



Perilaku Mekanis Tanah Lunak yang Distabilisasi dengan Kapur dan Abu Vulkanik

*Novdin Manoktong Sianturi^{1,2}, Mohd Khairul Amri Kamarudin², Dermina Roni Santika Damanik¹, Virgo Erlando Purba¹, Deardo Samuel Saragih¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Simalungun, Pematang Siantar

²East Cosy Environmental Research Institute - Universiti Sultan Zainal Abidin Malaysia

^{*}msnovdin@gmail.com

Received: 10 Oktober 2021 Revised: 24 Juni 2022 Accepted: 28 Juli 2022

Abstract

The properties of soft clay can be seen from the compressive strength value through the unconfined compressive strength (UCS) test. Soft soil was less well used as the subgrade for construction. The aim is to determine the increase in the unconfined compressive strength and bearing capacity of the foundation due to the addition of lime and volcanic ash on soft soil. Soft soil has undrained shear strength < 25 kPa based on the unconfined compressive strength test. The unconfined compressive strength test has been conducted on the soil-lime mixture and soil-volcanic ash mixture of 3-12% respectively to the weight of dry soil. The highest unconfined compressive strength values were found in soils with 6% of lime and 9% of volcanic ash. The bearing capacity of the foundation on soil stabilized with 6% lime increased 13.7 times, while the bearing capacity of the foundation on the soil with the addition of 9% volcanic ash increased the ultimate bearing capacity of 8.7 times the bearing capacity of the foundation on soft soil. The bearing capacity of the foundation on lime stabilized soil is higher than the bearing capacity of the foundation on volcanic ash stabilized soil.

Keywords: *Soft clay, lime, volcanic ash, compressive strength, bearing capacity of foundation*

Abstrak

Sifat lempung lunak dapat dilihat dari nilai kuat tekan bebas melalui pengujian unconfined compressive strength (UCS). Tanah lunak kurang baik digunakan sebagai tanah dasar konstruksi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui peningkatan kuat tekan bebas dan daya dukung pondasi akibat penambahan kapur maupun abu vulkanik pada tanah lunak. Tanah lunak memiliki kuat geser undrained < 25 kPa berdasarkan uji kuat tekan bebas. Uji kuat tekan bebas dilakukan pada tanah dengan penambahan kapur maupun abu vulkanik masing-masing 3-12% terhadap berat tanah kering. Nilai kuat tekan bebas tertinggi didapatkan pada tanah dengan 6% kapur dan 9% abu vulkanik. Daya dukung pondasi pada tanah yang distabilisasi dengan 6% kapur meningkat 13,7 kali, sedangkan daya dukung pondasi pada tanah dengan penambahan 9% abu vulkanik meningkatkan daya dukung ultimit sebesar 8,7 kali daya dukung pondasi pada tanah lunak. Daya dukung pondasi pada tanah yang distabilisasi kapur lebih tinggi dari daya dukung pondasi pada tanah yang distabilisasi abu vulkanik.

Kata kunci: *Lempung lunak, kapur, abu vulkanik, kuat tekan bebas, daya dukung pondasi*

Pendahuluan

Tanah dengan karakteristik yang kurang baik seperti tanah lempung lunak kerap menimbulkan masalah karena memiliki daya dukung rendah. Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang sebagian besar terdiri dari butir-butir yang sangat kecil dan memiliki nilai kohesi yang dominan (Waruwu *et al.*, 2021). Lapisan tanah lunak

mempunyai kuat geser rendah, pemampatan tinggi, koefisien permeabilitas rendah, dan daya dukung yang rendah.

Jenis tanah lempung cenderung memiliki sifat kedap air, kohesifitas yang tinggi dan nilai kuat geser yang rendah. Sedangkan tanah pasir mempunyai nilai kuat geser yang tinggi dan gaya tarik menarik antar partikel cenderung kecil. Sifat-

sifat tanah lempung pada umumnya terdiri dari ukuran butir halus (kurang dari 0,002 mm), permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler tinggi, sangat kohesif, kadar kembang susut yang tinggi, dan proses konsolidasi lambat (Hardiyatmo, 2002).

Tanah lunak merupakan salah satu jenis tanah yang dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang, karena tanah ini mempunyai kuat geser rendah dan pemampatan tinggi (Panduan Geoteknik 4, 2002). Tanah lunak terbagi menjadi dua, yaitu tanah lempung lunak dan tanah gambut. Tanah lempung umumnya memiliki nilai plastisitas yang tinggi dengan nilai indeks plastisitas lebih besar dari 17% seperti terlihat pada Tabel 1 (Hardiyatmo, 2002).

Tabel 1. Nilai indeks plastisitas dan macam tanah (Hardiyatmo, 2002)

PI (%)	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Berdasarkan Tabel 2, sifat tanah lempung lunak dapat dilihat dari nilai kuat tekan (q_u), apabila nilai q_u tanah lebih kecil dari 50 kPa, maka tanah tersebut digolongkan sebagai tanah lempung lunak ke lempung sangat lunak (Hardiyatmo, 2002). Tanah dengan nilai CBR lebih kecil 9% tergolong sebagai tanah yang kurang baik untuk tanah dasar konstruksi (Waruwu, 2013). Tanah yang tergolong sebagai tanah lunak, plastisitas tinggi, dan kuat tekan bebas yang rendah memerlukan perbaikan dengan penambahan material stabilisasi.

Tabel 2. Hubungan kuat tekan bebas (q_u) tanah lempung dengan konsistensi (Hardiyatmo, 2002)

Konsistensi	q_u (kPa)
Lempung keras	> 400
Lempung sangat kaku	200-400
Lempung kaku	100-200
Lempung sedang	50-100
Lempung lunak	25-50
Lempung sangat lunak	< 25

Daya dukung tanah dipengaruhi oleh muka air dan kepadatan tanah, tanah lempung lunak yang terendam air memberikan daya dukung yang kecil (Dharmayasa, 2014). Daya dukung pondasi dan tipe keruntuhannya sangat dipengaruhi oleh letak dari tanah keras dan jenis lapisan tanah (Fauzi & Ikhya, 2016). Semakin dalam letak pondasi dan semakin

besar ukuran lebarnya, daya dukung pondasi semakin tinggi.

Kohesi tanah dapat meningkatkan daya dukung pondasi telapak dan memperkecil tekanan ke atas (Manoppo, 2013). Namun, tanah lunak memiliki kohesi pada kondisi *undrained* yang cukup rendah. Perbaikan tanah diperlukan untuk dapat meningkatkan nilai kohesi pada kondisi *undrained*. Perbaikan tanah dengan material yang berserat seperti sabut kelapa dapat meningkatkan daya dukung pondasi, namun peningkatannya hanya 15% akibat penambahan 1-2% sabut kelapa (Fahriani & Apriyanti, 2017).

Metode perbaikan tanah merupakan solusi untuk mengatasi permasalahan tanah lunak. Perbaikan sifat-sifat tanah lunak dapat dilakukan dengan stabilisasi tanah. Cara-cara stabilisasi tanah adalah dengan melakukan pemadatan tanah, mencampur tanah dengan bahan granuler, menggunakan perkuatan, penggalian dan pergantian tanah, serta perbaikan tanah secara kimia dengan mencampur bahan semen, kapur, abu terbang, aspal dan material lainnya (Hardiyatmo, 2010).

Stabilisasi dengan menggunakan bahan tambah atau sering disebut juga stabilisasi kimiawi bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, dengan cara mencampur tanah dengan menggunakan bahan tambah dengan perbandingan tertentu. Material tanah dengan klasifikasi baik seperti tanah lempung plastisitas rendah yang distabilisasi dengan semen atau kapur dapat digunakan sebagai lapis pondasi pada struktur konstruksi jalan (Adha, 2009).

Stabilitas tanah merupakan pencampuran tanah dengan bahan tertentu guna memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu. Proses stabilisasi tanah meliputi pencampuran tanah dengan tanah lain untuk memperoleh gradasi yang diinginkan, atau pencampuran tanah dengan bahan-bahan buatan pabrik, sehingga sifat-sifat teknis tanah menjadi lebih baik. Sifat-sifat teknis tanah tersebut dapat berupa kapasitas dukung, kompresibilitas, permeabilitas, kemudahan dikerjakan, potensi pengembangan, dan sensitifitas terhadap perubahan kadar air.

Ada beberapa metode untuk perbaikan tanah seperti penggantian tanah, perkuatan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah, perbaikan tanah, *stone column*, tiang-tiang, dan pencampuran bahan kimia seperti semen dan kapur (Kazemian *et al.*, 2011). Perbaikan tanah lunak dapat dilakukan dengan penggunaan system perkuatan pada arah horizontal (Waruwu, *et al.*, 2022). Perbandingan campuran bergantung pada kualitas campuran yang diinginkan. Jika pencampuran hanya dimaksudkan

untuk merubah gradasi dan plastisitas tanah, dan kemudian dikerjakan, maka hanya memerlukan bahan tambah sedikit. Namun, bila stabilisasi dimaksudkan untuk merubah tanah agar mempunyai kekuatan tinggi, maka diperlukan bahan tambah yang lebih banyak.

Menurut Suaryana dan Fransisko (2018) stabilisasi dua tahap pada tanah lempung menggunakan kapur dan semen dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas dari $1,9 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $9,05 \text{ kg/cm}^2$ dengan kadar kapur 6% pada tahap pertama, dengan peningkatan kuat tekan bebas dari $9,05 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $14,55 \text{ kg/cm}^2$ dengan kadar semen sebanyak 8%.

Campuran stabilisasi tanah dasar dan lapis fondasi tanah semen harus dalam rentang 3% sampai 8% dari berat tanah asli dalam keadaan kering oven (Direktoral Jenderal Bina Marga, 2018). Penggunaan 20-30% abu vulkanik dengan 5% kapur memperlihatkan perbaikan sifat-sifat tanah lunak (Nasarani *et al.*, 2019). Penambahan 9% abu vulkanik dan 6% kapur menunjukkan peningkatan kuat tekan bebas yang cukup signifikan pada tanah lempung (Waruwu, *et al.*, 2022).

Stabilisasi tanah dengan menggunakan kapur cocok untuk tanah dasar pada pembangunan jalan, dan biasanya dicampur sebanyak 2-6% kadar kapur terhadap berat (Hardiyatmo, 2014). Pencampuran abu vulkanik dan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif antara lain dapat meningkatkan berat isi tanah, mengurangi kadar air, peningkatan nilai geser tanah, dan karakteristik pengembangan tanah lempung semakin berkurang dengan penambahan abu vulkanik yang bersifat non plastis (Latif *et al.*, 2017).

Tanah lempung ekspansif dapat distabilisasi dengan kapur padam, perbaikan indeks plastisitas tanah cukup signifikan pada penambahan 6% (Sutikno & Damianto, 2009). Hal yang sama didapatkan pada peningkatan nilai CBR tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 6% kapur padam, nilai CBR tanah di atas 6% kapur tidak melonjak tinggi. Menurut SNI 03-3437-1994, jumlah kapur yang digunakan dalam campuran adalah antara 2-15% dihitung terhadap berat kering tanah.

Material yang digunakan untuk perbaikan tanah sangat beragam, hal ini disesuaikan dengan ketersediaan material di daerah yang membutuhkan perbaikan tanah. Hal ini dapat meningkatkan keterlibatan dan partisipasi masyarakat lokal dalam penyediaan material (Sianturi *et al.*, 2019). Selain kapur, semen, abu terbang batu-bara, juga ada abu vulkanik. Penambahan 9% abu vulkanik dapat meningkatkan nilai kuat tekan sebesar 36,6% dan

CBR tanah lempung sebesar 6,15% (Triputro & Rahayu, 2016). Awalnya nilai kuat tekan tanah lempung hanya 76 kPa meningkat menjadi 120 kPa dengan penambahan 9% abu vulkanik. Hal yang sama didapatkan pada peningkatan nilai CBR dari 1,3156 % menjadi 1,4027 % setelah tanah lempung ditambah dengan 9% abu vulkanik.

Pencampuran abu vulkanik dan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif dapat meningkatkan berat isi tanah, mengurangi kadar air, peningkatan nilai geser tanah, dan karakteristik pengembangan tanah lempung semakin berkurang dengan penambahan abu vulkanik yang bersifat non plastis (Latif *et al.*, 2017). Karakteristik tanah lunak dapat berubah menjadi lempung sangat kaku dengan penambahan 9% abu vulkanik (Waruwu *et al.*, 2021).

Kajian penelitian dilakukan dengan pemilihan tanah lempung lunak dengan menguji karakteristiknya, kemudian diteruskan dengan perbaikan menggunakan material stabilisasi dari kapur dan abu vulkanik. Parameter tanah yang akan dicari adalah peningkatan nilai kuat tekan dan penurunan plastisitas tanah. Berdasarkan nilai kuat tekan didapatkan nilai kohesi tanah pada kondisi *undrained*. Daya dukung pondasi di atas tanah hekesif dapat ditentukan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan konsistensi tanah lempung lunak akibat stabilisasi, untuk mengetahui persentase penambahan kapur maupun abu vulkanik dalam menghasilkan nilai kuat tekan bebas tertinggi, dan untuk mengetahui daya dukung pondasi telapak pada tanah yang distabilisasi dengan kapur maupun abu vulkanik.

Metode

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil, Universitas Simalungun. Tanah lempung yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah yang berasal dari Deli Serdang, Sumatera Utara (lihat Gambar 1). Tanah diambil dari kedalaman 60-150 cm dan berbentuk bongkahan untuk sampel teranggu dan dimasukkan dalam tabung untuk sampel tak terganggu. Sampel terganggu dijemur terlebih dahulu sebelum diuji (Gambar 2). Sampel yang sudah dijemur, kemudian disaring dengan saringan No. 40.

Pengujian awal dilakukan untuk mengetahui kadar air, berat jenis, batas-batas konsistensi (*Atterberg limit*), distribusi ukuran butiran, dan kuat tekan tanah tidak terganggu, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3. Pengujian-pengujian ini diperlukan untuk memastikan tanah yang diteliti merupakan tanah

lempung dengan plastisitas tinggi berdasarkan nilai indeks plastisitas dan lempung lunak berdasarkan nilai kuat tekan bebas. Sifat plastisitas diuji dengan *Atterberg limit*.



Gambar 1. Proses pengambilan sampel tanah



Gambar 2. Proses pengeringan sampel tanah

Sifat yang diperbaiki pada tanah lempung ini adalah sifat konsistensi tanah dilihat dari nilai kuat tekan bebas (q_u). Sifat-sifat ini diperbaiki dengan penambahan material kapur dan abu vulkanik dari Gunung Sinabung (Gambar 3). Kadar kapur dan abu vulkanik masing-masing sebesar 3%, 6%, 9%, dan 12 % dari berat tanah kering. Jumlah bahan tambah yang digunakan pada penelitian ini mendekati jumlah 3-8% dari berat tanah asli dalam keadaan kering oven yang direkomendasi (Direktoral Jenderal Bina Marga, 2018). Hasil penelitian (Waruwu, *et al.*, 2022) didapatkan bahwa 9% abu vulkanik dan 6% kapur memberikan perbaikan yang optimal pada tanah lempung.



(a) (b)

Gambar 3. (a) Kapur dan (b) Abu vulkanik

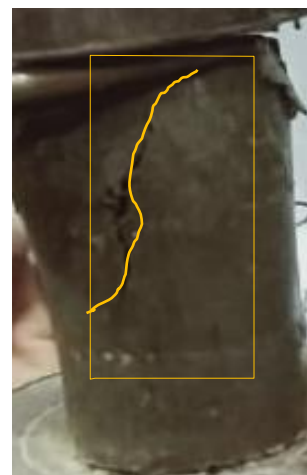
Kadar air yang diperlukan dalam pencampuran sampel tanah untuk pengujian kuat tekan bebas didapatkan dari hasil pengujian pemadatan standart (*compaction*). Sampel uji pemadatan dilakukan pada setiap jumlah campuran 3%, 6%, 9%, dan 12% baik material kapur maupun abu vulkanik. Selain kadar air optimum, berat volume kering maksimum didapatkan dari pengujian pemadatan standar.

Uji kuat tekan bebas

Uji utama untuk mengetahui nilai kuat tekan bebas dan sifat konsistensi dilakukan dengan menggunakan alat uji kuat tekan (Gambar 4). Tanah dan campuran material kapur atau abu vulkanik dicampurkan dengan persentase campuran 3%, 6%, 9%, dan 12% menggunakan jumlah air dari kadar air optimum hasil pengujian pemadatan. Berat masing-masing campuran didapatkan dari hasil perkalian persentase dengan berat kering sampel tanah yang diperlukan.



Gambar 4. Uji kuat tekan bebas



Gambar 5. Tipekal pola keruntuhan tanah+3% kapur hasil uji kuat tekan bebas

Nilai kuat tekan bebas didapatkan pada saat tegangan maksimum yang ditunjukkan dari sampel

tanah yang mengalami keruntuhan (Gambar 5). Kadar air sampel yang digunakan untuk menguji kuat tekan bebas didasarkan pada hasil pengujian pemadatan, baik pada tanah asli maupun sampel yang sudah dicampur dengan bahan-bahan perbaikan.

Analisis daya dukung pondasi

Kohesi pada kondisi undrained (c_u) ditentukan dari hasil uji kuat tekan bebas pada tanah yang telah distabilisasi, seperti diuraikan pada Persamaan 1.

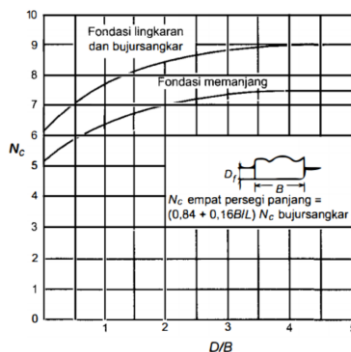
$$c_u = q_u/2 \quad (1)$$

dengan, c_u adalah kohesi pada kondisi undrained (kPa) dan q_u merupakan kuat tekan bebas (kPa)

Berdasarkan kohesi pada kondisi undrained (c_u) dapat ditentukan daya dukung ultimit (Q_u) pada tanah lempung dengan menggunakan teori Skempton 1951 (Hardiyatmo, 2011). Cara menentukan daya dukung ultimit (Q_u) seperti diuraikan pada Persamaan 2. Nilai daya dukung yang dikaji ini, didapatkan dari hasil uji kuat tekan bebas.

$$Q_u = c_u \times N_c \quad (2)$$

dengan, Q_u merupakan daya dukung ultimit (kPa), N_c merupakan faktor daya dukung (Gambar 6), D merupakan kedalaman pondasi (m), B merupakan lebar pondasi (m).



Gambar 6. Faktor daya dukung N_c (Hardiyatmo, 2011)

Hasil dan Pembahasan

Hasil uji sifat fisik dan mekanis tanah asli

Hasil pengujian sifat fisik dan mekanis tanah seperti pada Tabel 3. Berdasarkan pengujian sifat fisik didapatkan nilai kadar air 78 %, berat jenis 2,65, batas cair 59,2 %, indeks plastisitas 21,2 %, dan jumlah tanah berbutir halus dari lolos saringan No. 200 didapatkan sebanyak 97 %.

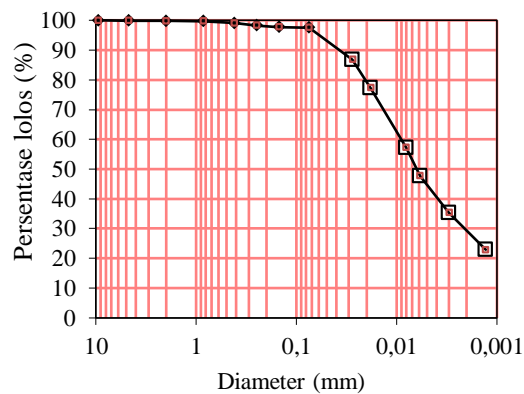
Berdasarkan hasil uji analisa saringan dan Atterberg limit pada tanah asli, maka tanah ini tergolong tanah

lempung plastisitas tinggi, karena lolos saringan No. 200 lebih besar dari 50%, batas cari (LL) lebih besar dari 50%, dan indeks plastisitas (PI) di atas 17% seperti pada Tabel 1. Kurva *grain size* tanah asli dapat dihat pada Gambar 7.

Tabel 3. Hasil uji sifat-sifat tanah asli

Sifat-sifat Tanah	Nilai	Satuan
Kadar air (w)	78	%
Berat jenis (G_s)	2,65	-
Batas cair (LL)	59,2	%
Batas plastis (PL)	38	%
Indeks plastisitas (PI)	21,2	%
Lolos saringan No. 200	97	%
Kuat tekan bebas (q_u)	34	kPa
Berat isi kering (γ_d)	1,3	gr/cm ³
Kadar air optimum (w_{opt})	34	%

Hasil uji kuat tekan bebas pada sampel tidak terganggu menunjukkan nilai q_u sebesar 34 kPa, dengan demikian tanah ini tergolong tanah lempung lunak karena memiliki q_u lebih kecil dari 50 kPa seperti pada Tabel 2.

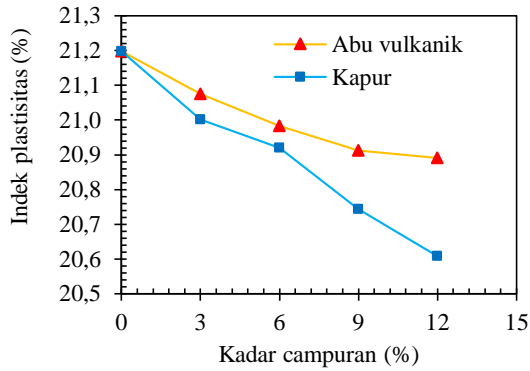


Gambar 7. Grain size pada tanah asli

Karakteristik properties dan klasifikasi tanah

Berdasarkan hasil uji Analisa saringan, hydrometer, dan Atterberg limit seperti diuraikan pada Tabel 3, maka tanah lempung yang digunakan dalam penelitian diklasifikasi menurut klasifikasi American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) M145 sebagai tanah berlempung kelompok A-7-5 (Lolos saringan No. 200 > 36%, batas cair (LL) > 41%, indeks plastis (PI) > 11%, dan batas plastis (PL) > 30%.

Nilai indeks plastisitas tanah dapat diperoleh dari selisih batas cair dengan batas plastis berdasarkan hasil uji Atterberg limit pada tanah dengan campuran kapur dan campuran abu vulkanik ditunjukkan pada Gambar 8. Kedua bahan stabilisasi yang digunakan memperlihatkan penurunan nilai indeks plastisitas (PI) secara signifikan.



Gambar 8. Perubahan indeks plastisitas tanah

Nilai indeks plastisitas tanah yang diperbaiki dengan kapur didapatkan sebesar 21%, 20,92%, 20,74%, dan 20,61% masing-masing untuk kadar kapur 3%, 6%, 9%, dan 12%. Sedangkan nilai indeks plastisitas tanah yang diperbaiki dengan abu vulkanik didapatkan sebesar 21,08%, 20,98%, 20,91%, dan 20,89% masing-masing untuk kadar abu vulkanik 3%, 6%, 9%, dan 12%.

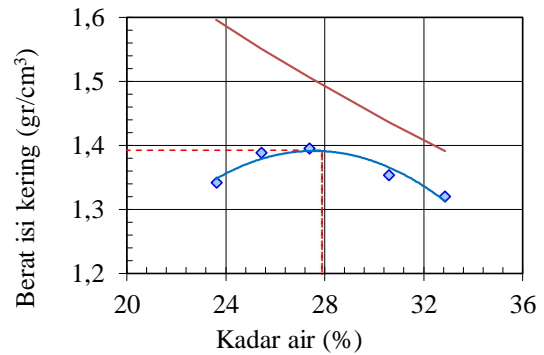
Perbaikan sifat-sifat tanah lempung yang diteliti dapat dilihat dari hasil uji *Atterberg limit* pada tanah yang dicampur dengan kapur maupun dengan abu vulkanik. Sifat-sifat yang dimaksud adalah plastisitas dan konsistensi. Berdasarkan hasil uji seperti pada Tabel 3, tanah yang diteliti ini tergolong sebagai tanah lempung lunak dengan plastisitas tinggi.

Penambahan kapur maupun abu vulkanik dapat memperbaiki sifat plastisitas lempung, hal ini dapat dilihat dari penurunan nilai indeks plastisitas tanah dengan bertambahnya kadar campuran kapur maupun abu vulkanik. Penurunan indeks plastisitas tanah dengan kapur lebih tinggi dibandingkan dengan abu vulkanik.

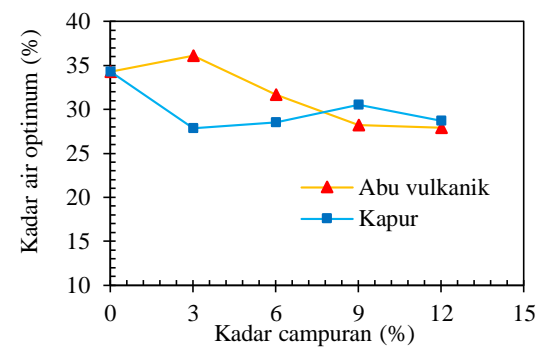
Hasil uji pemadatan tanah

Kadar air optimum didapatkan dari hasil uji pemadatan tanah asli dan tanah dengan campuran kapur dan abu vulkanik (Gambar 10). Kadar air optimum dari hasil uji pemadatan digunakan sebagai kadar air untuk campuran sampel untuk uji kuat tekan bebas.

Kadar air tanah dengan campuran abu vulkanik cenderung menurun sejalan dengan penambahan kadar abu vulkanik. Sedangkan kadar air untuk tanah dengan campuran kapur cenderung meningkat sejalan dengan penambahan kadar kapur. Hal ini dapat disebabkan karena sifat kapur yang mudah menyerap air, sehingga semakin banyak kadar kapur yang digunakan maka jumlah air yang dibutuhkan untuk campuran semakin meningkat.

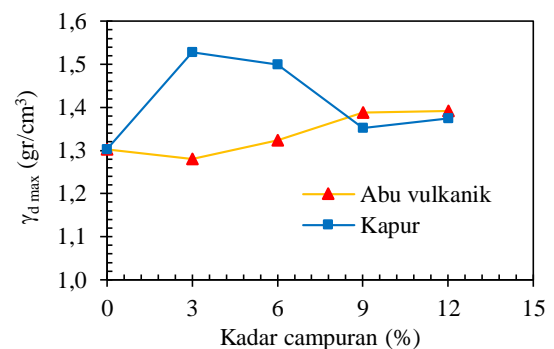


Gambar 9. Hubungan berat isi kering dengan kadar air dari hasil uji pemadatan standar pada tanah dengan 12% abu vulkanik



Gambar 10. Kadar air optimum masing-masing campuran

Hubungan kadar campuran kapur dan abu vulkanik dengan berat isi kering maksimum dari hasil uji pemadatan dapat dilihat pada Gambar 11. Nilai berat isi kering yang tertinggi didapatkan pada 3-6% kapur dan 9-12% abu vulkanik. Berat isi kering pada 3-6% kapur lebih tinggi dibandingkan 3-6% abu vulkanik, sementara untuk campuran 9-12%, berat isi kering tanah-abu vulkanik sedikit lebih tinggi dari pada berat isi kering tanah-kapur.

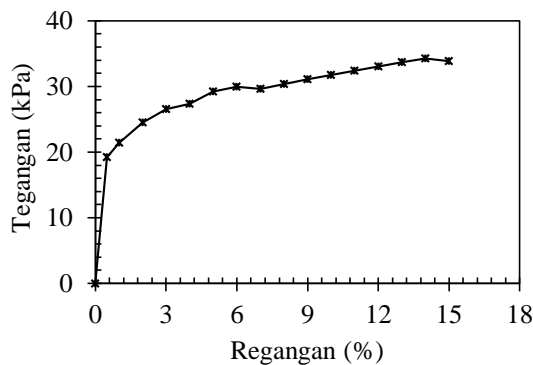


Gambar 11. Berat isi kering maksimum masing-masing campuran

Hasil uji kuat tekan bebas

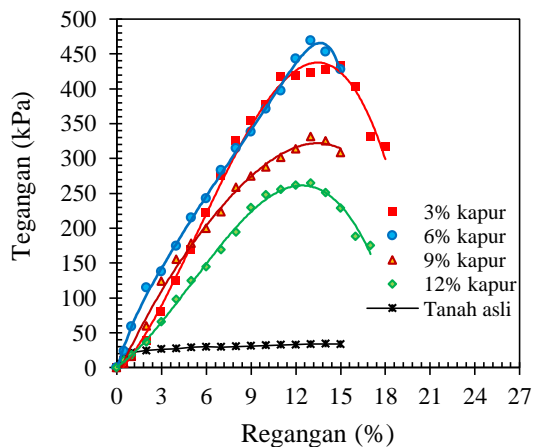
Nilai kuat tekan bebas (q_u) diperoleh dari hasil uji kuat tekan bebas (*unconfined compressive strength*)

test). Hasil uji kuat tekan bebas pada tanah tidak terganggu diperlihatkan pada Gambar 12. Tanah asli atau tidak terganggu menunjukkan nilai kuat tekan bebas sebesar 34 kPa. Nilai ini didapatkan pada tegangan maksimum yang ditunjukkan saat sampel tanah mengalami keruntuhan. Hasil pengujian untuk tanah asli memperlihatkan peningkatan tegangan secara perlahan dan cenderung landau. Hal ini menunjukkan bahwa tanah yang diuji tergolong sebagai tanah lunak dengan nilai $q_u = 34 \text{ kPa} < 50 \text{ kPa}$ seperti yang diuraikan pada Tabel 2. Nilai regangan maksimum didapatkan maksimum 15%.



Gambar 12. Hasil uji kuat tekan bebas tanah asli

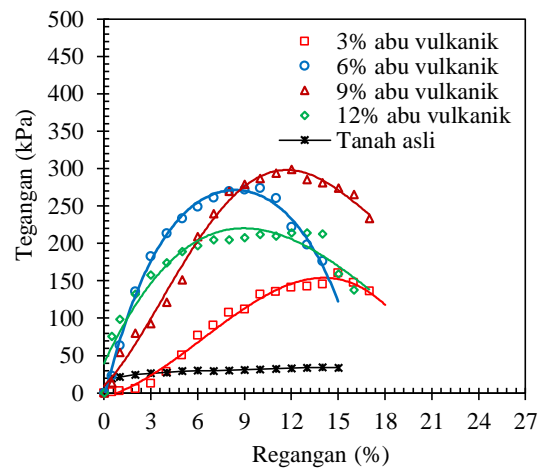
Hasil uji kuat tekan bebas ditunjukkan pada hubungan tegangan dan regangan. Gambar 13 memperlihatkan hubungan tegangan dan regangan pada tanah dengan campuran kapur. Penambahan 3% dan 6% kapur memperlihatkan peningkatan tegangan yang cukup tinggi, namun kuat tekan bebas yang dihasilkan pada 6% kapur masih lebih tinggi daripada 3% kapur. Hasil uji untuk 9% dan 12% kapur masih cukup tinggi bila dibandingkan dengan hasil uji pada tanah asli tanpa campuran kapur. Peningkatan ini dipengaruhi oleh kepadatan tanah yang mengikuti kepadatan hasil uji pemadatan dan akibat penambahan kapur.



Gambar 13. Tegangan – regangan tanah dengan kapur

Nilai kuat tekan bebas didapatkan pada tegangan maksimum yang diikuti dengan keruntuhan tanah. Keruntuhan tanah terjadi pada regangan di antara 12-15%. Regangan maksimum didapatkan di bawah 18%. Nilai kuat tekan bebas tanah yang diperbaiki dengan kapur didapatkan sebesar 433 kPa, 469 kPa, 331 kPa, dan 265 kPa masing-masing untuk kadar kapur 3%, 6%, 9%, dan 12%.

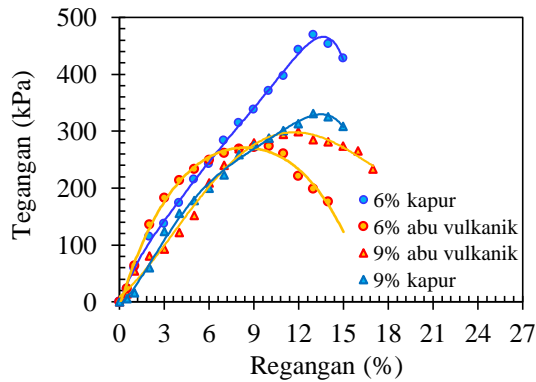
Gambar 14 memperlihatkan hubungan tegangan dan regangan pada tanah yang distabilisasi dengan abu vulkanik. Berbeda dengan campuran kapur pada tanah, untuk tanah dengan abu vulkanik menunjukkan peningkatan tegangan pada saat 6% dan 9% abu vulkanik, sedangkan untuk 3% dan 12% abu vulkanik masih menunjukkan nilai tegangan yang lebih tinggi daripada tanah asli. Regangan saat terjadi keruntuhan sangat bervariasi antara 8-15%. Regangan maksimum didapatkan lebih kecil dari 18%. Nilai kuat tekan bebas tanah yang diperbaiki dengan abu vulkanik didapatkan sebesar 160 kPa, 274 kPa, 299 kPa, dan 214 kPa masing-masing untuk kadar abu vulkanik 3%, 6%, 9%, dan 12%.



Gambar 14. Tegangan – regangan tanah dengan abu vulkanik

Nilai kuat tekan bebas terbaik untuk tanah dengan stabilisasi kapur didapatkan pada campuran 3% dan 6%, sedangkan untuk tanah dengan campuran abu vulkanik didapatkan pada penambahan 6% dan 9% abu vulkanik. Perbandingan kedua material stabilisasi tanah ini dapat dilihat pada hubungan tegangan dan regangan yang ditunjukkan pada Gambar 15.

Tegangan maksimum pada tanah dengan 6% menunjukkan nilai tertinggi dibandingkan dengan campuran lainnya. Tanah dengan campuran 9% terlihat sedikit lebih tinggi dibandingkan 6% dan 9% abu vulkanik. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kapur masih memberikan pengaruh yang lebih baik daripada abu vulkanik. Penggunaan 9% abu vulkanik mendekati sama dengan 9% kapur.



Gambar 15. Perbandingan tanah - kapur dan tanah - abu vulkanik

Pembahasan

Perbaikan sifat-sifat tanah lempung yang diteliti dapat dilihat dari hasil uji *Atterberg limit* dan kuat tekan bebas pada tanah yang dicampur dengan kapur maupun dengan abu vulkanik. Sifat-sifat yang dimaksud adalah plastisitas dan konsistensi. Berdasarkan hasil uji seperti pada Tabel 3, tanah yang diteliti ini tergolong sebagai tanah lempung lunak dengan plastisitas tinggi. Penambahan kapur maupun abu vulkanik dapat memperbaiki sifat plastisitas lempung, hal ini dapat dilihat dari penurunan nilai indeks plastisitas tanah dengan bertambahnya kadar campuran kapur maupun abu vulkanik Gambar 8. Hal ini terjadi karena tambahan abu vulkanik yang lebih kasar semakin mengurangi sifat plastis dari tanah lempung. Selain penurunan nilai indeks plastisitas tanah, penambahan kapur dan abu vulkanik juga mempengaruhi sifat konsistensi tanah lempung.

Tabel 4. Konsistensi tanah lempung lunak dengan kapur

Campuran kapur (%)	c_u (kPa)	Konsistensi
0	17	Lempung lunak
3	217	Lempung keras
6	234	Lempung keras
9	166	Lempung sangat kaku
12	132	Lempung sangat kaku

Tabel 4 memperlihatkan nilai kuat tekan bebas (q_u) pada tanah yang distabilisasi dengan kapur. Penambahan 3-6% kapur sifat konsistensi tanah lempung menjadi lempung keras, karena memiliki nilai q_u di atas 400 kPa, tetapi kadar kapur 9-12% konsistensi lempung sedikit menurun menjadi sangat kaku. Nilai q_u tertinggi didapatkan pada campuran tanah dengan 6% kapur. Tanah asli berupa lempung lunak berubah menjadi lempung keras apabila tanah dicampur dengan 6% kapur. Nilai c_u pada campuran 12% kapur mengalami penurunan dibandingkan campuran 9% kapur, hal

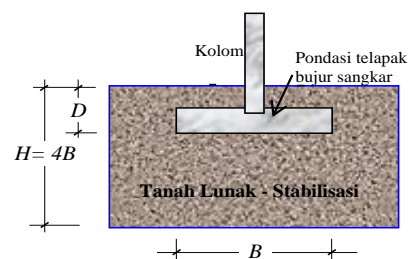
ini dapat disebabkan tambahan kapur dalam jumlah besar semakin menambah butiran kasar dan terserapnya air dari butiran lempung, sehingga sifat lekatan dari lempung semakin berkurang.

Perbaikan konsistensi tanah akibat penambahan abu vulkanik diperlihatkan pada Tabel 5. Penambahan 3% abu vulkanik langsung mengubah konsistensi tanah lempung lunak menjadi lempung kaku. Penambahan 6-12% abu vulkanik dapat mengubah konsistensi tanah lempung lunak menjadi lempung sangat kaku. Nilai q_u tertinggi pada tanah yang distabilisasi dengan abu vulkanik didapatkan sebesar 299 kPa untuk campuran 9% abu vulkanik dan konsistensi tanah menjadi sangat kaku.

Kapur jauh lebih baik dalam hal memperbaiki sifat konsistensi tanah lempung dibandingkan dengan abu vulkanik. Ini dapat terjadi karena kapur lebih berbutir kasar daripada abu vulkanik, tanah lempung yang lebih halus bila ditambahkan dengan butiran yang lebih kasar akan berdampak pada peningkatan kuat geser. Abu vulkanik terlihat dapat memperbaiki sifat lunak menjadi kaku ke sangat kaku tetapi tidak sampai ke lempung keras seperti pada penambahan kapur. Hal ini dapat dilihat dari peningkatan nilai q_u tanah seiring dengan bertambahnya kadar campuran kapur dan abu vulkanik. Penambahan kapur menghasilkan nilai q_u maksimal pada kadar kapur 6%, sedangkan abu vulkanik mencapai nilai q_u maksimal pada kadar abu vulkanik 9%. Dengan demikian, kedua material ini lebih baik digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah pada penambahan di bawah 9%. Penggunaan 6% kapur memberikan nilai kuat tekan paling tinggi, sedangkan abu vulkanik diperlukan 9% untuk menghasilkan nilai kuat tekan yang maksimum.

Tabel 5. Konsistensi tanah lempung lunak dengan abu vulkanik

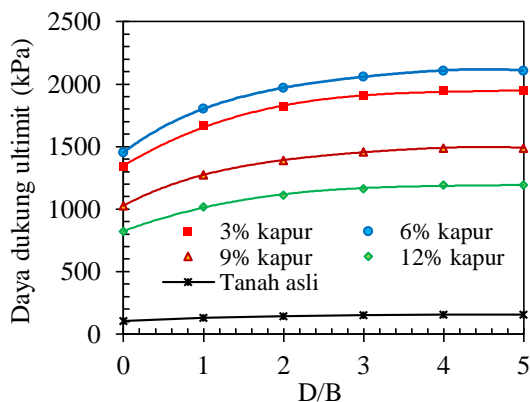
Campuran abu vulkanik (%)	c_u (kPa)	Konsistensi
0	17	Lempung lunak
3	80	Lempung kaku
6	137	Lempung sangat kaku
9	149	Lempung sangat kaku
12	107	Lempung sangat kaku



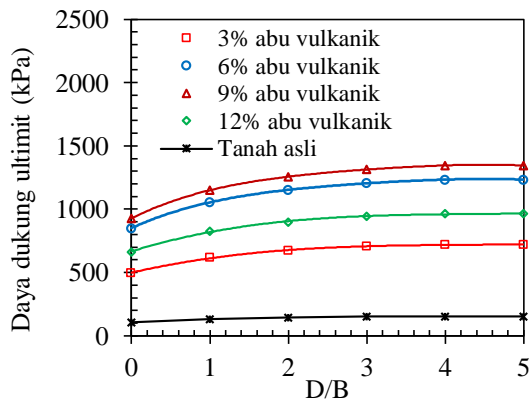
Gambar 16. Aplikasi pada pondasi telapak

Aplikasi perbaikan tanah lunak pada tana dasar pondasi dapat dilakukan pada pondasi telapak. Penelitian ini diterapkan pada pondasi telapak bentuk bujur sangkar dengan lebar B dan kedalaman (D). Ketebalan tanah stabilisasi direncanakan sampai pada kedalaman 4B. Penampang melintang pondasi yang direncanakan dapat dilihat pada Gambar 16.

Daya dukung ultimit ditentukan menggunakan Persamaan 1. Nilai N_c ditentukan berdasarkan Gambar 6, dengan mengambil kurva pondasi bujur sangkar. Nilai kohesi pada kondisi undrained (c_u) diambil dari Tabel 4 dan Tabel 5. Daya dukung pondasi bujur sangkar pada tanah yang distabilisasi kapur ditunjukkan pada Gambar 17. Daya dukung ultimit pondasi meningkat signfikasi pada tanah yang distabilisasi kapur. Peningkatan tertinggi ditemukan pada penambahan 6% kapur. Penambahan 3% kapur terlihat mendekati daya dukung pondasi pada tanah stabilisasi 6% kapur.



Gambar 17. Daya dukung pondasi bujur sangkar pada tanah – kapur



Gambar 18. Daya dukung pondasi bujur sangkar pada tanah – abu vulkanik

Daya dukung pondasi bujur sangkar pada tanah yang distabilisasi abu vulkanik ditunjukkan pada Gambar 18. Daya dukung ultimit pada tanah yang distabilisasi dengan abu vulkanik memperlihatkan

peningkatan yang cukup baik pada penambahan 9% abu vulkanik.

Daya dukung ultimit pondasi pada tanah yang distabilisasi kapur terlihat jauh lebih tinggi dibandingkan daya dukung ultimit pondasi pada tanah yang distabilisasi abu vulkanik. Penambahan 6% kapur dapat meningkatkan daya dukung ultimit sebesar 13,7 kali daya dukung pondasi pada tanah lunak, sedangkan penambahan 6% abu vulkanik meningkatkan daya dukung ultimit sebesar 8 kali daya dukung pondasi pada tanah lunak. Daya dukung ultimit pondasi pada tanah stabilisasi 6% kapur lebih tinggi 1,7 kali daya dukung pondasi pada tanah stabilisasi 6% abu vulkanik.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: Tanah yang diteliti digolongkan sebagai tanah lempung lunak, karena memiliki nilai kuat tekan bebas (q_u) sebesar 34 kPa dan lebih kecil 50 kPa. Nilai kuat tekan bebas tanah dengan campuran kapur masih lebih tinggi dibandingkan dengan tanah yang dicampur abu vulkanik.

Tanah dengan campuran kapur menghasilkan nilai q_u sebesar 265-469 kPa, sedangkan q_u tanah dengan abu vulkanik adalah 165-299 kPa. Kapur jauh lebih baik dalam hal memperbaiki sifat konsistensi lempung dibandingkan dengan abu vulkanik. Campuran 6% kapur pada tanah dapat menghasilkan tanah lempung keras, sementara 9% abu vulkanik hanya mampu mengubah lempung lunak menjadi lempung sangat kaku. Kuat tekan bebas tanah didapatkan meningkat signifikan pada penambahan 6% kapur dan 9% abu vulkanik.

Peningkatan nilai kuat tekan bebas tanah didapatkan dari nilai kuat tekan bebas (q_u) yang semakin meningkat sampai 6% kapur atau 9% abu vulkanik. Penambahan 6% kapur dapat meningkatkan daya dukung pondasi telapak bujur sangkar sebesar 13,7 kali daya dukung pondasi pada tanah lunak, sedangkan untuk penambahan 9% abu vulkanik meningkatkan daya dukung ultimit sebesar 8,7 kali daya dukung pondasi pada tanah lunak. Daya dukung ultimit pondasi pada tanah stabilisasi kapur lebih tinggi dari daya dukung pondasi pada tanah stabilisasi abu vulkanik.

Ucapan Terima Kasih

Bersama ini tim penulis memberikan penghargaan dengan memberi ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang terlibat dalam penelitian, terutama kepada tim peneliti di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Simalungun.

Daftar Pustaka

- Adha, I. (2009). Pengaruh durabilitas terhadap daya dukung stabilisasi tanah menggunakan lempung plastisitas rendah dengan kapur. *Rekayasa: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 13(3), 239-246.
- Dharmayasa, I. G. N. P. (2014). Analisis Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Lunak di Daerah Dengan Muka Air Tanah Dangkal (Studi Kasus pada Daerah Suwung Kauh). *Paduraksa: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 3(2), 22-44.
- Direktoral Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fahriani, F., & Apriyanti, Y. (2017). Analisis daya dukung pondasi dangkal pada tanah dengan bahan stabilisasi sabut kelapa. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat*, 360-363.
- Fauzi, L. A., & Ikhya, I. (2016). Analisis kapasitas daya dukung pondasi dangkal tipe menerus pengaruh kedalaman tanah keras. *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 2(2), 36-46.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Stabilisasi Tanah untuk Perkerasan Jalan*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2011). *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Tanah Ekspansif - Permasalahan dan Penanganan*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Kazemian, S., Huat, B. B. K., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). A state of art review of peat: geotechnical engineering perspective. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 1974-1981.
- Latif, D. O., Rifa'i, A., & Suryolelono, K. B. (2017). Perbaikan sifat mekanis tanah lempung ekspansif menggunakan abu vulkanis sinabung dan kapur. *Jurnal Saintis*, 17(1), 24-32.
- Manoppo, F. J. (2013). Perilaku tanah ekspansif terhadap daya dukung. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 3(2), 161-166.
- 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.
- Panduan Geoteknik 4. (2002). *Timbunan Jalan pada Tanah Lunak - Desain dan Konstruksi*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah - Pusat Litbang Prasarana Transportasi.
- Sianturi, N. M., Kamarudin, M. K. A., Wahab, N. A., & Mohd Saudi, A. S. (2019). The hydraulic modelling on sediments ponds in Binanga Aron River, North Sumatera Indonesia. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 392-404.
- Suaryana, N., & Fransisko, S. (2018). Stabilisasi dua tahap menggunakan kapur dan semen untuk memperbaiki daya dukung tanah ekspansif. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 35(1), 31-39.
- Sutikno, & Damianto, B. (2009). Stabilisasi tanah ekspansif dengan penambahan kapur (lime): aplikasi pada pekerjaan timbunan. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 11(2), 101-108. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v11i2.1718>
- Triputro, F. A., & Rahayu, T. (2016). Analisa pengaruh abu vulkanik gunung kelud pada stabilisasi tanah lempung. *Jurnal Konstruksia*, 7(2), 75-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.24853/jk.7.2.%25p>
- Waruwu, A. (2013). Korelasi nilai kuat tekan dan cbr tanah lempung yang distabilisasi dengan abu batu dan semen. *Jurnal Rancang Sipil*, 2(1), 99-108.
- Waruwu, A., Darmawandi, A., Halawa, T., & Muammar. (2022). Perbandingan abu vulkanik dan kapur sebagai material stabilisasi tanah lempung. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 5(1), 8-15.
- Waruwu, A., Gea, F., H, J. Y. A., W, E. M., & Zega, M. (2022). Pengaruh model kekuatan bambu terhadap nilai CBR tanah lempung lunak. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 131-138.
- 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. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(2), 116-130. <https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jrs.17.2.116-130.2021>