

ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI DANGKAL PADA TANAH STABILISASI

Aazokhi Waruwu^{1*}, Jack Widjajakusuma², dan Benni Imanuel Runaweri³

¹*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard No.1100, Tangerang

e-mail: aazokhi.waruwu@uph.edu

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard No.1100, Tangerang

e-mail: jack.widjajakusuma@uph.edu

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard No.1100, Tangerang

e-mail: 01021210025@student.uph.edu

ABSTRAK

Tanah dasar di bawah fondasi dangkal berperan penting dalam mencapai daya dukung yang memenuhi. Ada kalanya tanah dasar memberikan daya dukung yang cukup rendah. Kedalaman fondasi dangkal umumnya tidak terlalu jauh dari permukaan tanah. Apabila kedalaman tetap dipertahankan, maka upaya perbaikan tanah dasar dapat dilakukan agar daya dukung tanah dapat tercapai. Perbaikan tanah dengan stabilisasi menggunakan material potensial yang diambil dari limbah maupun material lokal dapat dipertimbangkan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan peningkatan daya dukung fondasi dangkal di atas tanah dasar yang telah distabilisasi berdasarkan parameter kuat geser *undrained*. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis daya dukung fondasi pada tanah dasar yang telah distabilisasi dengan material serbuk marmer dan serbuk batu bukho. Parameter kuat geser *undrained* yang digunakan merupakan hasil dari uji kuat tekan bebas pada benda uji tanah yang distabilisasi dengan 0-12% material stabilisasi. Analisis daya dukung fondasi dibedakan pada fondasi bentuk bujur sangkar atau lingkaran, persegi panjang, dan memanjang. Hasil penelitian menunjukkan daya dukung tanah dipengaruhi oleh parameter kuat geser *undrained* dan bentuk tapak fondasi dangkal. Kuat geser *undrained* yang tinggi didapatkan pada stabilisasi tanah dengan penambahan 6% material stabilisasi. Daya dukung fondasi terlihat dapat meningkatkan 5-6,5 kali untuk serbuk marmer dan 3-4 kali untuk serbuk batu bukho. Daya dukung fondasi bentuk bujur sangkar atau lingkaran selalu lebih tinggi dibandingkan bentuk lainnya. Daya dukung fondasi bentuk persegi panjang berada di antara nilai daya dukung fondasi memanjang dan fondasi bujur sangkar.

Kata kunci: Inovasi tanah dasar, material ramah lingkungan, daya dukung fondasi, fondasi rumah terjangkau.

1. PENDAHULUAN

Tanah memiliki peran sangat penting dalam menopang beban bangunan di atasnya (Santoso et al., 2020). 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. Daya dukung merupakan tahanan geser tanah yang dikerahkan tanah di sepanjang bidang gesernya dalam melawan penurunan akibat pembebanan (Hardiyatmo, 2011).

Fondasi dangkal semestinya diletakkan pada tanah keras yang tidak terlalu jauh dari permukaan tanah, umumnya kedalaman tanah lebih kecil atau sama dengan lebar fondasi (Fauzi and Ikhya, 2016). Apabila tanah di bawah dasar fondasi tidak berupa tanah keras, maka dapat menempuh upaya stabilisasi tanah atau sistem perkuatan tanah agar daya dukungnya dapat terpenuhi. Daya dukung fondasi dangkal yang diberi perkuatan tiang menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan fondasi dangkal tanpa perkuatan tiang (Li and Zhang, 2023). Daya dukung fondasi dangkal pada tanah stabilisasi dapat dilakukan melalui uji beban di laboratorium atau menggunakan analisis dengan metode elemen hingga. Sifat-sifat material yang diperlukan dalam analisis elemen hingga menggunakan parameter tanah yang telah distabilisasi (Rasouli et al., 2017). Analisis menggunakan beberapa persamaan konvensional juga dapat digunakan untuk mendapatkan daya dukung fondasi dangkal. Selain parameter tanah dasarnya, daya dukung fondasi dapat dipengaruhi oleh bentuk penampang fondasi. Daya dukung fondasi bentuk persegi atau bujur sangkar didapatkan lebih tinggi dari daya dukung fondasi bentuk persegi panjang untuk setiap penambahan bahan stabilisasi (Fahriani and Apriyanti, 2017).

Tanah dasar dapat berupa tanah di bawah dasar fondasi atau tanah dasar untuk pekerjaan jalan yang sering disebut sebagai *subgrade*. Istilah *subgrade* sering ditemukan pada perencanaan perkerasan jalan raya maupun perencanaan jalan rel. Tanah dasar pada lapisan tanah asli memiliki nilai CBR yang berbeda-beda di sepanjang pekerjaan jalan. CBR tanah dasar pada pekerjaan jalan sebaiknya memiliki nilai lebih besar dari 6%, akan tetapi nilai CBR tanah dasar untuk pekerjaan rel seharusnya berada di atas 8% (Waruwu et al., 2022a). Nilai CBR tanah berhubungan erat dengan daya dukung tanah. Tanah dasar dari tanah lunak seperti lempung lunak dan tanah gambut menunjukkan daya dukung tanah yang sangat rendah. Daya dukung tanah gambut tanpa perkuatan tanah didapatkan jauh lebih rendah daripada tanah yang diberi perkuatan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018; Waruwu et al., 2024e). Peningkatan kinerja tanah dasar didapatkan melalui sistem perbaikan tanah dengan stabilisasi atau dengan metode perkuatan. Stabilisasi tanah

dapat menggunakan material-material yang potensi baik dari bahan limbah maupun material lokal.

Material serbuk marmer dari limbah pabrik marmer dapat digunakan pada stabilisasi tanah. Penggunaan serbuk marmer memberikan dampak yang lebih baik dibandingkan metode lainnya seperti *biogrouting* jika dilihat dari peningkatan nilai CBR atau *California Bearing Ratio* (Waruwu et al., 2024a). Penggunaan serbuk marmer pada perbaikan tanah dasar memberikan dampak yang baik pada peningkatan nilai CBR, mengurangi sifat plastisitas tanah, dan meningkatkan kepadatan tanah (Waruwu et al., 2024c). Selain perbaikan sifat-sifat tersebut, serbuk marmer juga memberikan dampak yang baik dalam peningkatan kuat geser tanah (Waruwu et al., 2024d). Peningkatan perbaikan tanah dengan serbuk marmer dapat juga dioptimalkan dengan penambahan material lainnya seperti kapur (Waruwu et al., 2024b). Penelitian lain menunjukkan material seperti serbuk marmer mengandung CaO sebagai senyawa yang efektif digunakan untuk stabilisasi, karena mampu berfungsi sebagai pengering untuk tanah yang basah (Indriyanti and Kasmawati, 2018).

Material stabilisasi lainnya yang berpotensi untuk digunakan adalah pecahan batu bukho. Material ini selain digunakan untuk perbaikan tanah dasar, juga memiliki potensi baik dalam menggantikan sebagian agregat pada campuran beton. Hal ini terlihat pada nilai kuat tekan beton campuran batu bukho mendekati sama dengan kuat tekan beton dengan penggunaan agregat yang umum digunakan (Susanti et al., 2024). Umumnya perbaikan tanah lunak dilakukan dengan urugan tanah yang bergradasi baik. Material bermutu baik sulit didapatkan di daerah-daerah tertentu, sehingga biaya cukup mahal apabila tetap harus mendatangkan material bermutu baik. Tanah dasar dengan mutu rendah dapat diperbaiki dengan cara stabilisasi menggunakan pecahan batu bukho.

Analisis daya dukung fondasi menggunakan metode elemen hingga memerlukan data parameter tanah yang cukup kompleks, sehingga perlu metode sederhana yang dapat digunakan secara praktis. Analisis daya dukung tanah pada umumnya terdiri dari komponen kekuatan kohesi, komponen berat tanah di atas dasar fondasi, dan berat tanah di bawah dasar fondasi (Fauzi and Ikhy, 2016). Namun, analisis daya dukung fondasi pada tanah kohesif dapat cukup menggunakan komponen kohesi, dalam hal ini berupa kuat geser *undrained* (c_u). Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan penelitian analisis daya dukung fondasi dangkal pada tanah yang telah distabilisasi dengan material stabilisasi baik berupa serbuk marmer maupun serbuk batu bukho. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan parameter kuat geser *undrained* tanah stabilisasi pada analisis daya dukung fondasi dangkal, selain itu dampak dari perbaikan tanah dapat diamati pada peningkatan daya dukung fondasi di atas tanah dasar yang telah distabilisasi.

2. METODE PENELITIAN

Makalah ini menguraikan hasil analisis daya dukung fondasi dangkal pada tanah yang telah distabilisasi. Daya dukung fondasi menggunakan data dari tanah kohesif, dalam hal ini berupa parameter kuat geser *undrained* (c_u) berdasarkan hasil uji kuat tekan bebas. Data kuat geser *undrained* ini diperoleh dari hasil penelitian pada tanah yang distabilisasi dengan serbuk marmer dan serbuk batu bukho.

Tanah yang digunakan untuk stabilisasi serbuk marmer diambil dari Cikarang dan tanah yang digunakan untuk stabilisasi serbuk batu bukho diambil dari Cikande, jadi penelitian ini merupakan penelitian yang terpisah satu sama lainnya. Serbuk marmer diambil dari limbah pabrik marmer di daerah Serang Banten, sedangkan serbuk batu bukho diambil dari pecahan batu bukho yang berasal dari Kepulauan Nias Sumatera Utara. Material stabilisasi ini menggunakan material berupa serbuk yang lolos saringan no. 40. Serbuk dari saringan keduanya ditunjukkan dalam Gambar 19. Penambahan material stabilisasi baik serbuk marmer maupun serbuk batu bukho digunakan pada masing-masing benda uji sebanyak 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12% sama dengan jumlah penambahan material yang digunakan pada penelitian sebelumnya (Waruwu et al., 2024c).

Beberapa pengujian dilakukan pada tanah dengan dan tanpa stabilisasi untuk mengamati sifat-sifat penting seperti berat jenis, batas cair, batas plastis, dan pemandatan standar. Batas cair dan batas plastis diperlukan untuk mengetahui dampak dari stabilisasi terhadap sifat plastisitas tanah. Pemandatan standar dibutuhkan untuk menentukan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum. Kadar air optimum digunakan sebagai dasar dalam penambahan air pada campuran tanah untuk benda uji kuat tekan bebas (*unconfined compression test*).

Benda uji untuk kuat tekan bebas masing-masing diperam 0 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Benda uji ini diuji pada alat uji kuat tekan bebas untuk mendapatkan nilai kuat tekan tanah maksimum (q_u). Nilai kuat geser *undrained* (c_u) tanah dapat diperoleh dari setengah nilai kuat tekan tanah maksimum. Parameter inilah yang digunakan untuk menentukan daya dukung fondasi dangkal.



(a)

(b)

Gambar 19. Material stabilisasi dari (a) Serbuk marmer; (b) Serbuk batu bukho

Daya dukung fondasi dihitung menggunakan persamaan daya dukung Skempton seperti pada Persamaan (1). Nilai kuat geser *undrained* menggunakan data dari hasil uji kuat tekan bebas pada tanah yang distabilisasi serbuk marmer maupun serbuk batu bukho. Nilai faktor daya dukung Skempton (N_c) diperoleh dari analisis dengan persamaan yang telah dipaparkan pada penelitian (Hassaan et al., 2012). Nilai N_c dibedakan untuk masing-masing bentuk penampang fondasi dangkal seperti fondasi bujur sangkar, lingkaran, persegi panjang, dan memanjang. Faktor daya dukung untuk fondasi bujur sangkar sama dengan fondasi bentuk lingkaran. Dampak stabilisasi tanah dapat dianalisis dari perbandingan daya dukung fondasi pada tanah yang telah distabilisasi dengan daya dukung tanah tanpa stabilisasi.

$$q_u = c_u \times N_c \quad (1)$$

dengan q_u = daya dukung fondasi dangkal (kPa), c_u = kuat geser *undrained* (kPa), dan N_c = faktor daya dukung.

Faktor daya dukung (N_c) Skempton dapat dihitung menggunakan persamaan dari penelitian berdasarkan perbandingan antara kedalaman fondasi dangkal (D) dengan lebar fondasi (B) atau D/B (Hassaan et al., 2012). Persamaan faktor daya dukung terdiri dari persamaan N_c untuk fondasi dangkal bentuk lingkaran atau bujur sangkar dan persamaan N_c untuk fondasi dangkal bentuk memanjang. Sedangkan untuk persamaan N_c untuk fondasi dangkal bentuk persegi panjang dianalisis menggunakan Persamaan (2).

$$N_c = (0,84 + 0,16 B/L) N_{c-bujur sangkar} \quad (2)$$

dengan N_c = faktor daya dukung, B = lebar fondasi dangkal bentuk persegi panjang (m), dan L = panjang fondasi dangkal bentuk persegi panjang (m).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang dipaparkan dalam makalah ini diawali dengan sifat-sifat tanah yang distabilisasi untuk memberikan gambaran perbaikan perilaku tanah khususnya berat jenis, sifat plastisitas tanah, dan kepadatan tanah. Sifat-sifat tanah stabilisasi serbuk marmer ditunjukkan dalam Tabel 15. Sifat-sifat tanah stabilisasi serbuk batu bukho ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai berat jenis tanah relatif semakin lebih kecil seiring dengan bertambahnya kadar material stabilisasi baik serbuk marmer maupun serbuk batu bukho.

Tabel 15. Sifat-sifat tanah stabilisasi serbuk marmer

Sifat-sifat tanah	Satuan	Tanah lempung Cikarang	Tanah stabilisasi serbuk marmer			
			3%	6%	9%	12%
Berat jenis (G_s)	-	2,74	2,68	2,70	2,70	2,68
Batas cair (LL)	%	45,03	43,70	42,28	40,97	40,54
Batas plastis (PL)	%	21,11	24,18	28,45	31,33	32,85
Indeks plastisitas (PI)	%	23,91	19,53	13,83	9,64	7,69
Berat isi kering ($\gamma_{d-\max}$)	gr/cm ³	1,50	1,51	1,55	1,49	1,49
Kadar air optimum (w_{opt})	%	21,0	21,0	17,5	20,0	21,0

Berdasarkan nilai plastisitas tanah yang digunakan dalam penelitian, didapatkan bahwa tanah yang diambil dari Cikarang dan Cokande keduanya menunjukkan nilai plastisitas tanah yang tinggi masing-masing 23,91% untuk tanah lempung Cikarang dan 25,37% untuk tanah lempung Cokande, karena nilai indeks plastisitas tanah berada di antara 20-40 % (Venkatramaiah, 2006; Waruwu et al., 2023). Serbuk marmer memberikan pengaruh yang signifikan pada penurunan sifat plastisitas tanah. Sifat plastisitas tanah dapat berubah dari tinggi (*high plasticity*) menjadi rendah (*low plasticity*). Serbuk batu bukho dapat mengubah sifat plastisitas tanah dari tinggi menjadi sedang (*medium plasticity*).

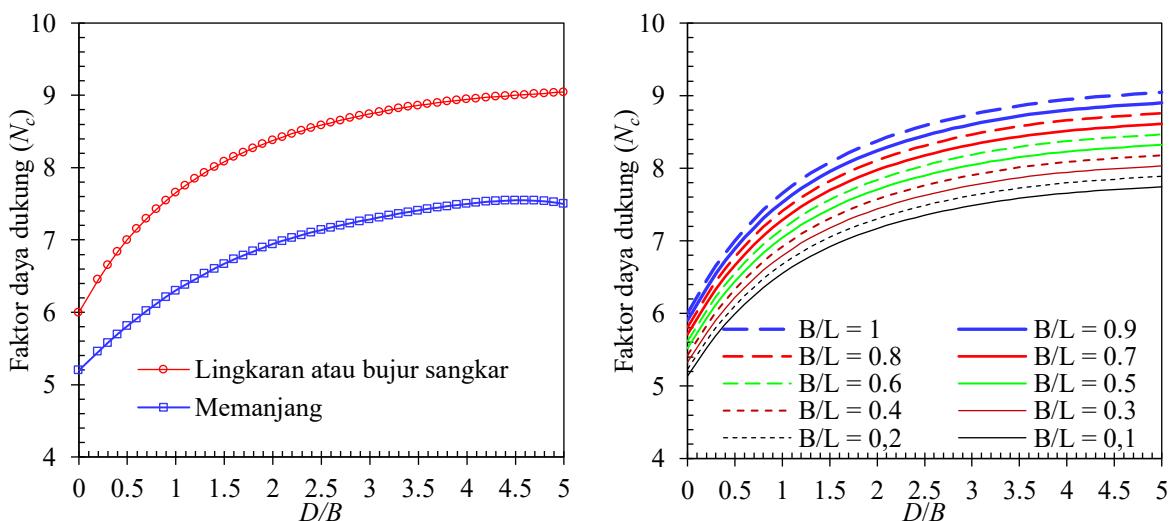
Kepadatan tanah dapat dilihat dari nilai berat isi kering tanah. Kepadatan tanah dengan stabilisasi serbuk marmer meningkat tajam pada kadar 6% serbuk marmer. Peningkatan kepadatan ini jauh lebih baik dibandingkan dengan

kepada tanah yang distabilisasi dengan serbuk batu bukho.

Tabel 16. Sifat-sifat tanah stabilisasi serbuk batu bukho

Sifat-sifat tanah	Satuan	Tanah lempung Cikande	Tanah stabilisasi serbuk batu bukho			
			3%	6%	9%	12%
Berat jenis (G_s)	-	2,74	2,75	2,72	2,63	2,62
Batas cair (LL)	%	50,93	50,02	48,27	44,91	39,24
Batas plastis (PL)	%	25,56	27,89	27,12	24,62	24,96
Indeks plastisitas (PI)	%	25,37	22,12	21,14	20,29	14,27
Berat isi kering (γ_d -max)	gr/cm ³	1,49	1,51	1,51	1,50	1,49
Kadar air optimum (w_{opt})	%	25,2	24,9	24,6	24,2	24,0

Hasil analisis faktor daya dukung untuk fondasi bentuk lingkaran atau bujur sangkar dan faktor daya dukung untuk fondasi bentuk memanjang ditunjukkan pada Gambar 20a. Secara terpisah untuk faktor daya dukung untuk fondasi bentuk persegi panjang dengan rasio B/L dari 0,1-1,0 ditunjukkan pada Gambar 20b. Faktor daya dukung terlihat memberikan peningkatan yang nyata di rasio D/B yang kecil, sementara untuk D/B yang tinggi relatif tidak memperlihatkan peningkatan yang berarti. Ini memberi arti bahwa fondasi dangkal yang lebih dalam kurang efektif dalam peningkatan faktor daya dukung. Apabila diamati lebih jauh, faktor daya dukung untuk fondasi bentuk persegi panjang didapatkan bahwa B/L yang semakin besar semakin mendekati sama dengan faktor daya dukung untuk fondasi bentuk bujur sangkar, sedangkan untuk B/L yang semakin kecil semakin mendekati sama dengan faktor daya dukung untuk fondasi bentuk memanjang.

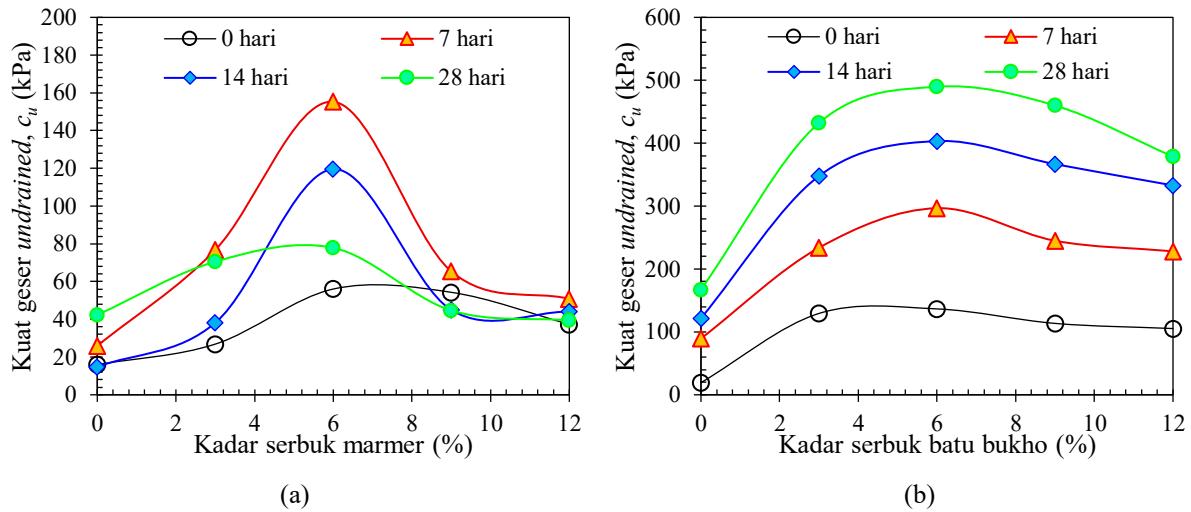


Gambar 20. Faktor daya dukung: (a) Pondasi memanjang dan lingkaran atau bujur sangkar; (b) Pondasi persegi panjang

Nilai kuat geser *undrained* (c_u) tertinggi didapatkan pada penambahan serbuk marmer sebanyak 6%. Penambahan 6% serbuk marmer merupakan jumlah terbaik dalam memperbaiki perilaku tanah dasar (Waruwu et al., 2024c). Hal yang sama didapatkan pada peningkatan nilai kuat geser tanah hasil uji dari triaksial, kuat geser tanah meningkat maksimal pada penambahan serbuk marmer sebanyak 6% (Waruwu et al., 2024d). Hasil penelitian dari kedua jenis material ini menunjukkan kuat geser *undrained* pada penambahan 6% material stabilisasi baik serbuk marmer maupun serbuk batu bukho, hal yang sama diperoleh pada penggunaan 6% kapur, sedikit berbeda dengan penggunaan abu vulkanik (Waruwu et al., 2022b). Nilai kuat tekan maksimum pada tanah stabilisasi dapat diperoleh pada penambahan 9% abu vulkanik (Waruwu et al., 2021).

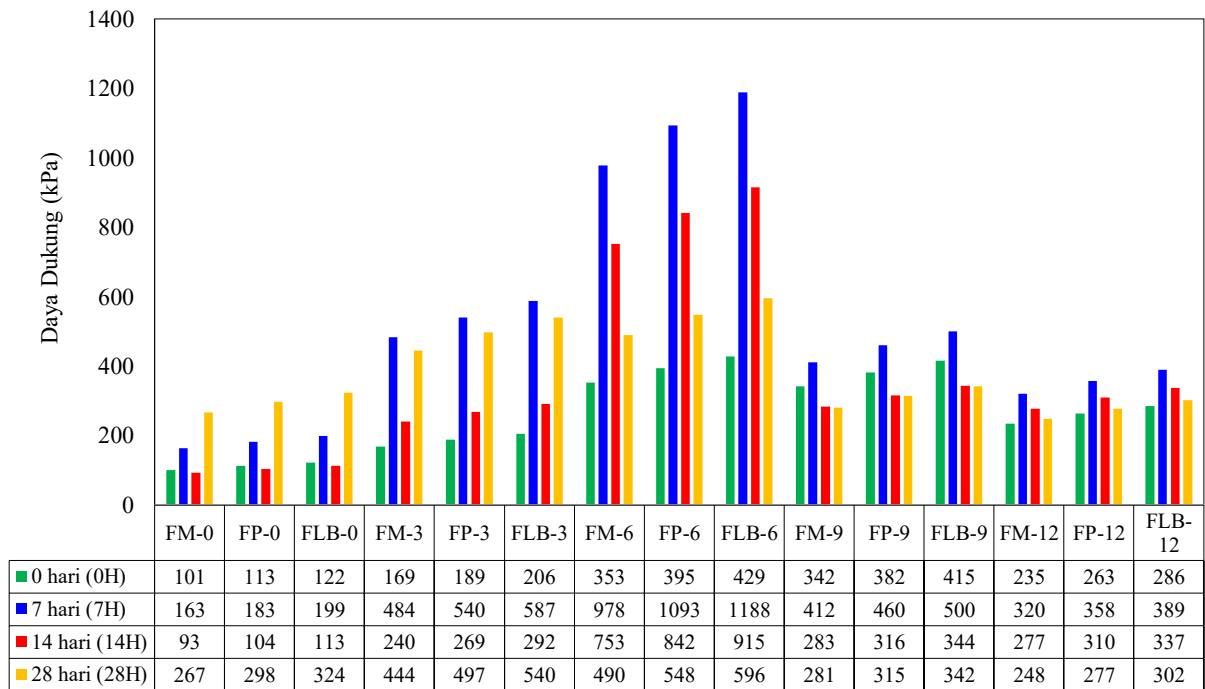
Berdasarkan nilai faktor daya dukung dari masing-masing bentuk fondasi dan dengan menggunakan Persamaan (1), maka didapatkan daya dukung fondasi dangkal untuk $D/B = 1$ pada tanah stabilisasi serbuk marmer seperti ditunjukkan pada Gambar 22. Sementara daya dukung fondasi dangkal untuk $D/B = 1$ pada tanah stabilisasi serbuk batu bukho ditunjukkan dalam Gambar 23. Adapun nilai kuat geser *undrained* diperoleh dari hasil uji tanah stabilisasi seperti pada Gambar 21. Peningkatan kadar material stabilisasi tidak selalu berbanding linier dengan daya dukung fondasi. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa kadar material stabilisasi serbuk marmer 9-12% tidak seefektif kadar serbuk marmer 3-6%. Peningkatan daya dukung fondasi pada 6% material stabilisasi dapat meningkatkan kekuatan tanah dasar di bawah fondasi. Hal ini dapat disebabkan karena penambahan material stabilisasi yang terlalu banyak

dapat mengurangi kekuatan tanah dasar, sehingga menyebabkan kegagalan geser di area bawah fondasi (Rasouli et al., 2017).

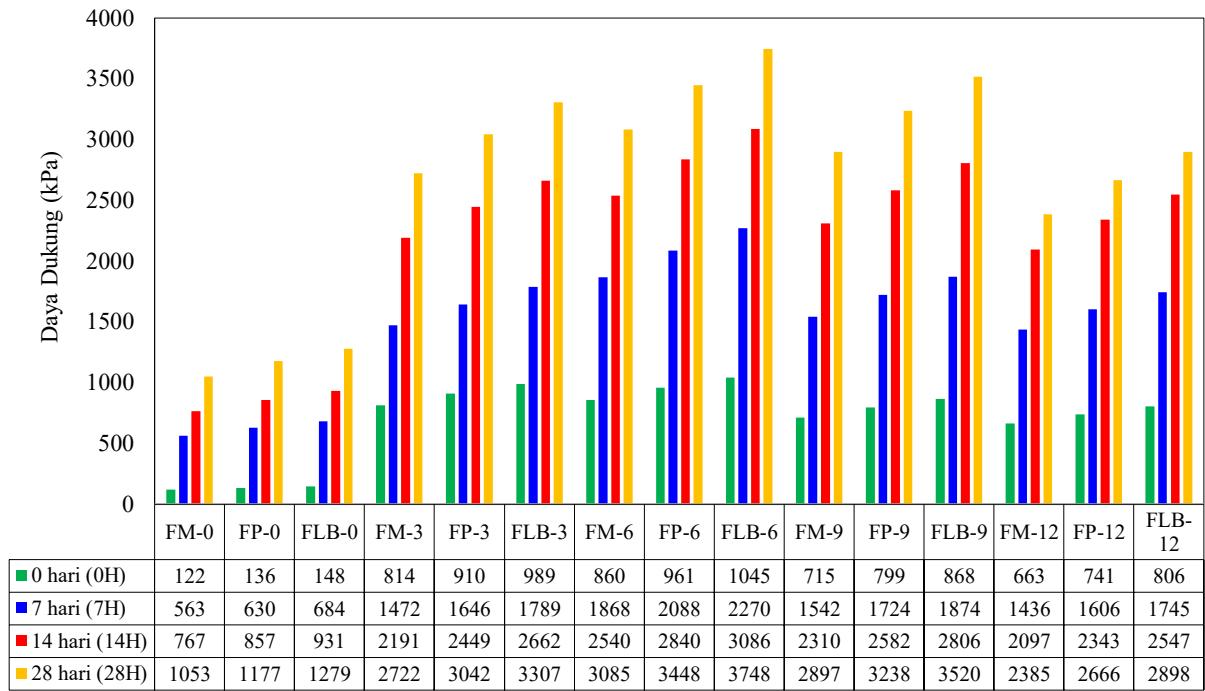


Gambar 21. Nilai kuat geser *undrained*: (a) Tanah stabilisasi serbuk marmer; (b) Tanah stabilisasi serbuk batu bukho

Berdasarkan hasil analisis daya dukung dipastikan bahwa nilai daya dukung fondasi sangat dipengaruhi oleh bentuk fondasi yang digunakan. Semua hasil analisis daya dukung didapatkan bahwa fondasi bentuk lingkaran dan bujur sangkar selalu lebih tinggi dari pada daya dukung fondasi persegi panjang. Daya dukung terendah ditunjukkan pada daya dukung fondasi bentuk memanjang. Hal ini jelas terlihat dari faktor daya dukung yang berbeda-beda untuk masing-masing bentuk tapak fondasi. Nilai faktor daya dukung ditemukan bahwa faktor daya dukung fondasi bentuk memanjang lebih kecil daripada fondasi persegi panjang dan bujur sangkar atau lingkaran.

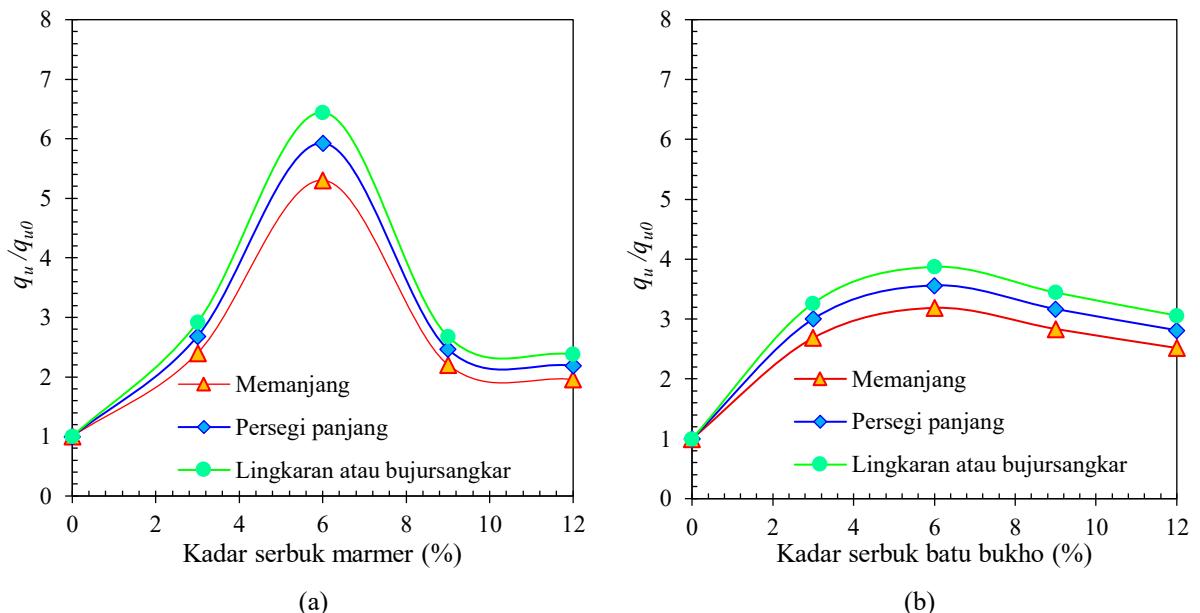


Gambar 22. Daya dukung fondasi pada tanah stabilisasi serbuk marmer pada $D/B = 1$



Gambar 23. Daya dukung fondasi pada tanah stabilisasi serbuk batu bukho pada $D/B = 1$

Perbandingan daya dukung fondasi pada tanah stabilisasi dengan tanah yang tidak distabilisasi (q_u/q_{u0}) ditunjukkan dalam Gambar 24. Peningkatan daya dukung fondasi lingkaran atau bujur sangkar selalu lebih tinggi daripada jenis fondasi lainnya, hal yang sama ditemukan pada daya dukung fondasi persegi panjang selalu lebih tinggi dari fondasi memanjang. Ini dapat diartikan bahwa fondasi lingkaran atau bujur sangkar lebih efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah pada tanah kohesif. Pilihan lainnya dapat menggunakan fondasi persegi panjang dibandingkan fondasi memanjang. Hal ini dibatasi pada pertimbangan daya dukung tanah, tidak pada pertimbangan jenis beban yang bekerja pada fondasi seperti beban vertikal dan momen atau pertimbangan metode pelaksanaan dan fungsi fondasi yang digunakan.



Gambar 24. Peningkatan daya dukung fondasi pada: (a) Tanah stabilisasi serbuk marmer; (b) Tanah stabilisasi serbuk batu bukho

Hal penting lainnya yang didapatkan dalam analisis daya dukung ini adalah perbandingan peningkatan daya dukung fondasi pada tanah dengan jenis material stabilisasi yang berbeda. Peningkatan daya dukung fondasi pada tanah

stabilisasi serbuk marmer didapatkan sekitar 5-6,5 kali lebih tinggi dari tanah tanpa stabilisasi. Peningkatan ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan peningkatan yang terjadi pada daya dukung fondasi di atas tanah dasar yang distabilisasi dengan serbuk batu bukho sekitar 3-4 kali. Kedua jenis material menghasilkan peningkatan tertinggi pada penggunaan 6% kadar material stabilisasi baik serbuk marmer maupun serbuk batu bukho.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis daya dukung fondasi dangkal dan pembahasan yang telah dilakukan, maka ada beberapa kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini di antaranya:

1. Perbaikan tanah dasar fondasi dengan stabilisasi serbuk marmer dan serbuk batu bukho memberikan dampak dalam peningkatan kuat geser tanah, peningkatan kepadatan, dan perbaikan sifat plastisitas tanah dari plastisitas tinggi menjadi plastisitas rendah untuk stabilisasi serbuk marmer dan plastisitas sedang untuk stabilisasi serbuk batu bukho. Ini dapat digunakan sebagai petunjuk awal dalam memperoleh peningkatan daya dukung fondasi di atas tanah stabilisasi.
2. Faktor daya dukung fondasi dipengaruhi oleh bentuk fondasi dan rasio kedalaman dengan lebar fondasi. Fondasi dangkal berbentuk bujur sangkar atau lingkaran selalu lebih tinggi daripada fondasi bentuk lainnya. Faktor daya dukung fondasi bentuk persegi panjang berada di antara fondasi memanjang dan fondasi bujur sangkar. Peningkatan faktor daya dukung fondasi didapatkan lebih tinggi pada rasio kedalaman dengan lebar yang lebih kecil dibandingkan dengan rasio yang lebih tinggi. Ini menunjukkan kedalaman fondasi dangkal yang tidak perlu terlalu jauh dari permukaan tanah.
3. Peningkatan kuat geser *undrained* tanah dasar fondasi didapatkan maksimal pada penggunaan material stabilisasi sebanyak 6%, baik untuk material serbuk marmer maupun serbuk batu bukho. Hal ini memberikan pengaruh yang sama pada analisis daya dukung fondasi. Kedua jenis material stabilisasi yang digunakan memberikan nilai daya dukung fondasi yang cukup tinggi pada kadar 6%. Jumlah material stabilisasi yang terlalu banyak menghasilkan daya dukung yang semakin lebih kecil, hal ini dapat berakibat pada semakin rendahnya kekuatan tanah, sehingga dapat menimbulkan keruntuhan geser pada tanah di bawah fondasi dangkal.
4. Daya dukung fondasi dangkal didapatkan selalu meningkat untuk setiap jumlah material stabilisasi yang digunakan baik material serbuk marmer maupun serbuk batu bukho. Akan tetapi, penggunaan serbuk marmer memberikan peningkatan yang baik dibandingkan dengan serbuk batu bukho. Hal ini ditunjukkan pada peningkatan daya dukung untuk tanah dasar dengan stabilisasi material serbuk marmer sekitar 5-6,5 kali lebih tinggi dari daya dukung fondasi tanah tanpa stabilisasi tanah, sedangkan peningkatan daya dukung untuk tanah dasar dengan stabilisasi material serbuk batu bukho didapatkan sekitar 3-4 kali lebih tinggi dari daya dukung fondasi tanpa stabilisasi tanah. Penggunaan kedua tetap cukup efektif dalam meningkatkan daya dukung pada fondasi dangkal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini termasuk laboran di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Pelita Harapan. Data yang digunakan dalam makalah ini merupakan bagian dari penelitian internal UPH dengan nomor kontrak 389/LPPM-UPH/VII/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018. Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- Fahriani, F., Apriyanti, Y., 2017. Analisis Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah dengan Bahan Stabilisasi Sabut Kelapa. In: Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat. Pangkalpinang, pp. 360–363.
- Fauzi, L.A., Ikhyia, I., 2016. Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal Tipe Menerus Pengaruh Kedalaman Tanah Keras. Reka Racana J. Online Inst. Teknol. Nas. 2, 36–46.
- Hardiyatmo, H.C., 2011. Analisis dan Perancangan Fondasi I. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hassaan, G.A., Lashin, M.M., Al-Gamil, M.A., 2012. Computer-Aided Data for Machinery Foundation Analysis and Design. Researcher 4, 50–58.
- Indriyanti, I., Kasmawati, K., 2018. Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. J. Tek. Hidro 11, 14–25.
- Li, Z., Zhang, G., 2023. Centrifuge Model Test Study on Micro-Pile Reinforcement of Shallow Foundation. Soils Found. 63, 101320.
- Rasouli, H., Takhtfiroozeh, H., Ghalesari, A.T., Hemati, R., 2017. Bearing Capacity Improvement of Shallow Foundations Using Cement-Stabilized Sand. Key Eng. Mater. 723, 795–800.

- Santoso, H., Cahyo, Y., Ridwan, A., 2020. Penelitian Stabilitas Struktur Tanah Lempung Bersifat Monmorillonite Menggunakan Limbah Ampas Kopi. *J. Manaj. Teknol. Sipil* 3, 108.
- Susanti, R.D., Purba, S.M., Waruwu, A., Koryati, T., Syahputra, A., Pardede, D.F., 2024. Study of Compressive Strength of Concrete Modified with Bukho Stone Fractions. *Int. J. GEOMATE* 27, 79–86.
- Venkatramaiyah, C., 2006. Geotechnical Engineering. New Age International Publishers, New Delhi India.
- Waruwu, A., Arfan, M., Waruwu, T.O., 2022a. The Behavior of the Perbaungan Railway Subgrade. *J. Infrastruct. Plan. Eng.* 1, 46–50.
- Waruwu, A., Darmawandi, A., Halawa, T., Muammar, 2022b. Perbandingan Abu Vulkanik dan Kapur Sebagai Material Stabilisasi Tanah Lempung. *J. Proy. Tek. Sipil* 5, 8–15.
- Waruwu, A., Pangemanan, I., Yunita, Y., Calvin, F., Lujaya, J., 2024a. Uji CBR (California Bearing Ratio) pada Tanah Lempung Stabilisasi Abu Marmer dan Biogrouting. *Media Komun. Tek. Sipil* 30, 47–55.
- Waruwu, A., Priyo, A.N., Raymond, 2024b. Kajian Penambahan Kapur dan Serbuk Marmer Terhadap Kuta Tekan Tanah Lempung. *Media Komun. Tek. Sipil* 30, 207–214.
- Waruwu, A., Purba, S.M., Wijaya, N.Y., Sumantri, N.A., Pangemanan, I.L., 2024c. The Performance of Soil Stabilization with Marble Ash in Physical Model Tests in The Laboratory. *Int. J. GEOMATE* 27, 49–56.
- Waruwu, A., Setiawan, C., Tantono, C., Boediono, M.E., 2024d. Dampak Penggunaan Abu Marmer terhadap Kuat Geser Tanah Lempung. *J. Tek.* 45, 183–190.
- Waruwu, A., Telaumbanua, D.P.T., Waruwu, T.O., 2023. Estimating Consolidation Settlement Using the Physical Properties of Clay Soil Under Embankment. *Int. Rev. Civ. Eng.* 14, 570–579.
- Waruwu, A., Widjajakusuma, J., Denzel, B., Calvin, F., 2024e. The Bearing Capacity of Peat Soil with Bamboo Reinforcement. *Int. J. GEOMATE* 26, 19–25.
- Waruwu, A., Zega, O., Rano, D., Panjaitan, B.M.T., Harefa, S., 2021. Kajian Nilai California Bearing Ratio (CBR) pada Tanah Lempung Lunak dengan Variasi Tebal Stabilisasi Menggunakan Abu Vulkanik. *J. Rekayasa Sipil* 17, 116–130.