanan suatu bangunan sangat dipengaruhi oleh kekuatan tanah yang mendukung struktur di atasnya. Bukan hanya struktur bangunan, tanah juga bekerja sebagai penopang dasar dari pembangunan konstruksi jalan, bendungan air, dan sejumlah infrastruktur lainnya. Sifat dan kondisi tanah di lapangan perlu diberi perhatian penuh, karena terdapat beberapa jenis tanah yang tidak layak digunakan sebagai tanah dasar konstruksi bangunan seperti tanah lempung lunak. Tanah jenis tersebut perlu dilakukan upaya stabilisasi dengan

teknik perbaikan tanah yang sesuai sebelum membangun infrastruktur di atasnya [2].

Tanah lempung merupakan tanah yang memiliki ukuran mikroskopis dan submikroskopis [3]. Tanah lempung memiliki beberapa karakteristik seperti daya dukung yang rendah [4]. Tanah tersebut akan menjadi sangat keras pada saat kondisi kering, bersifat plastis di saat kadar air sedang, dan lengket serta lunak pada kadar air yang lebih tinggi [5]. Oleh karena itu, tanah jenis ini tergolong sebagai tanah bermasalah untuk tanah dasar konstruksi. Hal ini menjadi perhatian, karena daratan di Indonesia terdiri dari 10% tanah lempung atau sekitar 20 juta hektar [6]. Sebaran lahan yang besar ini sangat sulit untuk dihindari terutama dalam pekerjaan struktur. Tanah ini memerlukan perbaikan atau stabilisasi sebelum digunakan sebagai tanah dasar konstruksi.

Stabilisasi tanah merupakan suatu usaha perbaikan untuk menstabilkan dan meningkatkan daya dukung dari tanah [7]. Pada prinsipnya, stabilisasi tanah dilakukan agar butir-butiran tanah menjadi lebih rapat dan saling mengunci supaya tidak terjadi penurunan yang sangat signifikan ketika diberi beban [8]. Stabilisasi dilakukan dengan usaha untuk memperbaiki sifat tanah sehingga mencapai struktur yang lebih konsisten sesuai dengan ketentuan yang telah diterapkan [9]. Stabilisasi tanah merupakan metode pencampuran tanah dan bahan tertentu dengan tujuan untuk meningkatkan sifat-sifat teknis tanah yang memenuhi syarat teknis yang sudah ditentukan [10]. Stabilisasi tanah terdiri dari tiga tipe yaitu stabilisasi mekanis, stabilisasi kimia, dan stabilisasi fisik [11].

Daya dukung tanah lempung lunak pada umumnya cukup rendah, sehingga sulit apabila digunakan secara langsung sebagai tanah dasar konstruksi. Tanah yang memiliki daya dukung rendah seperti lempung lunak dapat dilihat dari nilai kuat tekan bebas dan indeks plastisitasnya. Tanah yang tergolong lunak dan memiliki plastisitas tinggi memerlukan perbaikan [12]. Beberapa upaya perbaikan tanah lempung menggunakan kapur dan abu vulkanik menunjukkan peningkatan karakteristik tanah. Peningkatan kuat tekan tanah didapatkan optimum pada 6% kapur, sedangkan abu vulkanik sedikit lebih banyak untuk mendapatkan perbaikan peningkatan karakteristik tanah lempung [13]. Selain kuat tekan tanah yang meningkat, penambahan 9% abu vulkanik juga cukup efektif dalam meningkatkan nilai CBR tanah lempung, hal ini dilihat dari peningkatan 34-55 kali dari CBR tanah lempung tanpa perbaikan [14]. Hal ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam menentukan jumlah bahan tambah yang akan digunakan pada tanah lempung.

Perbaikan tanah tidak selalu ditempuh melalui penambahan bahan stabilisasi. Metode perkuatan juga sering digunakan dalam perbaikan karakteristik tanah. Penggunaan tiang yang dipancang pada arah vertikal menunjukkan kinerja yang baik pada beberapa jenis tanah. Peningkatan nilai modulus reaksi tanah dasar dan kapasitas dukung semakin meningkat pada tanah yang diberi perkuatan tiang [15]. Perkuatan pada arah horizontal juga dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja tanah lempung. Hal ini terlihat dari penggunaan perkuatan bambu pada arah horizontal dalam meningkatkan kuat geser, daya dukung, dan CBR tanah lempung [16], [17], dan [18].

Perkuatan tanah pada arah vertikal dan horizontal lebih efektif pada tanah sangat lunak dengan lapisan yang lebih tebal, namun perbaikan tanah dengan penggunaan bahan tambah lebih relevan pada lapisan yang lebih dangkal. Efektifitas dan efisiensi menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan bahan tambah. Abu marmer atau serbuk marmer merupakan salah satu alternatif bahan tambah yang dapat digunakan untuk stabilisasi tanah. Abu marmer memiliki unsur-unsur yang

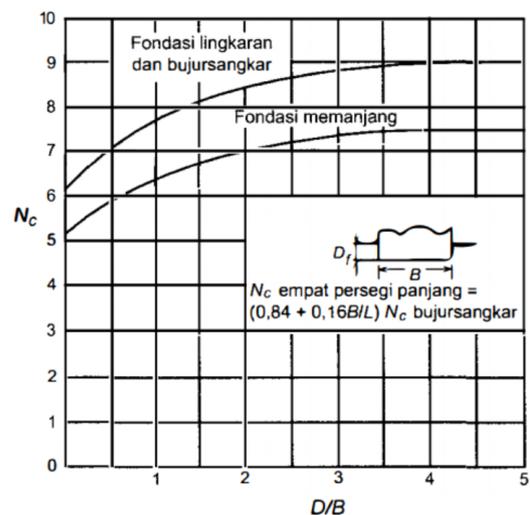
serupa dengan kapur. Batuan marmer didapatkan dari batuan kapur yang telah mengalami proses metamorfosa batuan selama bertahun-tahun [19]. Komposisi yang terdapat di dalam abu marmer adalah senyawa CaO, ini membuktikan bahwa komposisi utama limbah marmer adalah zat kapur [20].

Daya dukung tanah lempung yang ditambah abu marmer akan diuji dengan menggunakan metode uji kuat tekan bebas. *Unconfined Compression Test* (UCT) atau uji kuat tekan bebas biasa dilakukan untuk menyelidiki perkembangan kekuatan tanah lempung dalam kondisi pembebanan *uniaksial* [21]. UCT merupakan pengujian yang dilakukan di laboratorium untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah dengan cara memberikan kuat tekan pada sampel tanah sampai tanah tersebut terlepas dari butir-butirannya dan terjadi peregangan tanah akibat tekanan tersebut [22]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan abu marmer terhadap perbaikan karakteristik tanah di antaranya indeks plastisitas, kepadatan tanah, kohesi *undrained*, dan daya dukung tanah lempung.

Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah (Q_u) pada pondasi dangkal dapat ditentukan menggunakan Persamaan 1. Nilai kohesi pada kondisi *undrained* (c_u) dapat ditentukan dari setengah nilai kuat tekan bebas (q_u) dari hasil uji *unconfined* di laboratorium. Sedangkan faktor daya dukung (N_c) ditentukan menggunakan grafik Skempton berdasarkan rasio kedalaman (D) dengan lebar tapak pondasi dangkal (B) seperti pada Gambar 1 [23].

$$Q_u = c_u \times N_c \tag{2}$$



Gambar 1. Nilai faktor daya dukung

METODOLOGI

Tahapan penelitian stabilisasi tanah lempung dimulai dari persiapan bahan penelitian baik

pengambilan sampel tanah maupun dan abu marmer sebagai bahan tambah untuk stabilisasi. Uji pendahuluan dimulai dari pengujian tanah tanpa penambahan abu marmer. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan.

Tanah yang digunakan dalam penelitian berasal dari sebuah proyek apartemen yang berlokasi di Meikarta, Jl. Orange County Boulevard, Cibatu, Cikarang, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat. Bahan tambah stabilisasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan abu marmer yang diperoleh dari sisa hasil produksi sebuah pabrik marmer, yaitu PT Jaya Abadi Granita yang berlokasi di Jalan Raya Serang KM 69 **Gambar 2**.



Gambar 2. Limbah abu marmer

Abu marmer ditambahkan pada tanah lempung sebanyak 3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat tanah kering. Jumlah air yang digunakan dalam setiap campuran tanah dengan abu marmer ditentukan berdasarkan hasil uji kompaksi. Kompaksi dilakukan untuk mengetahui kadar air optimum benda uji dan berat isi kering maksimum.

Pengujian *unconfined* atau uji kuat tekan bebas dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tekan bebas dan kohesi dalam kondisi *undrained* pada setiap penambahan bahan stabilisasi abu marmer **Gambar 3**. Uji ini hanya dapat dilakukan pada tanah tanpa campuran abu marmer maupun tanah yang telah dicampur dengan abu marmer. Proses pengujian yang sama dilakukan pada tanah asli maupun tanah stabilisasi abu marmer yang telah diperam selama 1 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pengujian ini menghasilkan nilai kuat tekan bebas yang dapat digunakan untuk menentukan kohesi tanah dalam kondisi *undrained* (c_u). Parameter ini yang diperlukan dalam menentukan daya dukung tanah.



Gambar 3. Pengujian Kuat Tekan

HASIL DAN DISKUSI

Hasil penelitian menguraikan karakteristik tanah berupa hasil uji *Atterberg*, kompaksi, dan uji kuat tekan bebas pada tanah tanpa dan dengan penambahan abu marmer. Melalui pengujian tersebut juga dapat menganalisis perubahan daya dukung tanah asli dengan adanya penambahan abu marmer sebagai *stabilizing agent*, dimana perubahan tersebut tergantung dari penambahan kadar yang berbeda seperti 3%, 6%, 9%, dan 12%.

Atterberg Test

Hasil uji *Atterberg* pada tanah asli dan tanah dengan penambahan abu marmer dapat dilihat pada **Tabel 1**. Parameter tanah yang didapatkan dari uji ini terdiri dari batas cair (*LL*), batas plastis (*PL*), dan indeks plastisitas (*PI*). Berdasarkan nilai indeks plastisitas (*PI*) tanah asli sebesar 33,82%, dapat dikatakan bahwa tanah yang diteliti ini tergolong sebagai tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Setelah ditambahkan abu marmer sebagai stabilisator, dapat dilihat perubahan dari nilai *PI*. Nilai *PI* semakin menurun ketika kadar abu marmer yang ditambahkan pada tiap sampel tanah meningkat.

Selain nilai indeks plastisitas tanah, terjadi juga penurunan berkala nilai batas cair (*LL*) pada setiap penambahan kadar abu marmer pada tanah. Penurunan batas cair ini dapat terjadi karena abu marmer memiliki reaksi terhadap air yang dapat memberikan pengaruh pada kadar air dan pengurangan batas cair tanah.

Tabel 1. Hasil uji *Atterberg*

Parameter	Kadar Abu Marmer (%)				
	0	3	6	9	12
<i>LL</i>	49,11	43,07	42,29	40,97	40,54
<i>PL</i>	15,29	24,18	28,45	31,33	32,85
<i>PI</i>	33,82	19,53	13,83	9,64	7,69

Uji Kompaksi

Pengujian kompaksi tanah diperlukan untuk memperoleh nilai kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering maksimum (γ_{dmax}). Berat isi kering maksimum dan kadar air optimum pada setiap penambahan kadar abu marmer yang diperoleh berdasarkan hasil uji kompaksi seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar berat isi kering dan kadar air optimum untuk setiap benda uji berbeda satu sama lainnya. Berat isi kering tanah semakin tinggi pada penambahan 3-6% abu marmer, namun kembali berkurang pada 9-12% abu marmer. Berat isi kering tertinggi didapatkan pada penambahan abu marmer sebesar 6% dan sebaliknya pada benda uji ini didapatkan kadar air yang paling rendah. Kepadatan tanah didapatkan cukup optimal pada penambahan 6% abu marmer, ini dapat disebabkan rongga-rongga tanah terisi oleh abu marmer sehingga kadar airnya semakin kecil. Seperti diketahui bahwa rongga dalam tanah dapat terisi oleh udara dan air. Rongga udara dan air tergantikan sebagian oleh keberadaan abu marmer, sehingga tanah semakin padat dan kadar air semakin sedikit.

Tabel 2. Hasil uji kompaksi

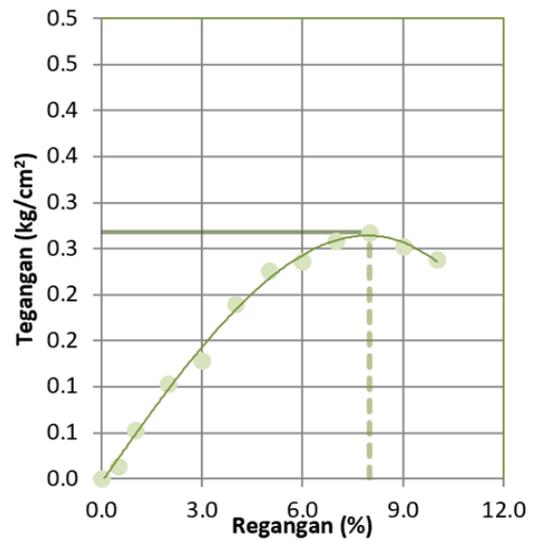
Kadar Abu Marmer (%)	γ_d (gr/cm ³)	w_{opt} (%)
0	1,50	21,00
3	1,51	21,00
6	1,55	17,50
9	1,49	20,00
12	1,49	21,00

Kepadatan tanah bergantung pada kadar air yang ditambahkan di dalam tanah. Kadar air yang rendah akan menghasilkan tanah dengan sifat yang keras dan kaku sehingga susah dipadatkan, sebaliknya kadar air yang terlalu banyak dapat memperkecil kepadatan tanah. Kadar air yang optimum dapat menghasilkan kepadatan tanah yang maksimum.

Hasil Uji Kuat Tekan Tanah Tak Terganggu

Pengujian kuat tekan yang dilakukan pada tanah uji adalah *unconfined compression test* (UCT). Data dari hasil pembacaan dan pencatatan deformasi sampel tanah yang dilakukan menggunakan *unconfined compression machine* diolah untuk memperoleh kurva deformasi beban. Pengujian UCT pada tanah asli atau tidak terganggu (*undisturbed*) menghasilkan nilai kuat tekan (q_u) sebesar 0,268 kg/cm² dan nilai kohesi tanah *undrained* (c_u) sebesar 0,134 kg/cm² atau c_u sama dengan 0,5 q_u . Nilai q_u dan c_u dapat dilihat dari hubungan hubungan tegangan dan regangan untuk sampel tak terganggu (*undisturbed*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**. Tanah dalam kondisi tak terganggu menunjukkan nilai kuat tekan < 0,50

kg/cm², dengan demikian tanah ini dikategorikan sebagai tanah lempung lunak [24].

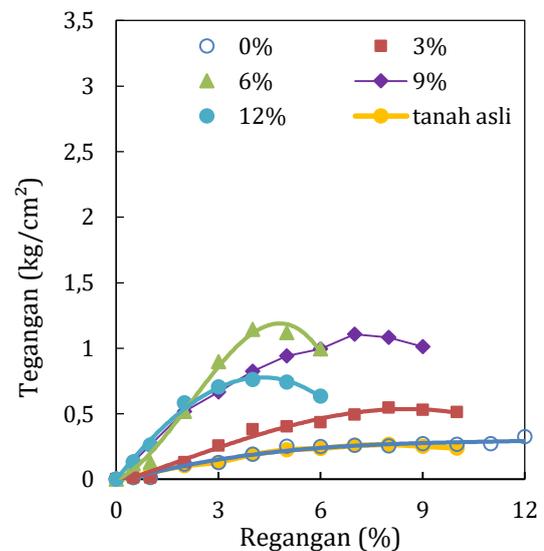


Gambar 4. Hubungan Regangan dan Tegangan Tanah *Undisturbed*

Hasil Uji Kuat Tekan Tanah dengan Abu Marmer

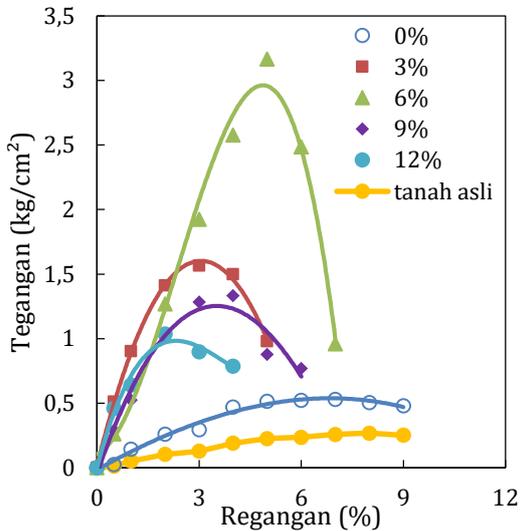
Hasil uji kuat tekan tanah ditunjukkan pada hubungan regangan dan tegangan seperti terlihat pada **Gambar 5** sampai **Gambar 8**. Hasil uji dibedakan berdasarkan umur benda uji 1 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

Hasil uji untuk penambahan abu marmer pada tanah untuk umur 1 hari diperlihatkan pada **Gambar 5**. Tegangan yang bekerja pada tanah dengan penambahan abu marmer memperlihatkan nilai yang lebih tinggi daripada tanah asli tanpa penambahan abu marmer. Tegangan tanah pada kondisi runtuh didapatkan maksimal pada tanah dengan penambahan 6-9% abu marmer.



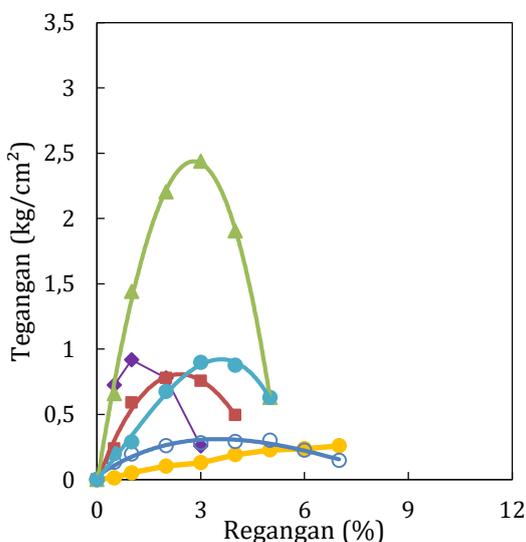
Gambar 5. Hubungan tegangan-regangan pada tanah-abu marmer umur 1 hari

Hasil uji untuk benda uji yang diperam selama 7 hari ditunjukkan **Gambar 6**. Tegangan pada tanah dengan 6% abu marmer terlihat lebih dominan dibandingkan dengan benda uji lainnya. Penambahan 3% dan 12% abu marmer pada tanah memberikan nilai tegangan yang hampir sama pada penambahan 9% abu marmer.



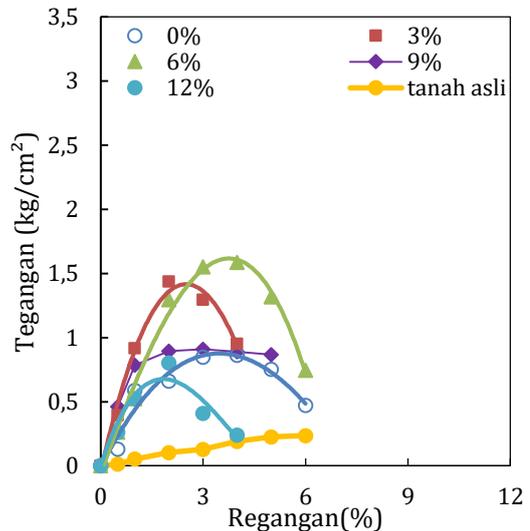
Gambar 6. Hubungan tegangan-regangan pada tanah-abu marmer umur 7 hari

Perilaku benda uji yang diperam selama 7 hari hampir sama dengan benda uji yang diperam selama 14 hari (**Gambar 7**). Namun, nilai kuat tekan yang didapatkan pada umur 7 hari masih lebih tinggi dibandingkan pada benda uji dengan umur 14 hari. Ini dapat diartikan bahwa umur pemeraman 7 hari merupakan waktu yang paling lama untuk tanah dengan abu marmer dapat bereaksi satu sama lainnya. Hal ini semakin dikuatkan dengan penurunan nilai kuat tekan tanah pada umur 28 hari (**Gambar 8**).



Gambar 7. Hubungan tegangan-regangan pada tanah-abu marmer umur 14 hari

Nilai tegangan tanah dengan abu marmer mengalami penurunan pada semua variasi yang digunakan. Nilai kuat tekan tanah dengan 6% abu marmer hampir sama dengan kuat tekan untuk tanah dengan 3% abu marmer. Setelah umur 7 hari, nilai kuat tekan tanah semakin menurun seiring dengan waktu pemeraman benda uji. Untuk itu, dapat dikatakan bahwa kuat tekan tanah lebih maksimum apabila diuji pada umur benda uji selama 7 hari.



Gambar 8. Hubungan tegangan-regangan pada tanah-abu marmer umur 28 hari

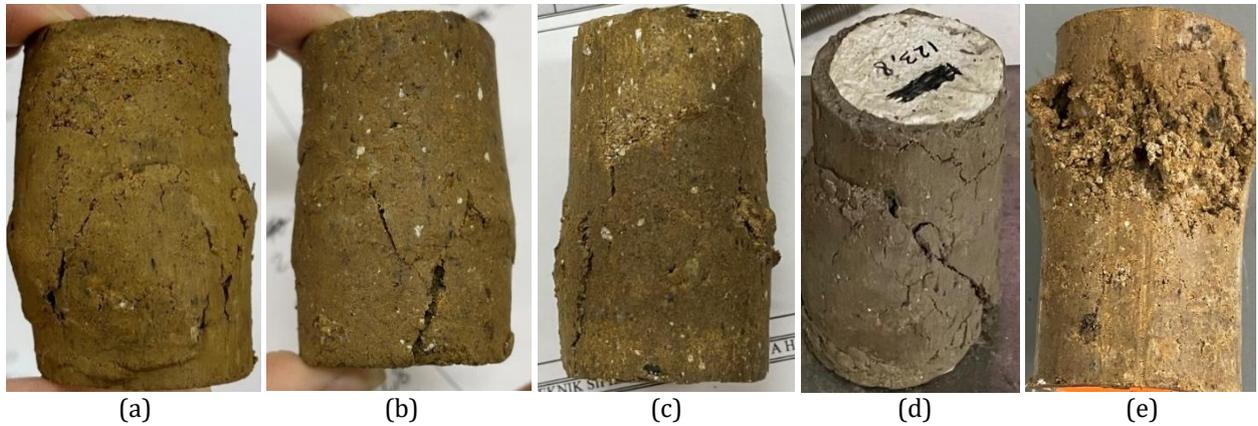
Pola keruntuhan benda uji untuk masing-masing campuran dan waktu pemeraman dapat dilihat dari **Gambar 9** sampai **Gambar 12**. Pola keruntuhan geser pada setiap benda uji pada umumnya membentuk sudut ke arah vertikal dan sebagian lagi mengalami keruntuhan pada arah horizontal. Hasil pengamatan menunjukkan benda uji dengan penambahan 6% abu marmer umumnya mengalami keruntuhan yang lebih sedikit dibandingkan benda uji lainnya. Sebaliknya, benda uji dengan penambahan 12% abu marmer memperlihatkan keruntuhan yang cukup tinggi terlebih-lebih pada benda uji yang diperam 28 hari. Dengan demikian penambahan 12% abu marmer kurang efektif dalam memperbaiki sifat-sifat tanah.

Pola retak akibat penambahan abu marmer pada pemeraman 1 hari ditunjukkan pada **Gambar 9**. Retakan tanah dengan 3-9% abu marmer hampir sama, sedangkan untuk benda uji 12% menunjukkan bidang retak yang berbeda dengan benda uji lainnya, hal ini disebabkan oleh jumlah abu marmer yang berlebihan. Pola retak untuk umur pemeraman 1 hari hampir sama dengan pola retak untuk benda uji dengan pemeraman 7 hari (**Gambar 10**).

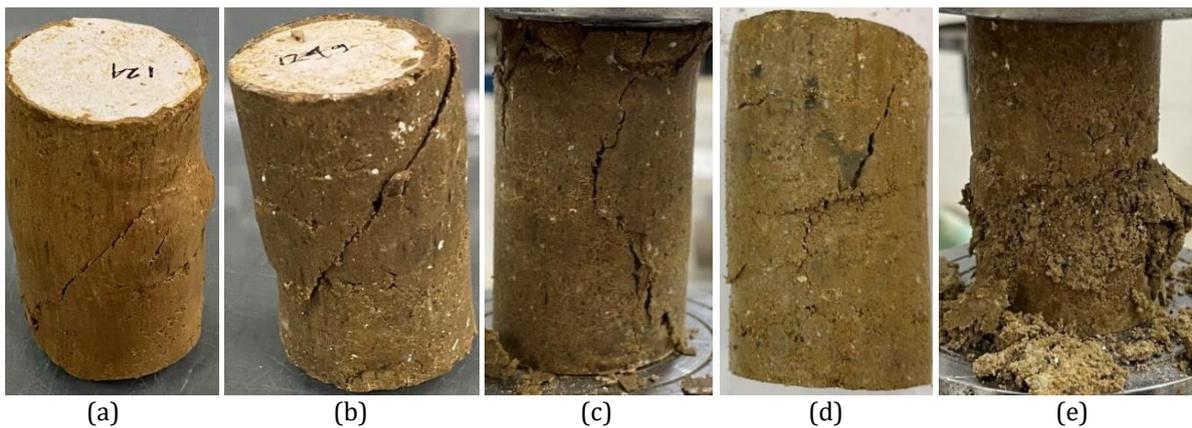
Perbedaan terlihat pada letak retak untuk benda uji dengan 12% abu marmer. Benda uji 7 hari ditemukan retak di bagian bawah sedangkan benda uji 1 hari terletak di bagian atas.

Pola retak semakin tinggi untuk benda uji yang diperam selama 14 hari dan 28 hari **Gambar 11** dan **Gambar 12**. Umur pemeraman didapatkan berpengaruh pada pola retak tanah akibat beban. Umur pemeraman yang lebih lama memperlihatkan pola retak yang semakin tinggi. Ini disebabkan oleh

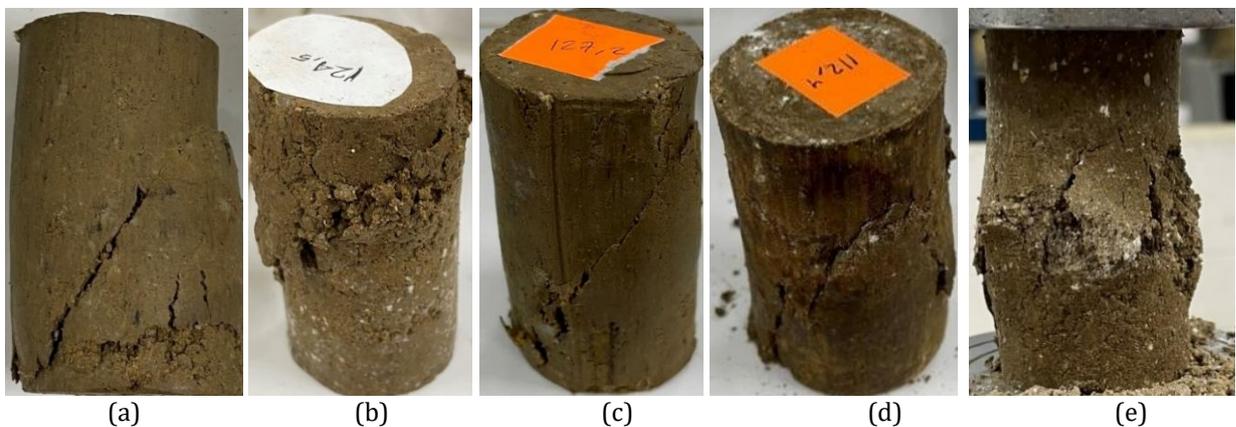
semakin keringnya tanah seiring dengan waktu pemeraman. Tanah dengan cepat mengalami retak pada saat beban diterapkan, sehingga kuat tekan tanah semakin kecil.



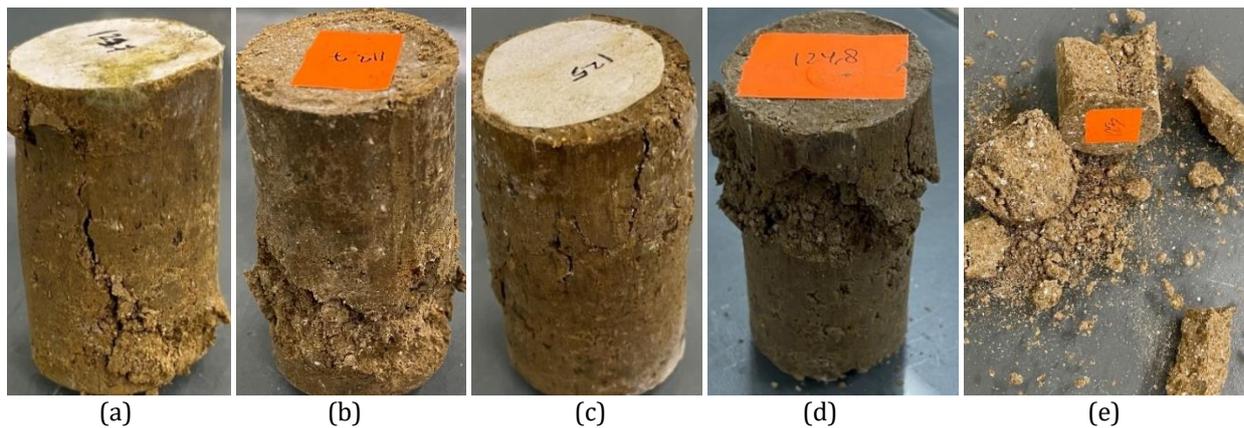
Gambar 9. Pola retak benda uji pada pemeraman 1 hari: a. 0% abu marmer; b. 3% abu marmer; c. 6% abu marmer; d. 9% abu marmer; e. 12% abu marmer



Gambar 10. Pola retak benda uji pada pemeraman 7 hari: a. 0% abu marmer; b. 3% abu marmer; c. 6% abu marmer; d. 9% abu marmer; e. 12% abu marmer



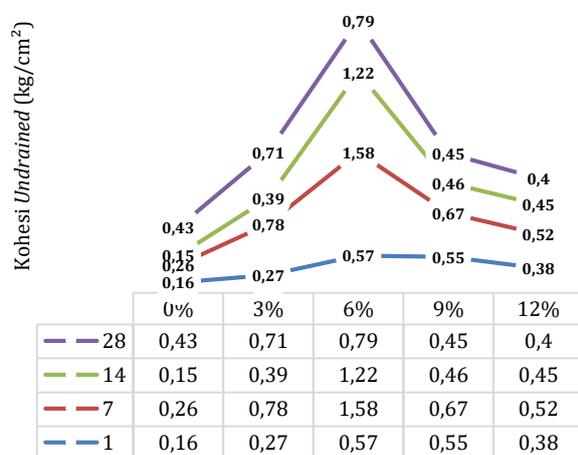
Gambar 11. Pola retak benda uji pada pemeraman 14 hari: a. 0% abu marmer; b. 3% abu marmer; c. 6% abu marmer; d. 9% abu marmer; e. 12% abu marmer



Gambar 12. Pola retak benda uji pada pemeraman 28 hari: a. 0% abu marmer; b. 3% abu marmer; c. 6% abu marmer; d. 9% abu marmer; e. 12% abu marmer

Kohesi Undrained Tanah

Berdasarkan hasil yang bisa dilihat dari **Gambar 4** sampai **Gambar 8**, didapatkan nilai kuat tekan (q_u) untuk setiap penambahan abu marmer dan waktu pemeraman. Setengah dari nilai q_u merupakan nilai kohesi *undrained* tanah, hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 13**. Lama waktu pemeraman dan kadar abu marmer membuktikan bahwa penambahan abu marmer terhadap tanah pada penelitian yang dilakukan hanya berpengaruh apabila kadar abu marmer tidak lebih 6%.

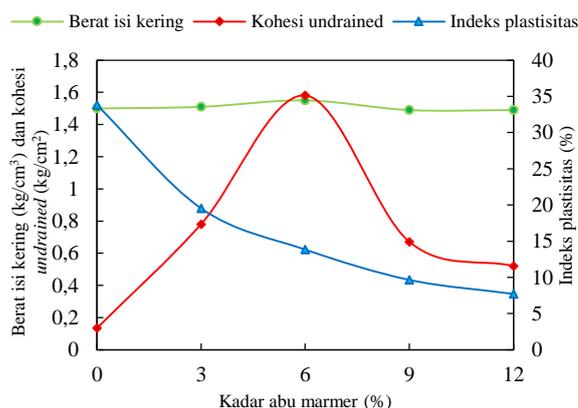


Gambar 13. Nilai kohesi *undrained* dari UCT

Hasil penelitian menunjukkan nilai dari tiap penambahan kadar abu marmer pada rentang hari yang berbeda. Namun, pada setiap grafik dapat dilihat bahwa penambahan abu marmer sebanyak 6% akan menghasilkan nilai tegangan yang paling tinggi, terutama pada umur benda uji 7 hari. Nilai q_u tanah asli yang diperoleh termasuk jenis tanah lempung lunak, akan tetapi penambahan abu marmer dapat menstabilkan tanah lempung, hal ini dapat dilihat dari nilai q_u yang didapat sebesar 3,166 kg/cm² dan nilai c_u sebesar 1,583 kg/cm² pada tanah

yang ditambahkan 6% abu marmer dengan pemeraman selama 7 hari (**Gambar 13**). Nilai c_u mengalami kenaikan sebesar 8 kali lipat. Tanah stabilisasi abu marmer dapat memperbaiki sifat tanah dari tanah lempung lunak menjadi tanah lempung kaku.

Peningkatan nilai kohesi *undrained* tanah lebih signifikan pada pemeraman 7-14 hari, hal ini menunjukkan bahwa kohesi tanah mencapai peningkatan maksimum pada waktu pemeraman tersebut, hal ini disebabkan waktu pemeraman yang lebih lama dapat mengakibatkan tanah semakin kering sehingga daya lekat tanah semakin kecil yang berpengaruh pada berkurangnya nilai kohesi *undrained* tanah. Kadar abu marmer 6% memberikan perbaikan sifat-sifat tanah yang optimal, tidak hanya nilai kohesi *undrained* tanah, tetapi juga nilai berat isi kering dan indeks plastisitas tanah lempung **Gambar 14**.



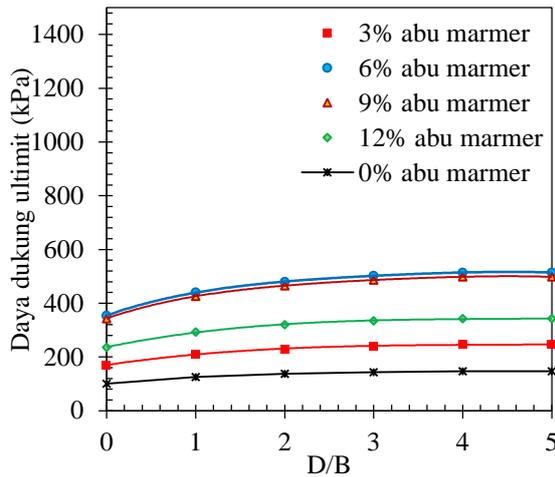
Gambar 14. Peningkatan nilai kohesi *undrained* 7 hari dan parameter tanah lainnya

Daya Dukung Tanah

Berdasarkan nilai c_u yang didapat dari pengujian UCT, data tersebut diaplikasikan dalam perhitungan daya dukung tanah yang diperoleh

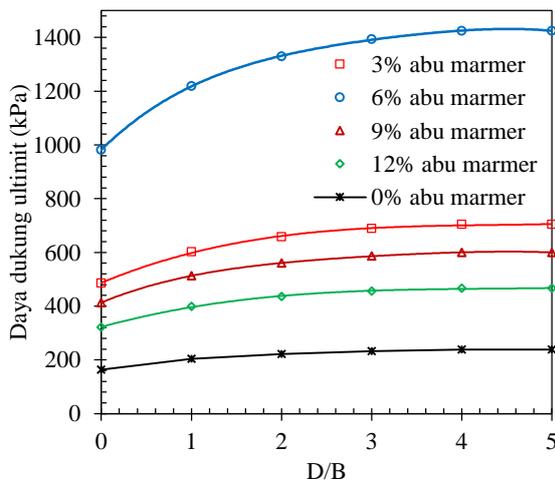
menggunakan Persamaan (1). Rasio kedalaman dan lebar pondasi (D/B) divariasikan dari 1-5 untuk mendapatkan nilai faktor daya dukung dapat menggunakan **Gambar 1**.

Hasil analisis daya dukung untuk tanah dengan umur pemeraman 1 hari ditunjukkan pada **Gambar 15**. Peningkatan daya dukung tanah akibat penambahan abu marmer tidak begitu signifikan pada umur pemeraman 1 hari. Ini disebabkan belum maksimalnya abu marmer bereaksi dengan tanah.



Gambar 15. Daya dukung *ultimit* pemeraman 1 hari

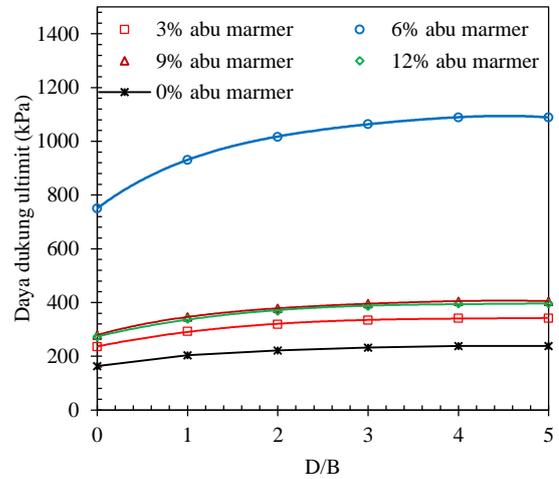
Hasil analisis daya dukung untuk tanah dengan umur pemeraman 7 hari ditunjukkan pada **Gambar 16**. Peningkatan daya dukung tanah akibat penambahan abu marmer terlihat memberikan dampak yang baik terutama untuk 6% abu marmer. Peningkatan ini relevan dengan peningkatan nilai kohesi *undrained* tanah dengan penambahan abu marmer yang sama.



Gambar 16. Daya dukung *ultimit* pemeraman 7 hari

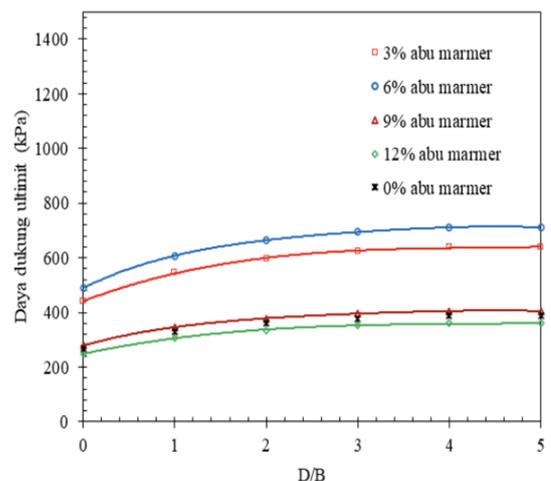
Hasil analisis daya dukung untuk tanah dengan umur pemeraman 14 hari ditunjukkan pada

Gambar 17. Peningkatan daya dukung tanah akibat penambahan 6% abu marmer lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan lainnya. Namun, nilai daya dukung yang didapatkan masih lebih kecil dibandingkan dengan benda uji dengan umur pemeraman 7 hari.



Gambar 17. Daya dukung *ultimit* pemeraman 14 hari

Hasil analisis daya dukung untuk tanah dengan umur pemeraman 28 hari ditunjukkan pada **Gambar 18**. Peningkatan daya dukung tanah akibat penambahan abu marmer tidak begitu signifikan. Daya dukung untuk tanah dengan penambahan 3-6% abu marmer didapatkan lebih tinggi dibandingkan yang lainnya. Hasil analisis daya dukung menunjukkan bahwa semua variasi penambahan abu marmer berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah walaupun tidak semuanya signifikan. Pengaruh abu marmer terhadap daya dukung tanah yang paling efektif dan signifikan ada di penambahan abu marmer sebanyak 6% pada waktu pemeraman selama 7 hari.



Gambar 18. Daya dukung *ultimit* pemeraman 28 hari

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan. Penambahan abu marmer pada tanah lempung mempengaruhi peningkatan nilai kuat geser atau kohesi *undrained* tanah (c_u), yang meningkat setiap penambahan abu marmer. Namun kadar abu marmer optimum yang diperoleh dari pengujian adalah 6%. Hal ini didapatkan dari nilai kuat tekan bebas (q_u) terbesar terjadi pada penambahan 6% abu marmer yang dihasilkan dari setiap waktu pemeraman yang berbeda. Nilai kuat tekan dan nilai kohesi *undrained* paling tinggi didapatkan ada pada pemeraman selama 7 hari dengan nilai $q_u = 3,166$ kg/cm² dan nilai $c_u = 1,583$ kg/cm². Peningkatan kohesi *undrained* ini diikuti dengan peningkatan daya dukung tanah tertinggi dibandingkan benda uji lainnya. Penambahan 6% abu marmer juga memberikan kepadatan maksimal dan penurunan indeks plastisitas optimal pada tanah lempung. Dengan demikian hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan abu marmer mempengaruhi perbaikan indeks plastisitas, kepadatan tanah, kohesi *undrained*, dan daya dukung tanah. Perbaikan optimal didapatkan pada penambahan 6% abu marmer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini. Penelitian ini terlaksana dengan hibah penelitian internal dari Universitas Pelita Harapan No. Penelitian: P-09-FaST/I/2023.

REFERENSI

- [1] H. Santoso, Y. Cahyo, and A. Ridwan, "Penelitian Stabilitas Struktur Tanah Lempung Bersifat Monmorillonite Menggunakan Limbah Ampas Kopi," *J. Manaj. Teknol. Tek. Sipil*, vol. 3, no. 1, p. 108, Jun. 2020, doi: 10.30737/jurmateks.v3i1.896.
- [2] Y. Liu, Z. Liu, E. Oh, and D. E. L. Ong, "Strength and Microstructural Assessment of Reconstituted and Stabilised Soft Soils with Varying Silt Contents," *Geosci.*, vol. 11, no. 8, p. 302, 2021, doi: 10.3390/geosciences11080302.
- [3] Husnah, N. E. Darfia, and S. E. Prayino, "Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Campuran Semen Dan Fly Ash," *J. Rab Constr. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 32–41, 2019.
- [4] S. N. Polii, O. B. A. Sompie, and L. D. K. Manaroinsong, "Pengaruh Penambahan Abu Batu Bara Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung," *Tekno*, vol. 16, no. 69, pp. 11–15, 2018.
- [5] R. R. Lay, "Stabilisasi Tanah Lempung Desa Niukbaun Menggunakan Campuran Tanah Kapur Dan Semen," *J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 179–192, 2019.
- [6] W. P. Kuswanda, "Perbaikan tanah lempung lunak metoda preloading pada pembangunan infrastruktur transportasi di Pulau Kalimantan," *Pros. Semin. Nas. Geotek.*, pp. 188–207, 2016.
- [7] H. H. Abdullah, M. A. Shahin, and M. L. Walske, "Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay," *Geosciences*, vol. 10, no. 7, p. 249, Jun. 2020, doi: 10.3390/geosciences10070249.
- [8] R. S. Riwayatini and R. Yuniar, "Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Campuran Kapur Untuk Lapisan Tanah Dasar Konstruksi," *J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 104–111, 2018, doi: 10.36546/tekniksipil.v8i2.32.
- [9] I. R. Kusuma, E. Mina, and N. Fakhri, "Memanfaatkan Limbah Gypsum Dan Pengaruhnya Terhadap Nilai California Bearing Ratio (Cbr)," *J. Fondasi*, vol. 7, no. 1, pp. 22–31, 2018.
- [10] J. E. Bowles and J. K. Hainim, *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah: Mekanika Tanah*. Jakarta: Erlangga, 1984, 1984.
- [11] H. Darwis, *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta: Pustaka AQ, 2017.
- [12] A. Darmawandi, A. Waruwu, T. Halawa, D. Harianto, and Muammar, "Karakteristik Tanah Lunak Sumatera Utara Berdasarkan Pengujian Kuat Tekan Bebas," in *Semastek UISU*, 2020, vol. 1, pp. 16–20.
- [13] A. Waruwu, A. Darmawandi, T. Halawa, and Muammar, "Perbandingan Abu Vulkanik dan Kapur Sebagai Material Stabilisasi Tanah Lempung," *J. Proy. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 8–15, 2022.
- [14] A. Waruwu, O. Zega, D. Rano, B. M. T. Panjaitan, and S. Harefa, "Kajian Nilai California Bearing Ratio (CBR) pada Tanah Lempung Lunak dengan Variasi Tebal Stabilisasi Menggunakan Abu Vulkanik," *J. Rekayasa Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 116–130, 2021, doi: <https://doi.org/10.25077/jrs.17.2.116-130.2021>.
- [15] A. Waruwu and S. Y. Pardosi, "The Effect of Pile on the Bearing Capacity of the Plate and the Modulus of Subgrade Reaction on Peat Soil," *J. Sainstis*, vol. 21, no. 02, pp. 79–86, 2021, doi: 10.25299/sainstis.2021.vol21(02).7546.
- [16] A. Waruwu and E. M. Waruwu, "Kajian Interaksi Tanah-Bambu Ditinjau Dari Parameter Kuat Geser," *J. Ilm. Desain Konstr.*, vol. 20, no. 2, pp. 150–160, 2021, doi: 10.35760/dk.2021.v20i2.4388.
- [17] A. Waruwu, D. P. E. S. Yanto, R. D. Susanti, and S. Harefa, "Study Bearing Capacity of Subgrade Using Combination Bamboo Grid

- and Stabilized Soil," *J. Infrastruct. Plan. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 87–92, 2022.
- [18] A. Waruwu, F. Gea, J. Y. A. H, E. M. W, and M. Zega, "Pengaruh Model Perkuatan Bambu Terhadap Nilai CBR Tanah Lempung Lunak," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 20, no. 2, pp. 131–138, 2022.
- [19] I. Indriyanti and K. Kasmawati, "Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer," *J. Tek. Hidro*, vol. 11, no. 2, pp. 14–25, 2018, doi: 10.26618/th.v11i2.2443.
- [20] E. Setyono, Sunarto, and A. M. Gumilang, "Pengaruh Penggunaan Bahan Serbuk Marmer Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif," *Media Tek. Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 99–107, 2018.
- [21] H. H. Abdullah and M. A. Shahin, "Geomechanical Behaviour of Clay Stabilised with Fly-Ash-Based Geopolymer for Deep Mixing," *Geosciences*, vol. 12, no. 5, p. 207, 2022.
- [22] I. P. Hastuty and Roesyanto, "Comparison of the Use of Cement, Gypsum, and Limestone on the Improvement of Clay through Unconfined Compression Test," *J. Civ. Eng. Forum*, vol. 5, no. 2, p. 131, 2019, doi: 10.22146/jcef.43792.
- [23] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2011.
- [24] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press, 2002.

NOMENKLATUR

B	lebar tapak pondasi dangkal
c_u	kohesi pada kondisi <i>undrained</i>
D	lebar tapak pondasi dangkal
LL	batas cair
γ_{dmax}	berat isi kering maksimum
N_c	faktor daya dukung
PI	indeks plastisitas
PI	batas plastis
q_u	nilai kuat tekan bebas
Q_u	daya dukung tanah
w_{opt}	kadar air optimum