

PERBANDINGAN ABU VULKANIK DAN KAPUR SEBAGAI MATERIAL STABILISASI TANAH LEMPUNG

Aazokhi Waruwu ^{a*}, Arif Darmawandi ^b, Tematius Halawa ^c, Muammar ^d

^a Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Indonesia

^b Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Indonesia

^c Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Indonesia

^d Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Indonesia

Corresponding Author:

*Email: azokhiw@gmail.com

Keywords:

Clay, CBR, volcanic ash, lime, stabilization thickness

Received :

Revised :

Accepted :

Abstract: Clay soil as a subgrade is problematic if it has a low California Bearing Ratio (CBR) value. There are many choices of stabilizing materials that can improve the CBR value, but it is necessary to consider the availability of materials around the project. This study examines partial soil improvement in CBR specimens by differentiating thickness and soil stabilizing materials. The clay stabilization materials used were volcanic ash and lime as much as 6% and 12% of the dry weight of the soil. Laboratory CBR tests were carried out on original soil specimens, 1/3 and 2/3 parts of stabilized soil, and entirely of stabilized soil. The results showed that the CBR value of the stabilized soil with lime was higher than the volcanic ash. The thickness of the stabilized soil has an effect on the CBR value, the overall CBR value is obtained stable in the stabilized soil 2/3 part of the thickness of the soil and the rest is the original compacted soil.

Copyright © 2021 POTENSI-UNDIP

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung termasuk tanah berbutir halus dengan diameter butir < 0,002 mm, sangat dipengaruhi oleh air dan variasi kadar air berpengaruh pada plastisitas tanahnya (Hardiyatmo 2014). Tanah dengan kandungan air limbah ditemukan dapat mengurangi nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dan meningkatkan indeks plastisitas tanah (Alo, Ayodele, and Adekanmi 2021). Butiran halus tanah dasar, batas cair, batas plastis, dan ukuran partikel berpengaruh signifikan pada nilai CBR tanah (Singh, Jha, and Gill 2016). Tanah lempung sering dijumpai sebagai tanah dasar untuk konstruksi jalan. Menurut Darmawandi et al. (2020), tanah dasar bermasalah untuk konstruksi apabila tanah memiliki kuat geser, daya dukung, dan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) yang rendah. Sifat-sifat ini biasanya didapatkan pada jenis lempung lunak, lempung ekspansif, atau tanah gambut.

Beberapa material perbaikan nilai CBR tanah yang telah digunakan oleh peneliti sebelumnya. Abu terbang digunakan sebanyak 10% untuk mendapatkan nilai CBR sebesar 8,80% dengan peningkatan 121,66% dari nilai CBR tanah asli (Kalawa, Sarie, and Yani 2021). Bubuk arang kayu sebanyak 6% ditambahkan pada tanah lempung dengan pemeraman 7 hari untuk meningkatkan nilai CBR sebesar 7% dari 2,12% tanah asli (Pahrida, Gandhi, and Sarie 2021). Abu sekam padi digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah lempung, hasil penelitian menunjukkan campuran tanah dengan abu sekam padi dapat meningkatkan daya dukung tanah (Ara, Gandhi, and Sarie 2021).

Menurut Darmawan et al. (2020), material di sekitar pekerjaan dapat digunakan sebagai material alternatif. Pemilihan bahan stabilisasi disesuaikan dengan ketersediaan material di sekitar pekerjaan. Ini dapat menghemat biaya yang digunakan untuk stabilisasi tanah. Salah satu material yang melimpah ketika gunung berapi mengalami erupsi adalah abu vulkanik. Penggunaan 9% abu vulkanik dapat meningkatkan nilai CBR tanah lempung menjadi 6,15% (Triputro and Rahayu 2016). Penggunaan abu vulkanik dengan tambahan 3% kapur dapat memperbaiki sifat-sifat tanah lempung (Latif, Rifa'i, and Suryolelono 2017).

Tebal tanah stabilisasi berpengaruh pada nilai CBR tanah. Waruwu et al. (2021) mengkaji penerapan stabilisasi tanah dengan abu vulkanik melalui model skala kecil laboratorium untuk mengetahui peningkatan nilai CBR. Penelitian ini menghasilkan peningkatan 34-55 kali nilai CBR tanah asli dengan

tebal lapisan minimum 16-20 cm. Penggunaan abu vulkanik sebagai material stabilisasi perlu dibandingkan dengan bahan yang biasa digunakan seperti material kapur.

Penggunaan kapur sebagai material stabilisasi tanah dasar untuk pekerjaan jalan dapat digunakan dengan campuran 2-6% (Hardiyatmo 2014). Penggunaan kapur di atas 6% tidak meningkatkan nilai CBR secara signifikan (Sutikno and Damianto 2009). Namun, untuk perbaikan tanah lempung dengan plastisitas rendah, jumlah tambahan kapur yang diperlukan adalah maksimum 9% (Adha 2009).

Uji CBR laboratorium selama ini dilakukan pada benda uji yang homogen dalam satu benda uji, namun pada penelitian ini dikembangkan untuk perbaikan sebagian dalam benda uji CBR dengan membedakan tebal dan bahan stabilisasi tanah. Bahan stabilisasi yang digunakan adalah abu vulkanik, namun perlu perbandingan dengan kapur sebagai material perbaikan tanah yang umum digunakan. Beberapa penelitian sebelumnya menyatakan penggunaan abu vulkanik efektif pada penambahan 9%, sedangkan kapur memberikan hasil maksimal untuk penggunaan sebanyak 6%. Pada penelitian ini, penambahan abu vulkanik dan kapur masing-masing sebanyak 3-12% untuk uji pendahuluan. Berdasarkan hasil uji awal ditemukan jumlah penambahan yang mendekati optimal sebagai dasar pencampuran untuk uji CBR laboratorium. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai CBR dari tanah yang distabilisasi dengan abu vulkanik dan kapur dan untuk mengetahui pengaruh tebal tanah stabilisasi terhadap perubahan nilai CBR tanah.

2. DATA DAN METODE

Bahan utama penelitian adalah tanah lempung dari Desa Pamatang Biara, Kecamatan Pantai Labu – Deli Serdang. Tanah Pantai Labu dipilih karena tanah ini memiliki sifat sebagai tanah lunak dengan plastisitas yang tinggi (Darmawandi et al. 2020). Bahan stabilisasi terdiri dari kapur yang berasal dari Blang Pidie, Aceh Barat Daya dan abu vulkanik dari erupsi Gunung Sinabung, Desa Singgarang-garang Kabanjahe, Sumatera Utara.

Tanah lempung dari lokasi dikeringkan di bawah sinar matahari untuk menghilangkan sebagian besar air dalam butiran tanah (Gambar 1.a). Tanah yang menggumpal dihaluskan dengan palu karet dan disaring menggunakan saringan no. 40 (Gambar 1.b).



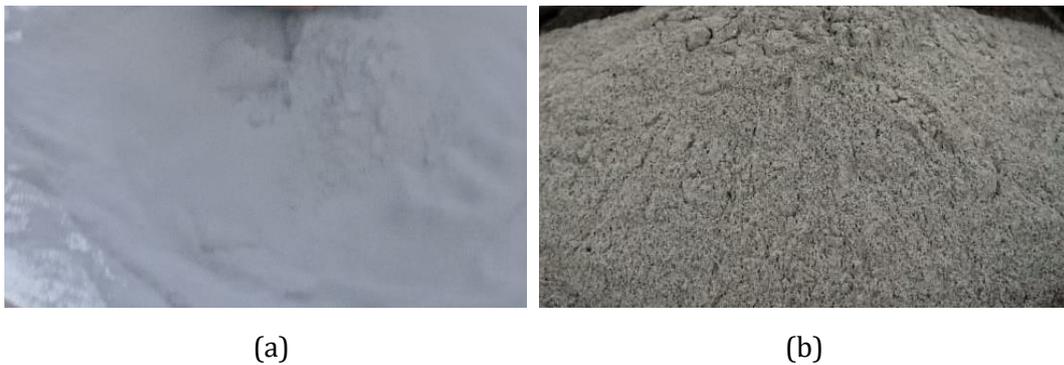
(a)

(b)

Gambar 1. Persiapan tanah: (a) Pengeringan; (b) Tanah yang sudah disaring

Masing-masing bahan stabilisasi tanah dikeringkan dan disaring pada ayakan no. 40, dan sampelnya dapat dilihat pada Gambar 2. Ini dimaksudkan supaya ukuran butir maksimum sama dengan ukuran butiran tanah. Bahan-bahan stabilisasi dicampur dengan tanah lempung yang telah disiapkan dengan variasi campuran 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12% dari berat tanah kering. Berat tanah kering didapatkan dengan mencari kadar mula-mula dari setiap sampel tanah yang digunakan.

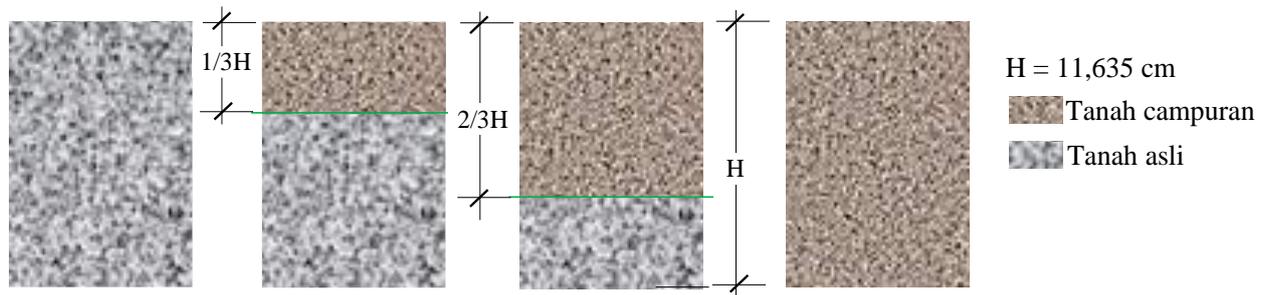
Penelitian diawali dengan melakukan uji beberapa sifat dari tanah lempung asli tanpa campuran dan dilanjutkan pada tanah yang dicampur dengan abu vulkanik atau kapur. Beberapa uji pendahuluan yang dilakukan adalah berat jenis, batas-batas konsistensi, analisa saringan, kuat tekan bebas, dan pemadatan. Uji pendahuluan dilakukan sebagai dasar pertimbangan jumlah campuran bahan stabilisasi yang akan digunakan pada benda uji CBR laboratorium.



Gambar 2. Bahan stabilisasi: (a) Abu vulkanik; (b) Kapur

Berdasarkan hasil uji kuat tekan bebas didapatkan jumlah campuran yang akan digunakan pada pengujian CBR. Benda uji untuk CBR laboratorium terdiri dari seluruhnya tanah lempung asli, sebagian tanah dengan campuran bahan stabilisasi, dan seluruhnya dari tanah dengan campuran bahan stabilisasi (Gambar 3). Benda uji sebagian tanah dengan campuran bahan stabilisasi dibedakan dengan 1/3 dan 2/3 dari total tebal benda uji, sebagiannya lagi merupakan tanah lempung asli tanpa campuran.

Tambahan air yang dibutuhkan pada setiap benda uji disesuaikan dengan kadar optimum dari hasil uji pemadatan. Tambahan air untuk benda uji CBR pada tanah lempung asli menggunakan kadar optimum hasil uji pemadatan pada tanah lempung asli, hal yang sama dilakukan pada penambahan air untuk tanah lempung dengan campuran. Untuk keseragaman kondisi batas benda uji, maka pemadatan benda uji CBR laboratorium untuk setiap lapisnya dilakukan dengan tumbukan sebanyak 25 pukulan kali 3 lapis.



Gambar 3. Skema benda uji CBR laboratorium

Berdasarkan hasil uji CBR laboratorium didapatkan nilai CBR dari masing-masing benda uji, baik untuk tanah asli maupun tanah dengan campuran abu vulkanik atau kapur pada masing-masing variasi tebal lapisan tanah campuran. Dengan demikian, dapat ditentukan seberapa besar pengaruh tebal lapisan tanah stabilisasi terhadap nilai CBR dari uji CBR laboratorium.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

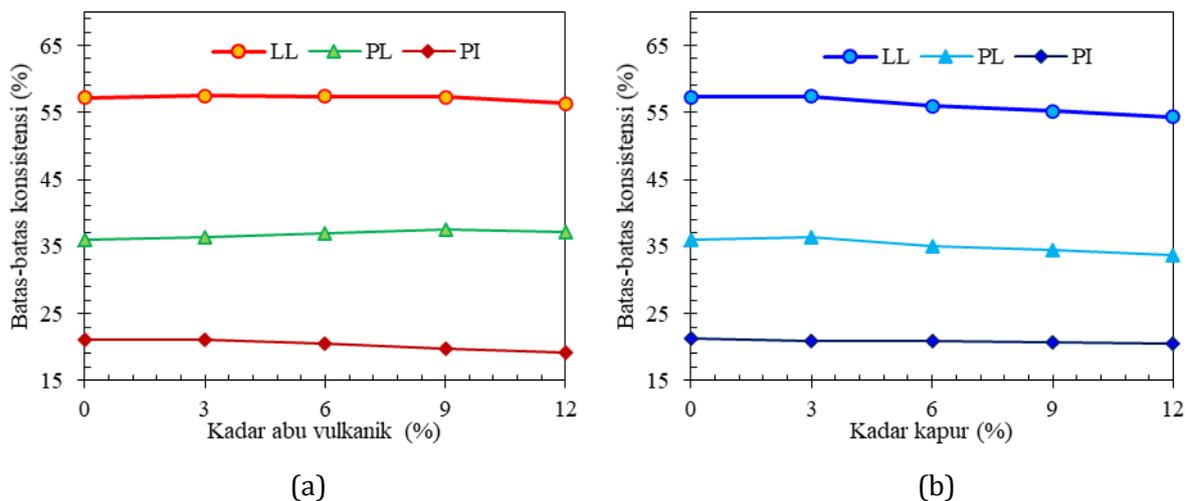
3.1. Hasil Uji Sifat Tanah Asli dan Setelah Distabilisasi

Ringkasan hasil uji pendahuluan untuk mengetahui sifat-sifat tanah asli dan tanah yang diberi campuran bahan stabilisasi ditunjukkan pada Tabel 1. Tanah asli berupa tanah lempung sama dengan tanah yang digunakan pada penelitian (Waruwu et al. 2021). Tanah dengan campuran abu vulkanik atau kapur terlihat berpengaruh pada sifat-sifat tanah lempung. Bahan stabilisasi ini dapat mengurangi batas cair, mengurangi indeks plastisitas, meningkatkan kuat tekan bebas, mengurangi kadar air, dan meningkatkan berat isi kering tanah. Berdasarkan hasil uji berat jenis didapatkan bahwa nilai berat jenis semakin kecil akibat penambahan abu vulkanik atau kapur. Ini dapat disebabkan akibat bertambahnya butiran bahan stabilisasi yang memiliki berat lebih ringan dari tanah asli.

Tabel 1. Hasil uji tanah lempung asli dan dengan campuran

No.	Parameter	Tanah asli	Campuran abu vulkanik		Campuran kapur	
			6%	12%	6%	12%
1	Berat jenis, G_s	2,64	2,59	2,56	2,57	2,51
2	Batas cair, LL (%)	57,27	57,41	56,32	55,96	54,32
3	Batas plastis, PL (%)	36,07	36,98	37,20	35,04	33,71
4	Indeks plastisitas, PI (%)	21,20	20,43	19,12	20,92	20,61
5	Lolos saringan no. 200 (%)	97,56	97,32	97,02	97,11	96,70
6	Kuat tekan bebas, q_u (kPa)	34,2	264	214	460	264
7	Kadar air optimum, (%)	34,30	31,70	27,89	28,50	28,70
8	Berat isi kering max, $\gamma_{d\max}$ (gr/cm ³)	1,30	1,32	1,39	1,50	1,38

Hasil uji batas-batas konsistensi ditunjukkan dalam Gambar 4. Batas-batas konsistensi yang diuraikan adalah batas cair (LL), batas plastis (PL), dan indeks plastisitas (PI). Kedua material stabilisasi ini menunjukkan pengaruh yang sama pada pengurangan nilai batas cair dan indeks plastisitas tanah. Ini dapat terjadi akibat dari bahan abu vulkanik atau kapur dapat menyerap air sehingga nilai LL dan PI menjadi berkurang. Pengurangan yang terjadi tidak berbeda jauh antara bahan abu vulkanik dengan kapur.



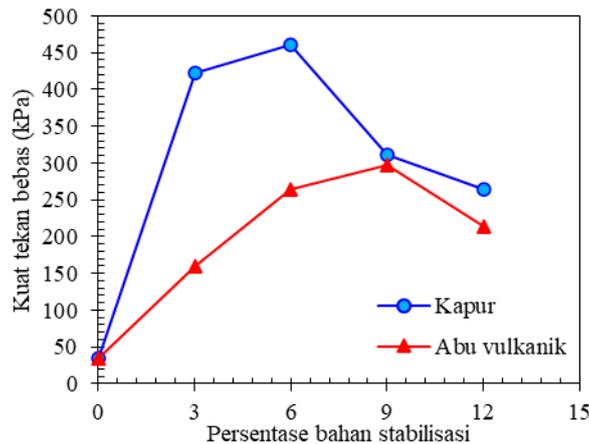
Gambar 4. Hasil uji batas-batas konsistensi: (a) Tanah dan abu vulkanik; (b) Tanah dan kapur

Hasil uji kuat tekan bebas pada tanah asli dan tanah dengan campuran 3-12% bahan stabilisasi ditunjukkan dalam Gambar 5. Penambahan abu vulkanik atau kapur pada tanah lempung terlihat dapat meningkatkan nilai kuat bebas tanah. Peningkatan kuat tekan bebas tanah dengan campuran kapur terlihat lebih tinggi dari abu vulkanik. Hasil yang baik didapatkan pada 6% kapur atau 9% abu vulkanik. Ini terlihat dari nilai kuat tekan yang dihasilkan pada campuran ini lebih tinggi dari campuran lainnya. Secara keseluruhan penambahan bahan stabilisasi yang optimum dari keduanya berada di antara 6-12%. Campuran inilah yang akan digunakan sebagai jumlah campuran pada benda uji CBR, yaitu masing-masing diambil 6% dan 12% abu vulkanik atau kapur.

3.2. Hasil Uji CBR Laboratorium

Nilai CBR dari masing-masing campuran bahan stabilisasi dari abu vulkanik dan kapur dapat dilihat dalam Tabel 2. Adapun penambahan bahan stabilisasi adalah 6% dan 12% dari berat tanah kering. Secara keseluruhan didapatkan bahwa penambahan abu vulkanik atau kapur dapat meningkatkan nilai CBR tanah. Tanah yang distabilisasi lebih padat dibandingkan dengan tanah asli, ini terlihat dari berat isi kering tanah stabilisasi yang lebih tinggi dari tanah asli. Menurut Singh et al. (2016), tanah yang memiliki berat isi yang lebih tinggi akan menghasilkan nilai CBR yang lebih tinggi juga. Berbeda dengan hasil uji kuat tekan bebas, pada uji CBR didapatkan nilai CBR untuk penambahan 12% sedikit

lebih tinggi dari penambahan 6% baik untuk abu vulkanik maupun untuk kapur. Hal ini berbeda dengan hasil penelitian (Triputro and Rahayu 2016) yang mengatakan bahwa nilai CBR tertinggi diperoleh dari penambahan 9% abu vulkanik. Ini membuktikan bahwa jenis tanah dan sifat-sifatnya berpengaruh pada jumlah material stabilisasi yang diperlukan. Hal yang sama diperoleh pada hasil penelitian Sutikno & Damianto (2009) dan Adha (2009). Menurut Sutikno & Damianto (2009), peningkatan CBR tanah yang signifikan diperoleh pada penambahan 6% kapur, sedangkan Adha (2009) menyatakan penambahan kapur maksimum adalah 9%. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa jumlah penambahan bahan stabilisasi dipengaruhi oleh jenis tanah yang distabilisasi. Namun demikian hasil penelitian ini tidak jauh berbeda dengan jumlah campuran abu vulkanik dan kapur pada penelitian sebelumnya.



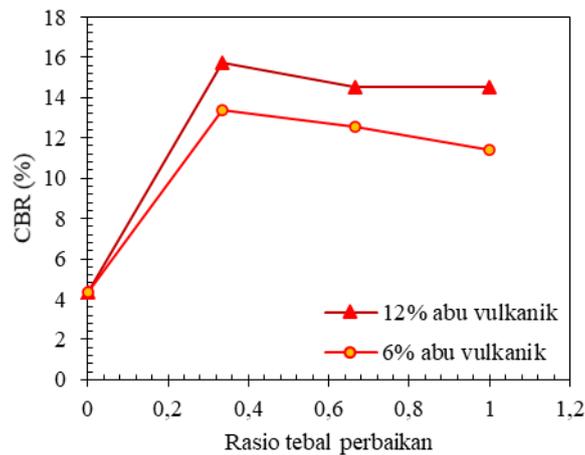
Gambar 5. Hasil uji kuat tekan bebas

Tabel 2. Perbandingan nilai CBR tanah-kapur dengan tanah-abu vulkanik

No.	Rasio tebal stabilisasi	Nilai CBR (%) Campuran abu vulkanik		Nilai CBR (%) Campuran kapur	
		6%	12%	6%	12%
1	0	4,32			
2	1/3	13,36	15,72	12,97	13,75
3	2/3	12,57	14,54	12,83	14,14
4	1	11,39	14,54	13,75	14,93

3.3. Pengaruh Tebal Stabilisasi Terhadap Nilai CBR

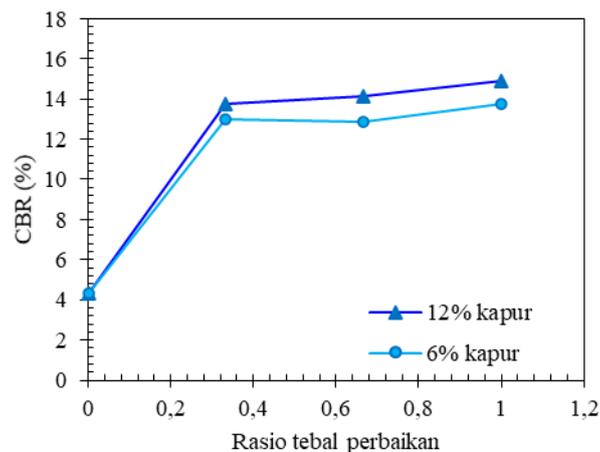
Pengaruh tebal lapisan tanah stabilisasi dengan abu vulkanik terhadap nilai CBR diperlihatkan pada Gambar 6. Penambahan abu vulkanik pada 1/3 bagian tanah memperlihatkan peningkatan nilai CBR yang signifikan yaitu sebesar 13,36 % untuk 6 % abu vulkanik dan 15,72 % untuk 12 % abu vulkanik, akan tetapi untuk 2/3 dan keseluruhan tanah yang distabilisasi dengan abu vulkanik mengalami sedikit penurunan nilai CBR dibandingkan pada 1/3 bagian tanah, tetapi CBR tanah stabilisasi masih lebih tinggi daripada nilai CBR tanah asli. Hasil uji model yang dilakukan Waruwu et al. (2021), didapatkan bahwa nilai CBR tanah stabilisasi abu vulkanik dengan tebal 20 cm pada total tebal lapisan tanah 50 cm atau 2/5 didapatkan nilai CBR yang maksimal, sedangkan nilai CBR maksimal pada penelitian ini diperoleh pada tanah stabilisasi abu vulkanik 1/3 bagian. Ini dapat disebabkan oleh media yang berbeda, penelitian ini menggunakan mold CBR sedangkan penelitian Waruwu et al. (2021) menggunakan bak uji yang lebih besar. Tetapi, hasil penelitian keduanya menunjukkan bahwa tebal tanah stabilisasi berpengaruh pada nilai CBR tanah.



Gambar 6. Nilai CBR tanah lempung dengan campuran abu vulkanik

Pengaruh tebal lapisan tanah stabilisasi dengan kapur terhadap nilai CBR diperlihatkan pada Gambar 7. Penambahan kapur pada 1/3 bagian tanah memperlihatkan peningkatan nilai CBR yang signifikan. Peningkatan ini masih berlanjut untuk 2/3 bagian dan seluruhnya baik untuk 6% maupun 12% kapur.

Peningkatan CBR pada tanah yang distabilisasi dengan 6% kapur didapatkan sebesar 12,97%, 12,83%, 13,75% masing-masing untuk 1/3, 2/3, dan 3/3 bagian tinggi mold. Nilai CBR untuk 12 % kapur sedikit tinggi dari 6% kapur, 1/3 bagian tanah yang distabilisasi didapatkan nilai CBR sebesar 13,75%, 14,14% untuk 2/3 bagian, dan 14,93% untuk 3/3 bagian tanah yang distabilisasi. Peningkatan nilai CBR untuk tanah yang distabilisasi dengan kapur dipengaruhi tebal tanah stabilisasi.



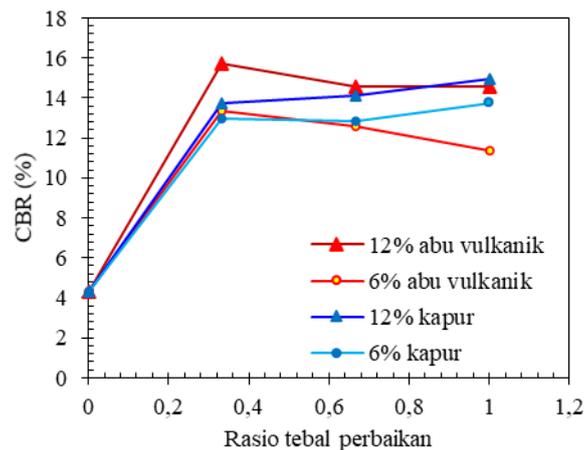
Gambar 7. Nilai CBR tanah lempung dengan campuran kapur

Perbandingan Abu Vulkanik dan Kapur Ditinjau dari Tebal Stabilisasi Terhadap Nilai CBR

Perbandingan nilai CBR pada tanah yang dicampur dengan abu vulkanik dan kapur ditunjukkan dalam Gambar 8. Nilai CBR tanah dengan kapur cenderung meningkat seiring dengan peningkatan rasio tebal tanah yang distabilisasi, sedangkan CBR tanah dengan abu vulkanik cenderung menurun bersamaan dengan peningkatan rasio tebal tanah yang distabilisasi.

Kedua jenis material ini memperlihatkan peningkatan nilai CBR yang cukup dominan pada rasio tebal tanah yang distabilisasi pada 1/3 tinggi mold CBR. Tebal tanah yang distabilisasi abu vulkanik berpengaruh signifikan pada kedalaman 1/3 tinggi mold CBR dan setelahnya nilai CBR mengalami penurunan, sedangkan tanah yang distabilisasi kapur masih memperlihatkan peningkatan nilai CBR pada tanah stabilisasi yang lebih tebal. Bahkan pada tanah yang distabilisasi seluruhnya terlihat bahwa nilai CBR tanah yang distabilisasi dengan kapur lebih tinggi dari abu vulkanik, baik untuk campuran 6% maupun 12%. Ini sama halnya dengan peningkatan nilai kuat tekan bebas, peningkatan nilai CBR tanah dengan kapur lebih tinggi dari abu vulkanik.

Tebal tanah stabilisasi memberikan pengaruh yang berbeda pada kedua jenis material yang digunakan. Tanah stabilisasi dengan kapur memberikan peningkatan CBR seiring dengan penambahan tebal tanah stabilisasi, sedangkan tanah stabilisasi dengan abu vulkanik memberikan peningkatan CBR yang signifikan di 1/3 bagian. Namun demikian, secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa tebal stabilisasi tanah minimum di 2/3 bagian dari tebal lapisan tanah yang distabilisasi. Hal ini menjadi pertimbangan pada perbaikan tanah dasar untuk pekerjaan jalan. Tebal lapisan tanah yang distabilisasi dapat dipertimbangkan sebesar 2/3 dari tebal rencana timbunan, sementara sisa 1/3 tebal timbunan merupakan tanah asli yang dipadatkan pada kadar air optimum. Hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan bahwa untuk perbaikan tanah dapat dilakukan pada permukaan yang dangkal. Perbaikan tanah yang cukup tebal kurang memberikan dampak yang cukup berarti pada peningkatan nilai CBR tanah.



Gambar 8. Perbandingan nilai CBR tanah campuran abu vulkanik dan kapur

4. KESIMPULAN

Nilai CBR tanah yang distabilisasi 6% abu vulkanik didapatkan sebesar 11,39%, sedangkan 6% kapur didapatkan 13,75%. Untuk penambahan 12% abu vulkanik menghasilkan nilai CBR sebesar 14,54%, sedangkan penambahan 12% kapur menghasilkan nilai CBR sebesar 14,93%. Ini menunjukkan bahwa stabilisasi tanah dengan kapur menghasilkan nilai CBR yang lebih tinggi dari abu vulkanik. Namun demikian, pada campuran 12%, nilai CBR tanah dengan abu vulkanik mendekati sama dengan kapur, hal ini menunjukkan bahwa abu vulkanik membutuhkan jumlah yang lebih banyak dalam meningkatkan nilai CBR daripada material kapur.

Tebal tanah stabilisasi berpengaruh pada perubahan nilai CBR tanah. Tanah yang distabilisasi kapur menunjukkan peningkatan nilai CBR seiring dengan tebal tanah stabilisasi, tetapi stabilisasi abu vulkanik nilai CBR sedikit menurun pada rasio tebal 2/3 dan 3/3 dibandingkan 1/3 bagian tanah stabilisasi. Namun demikian, secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa tebal stabilisasi tanah minimum di 2/3 bagian dari tebal lapisan tanah yang distabilisasi. Hal ini menjadi pertimbangan pada perbaikan tanah dasar untuk pekerjaan jalan. Tebal lapisan tanah yang distabilisasi dapat dipertimbangkan sebesar 2/3 dari tebal rencana timbunan, sementara sisa 1/3 tebal timbunan merupakan tanah asli yang dipadatkan pada kadar air optimum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada mereka yang membantu dalam penelitian ini, baik asisten dan teknisi laboratorium maupun kepala laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Medan.

REFERENSI

- Adha, Idharmahadi. 2009. "Pengaruh Durabilitas Terhadap Daya Dukung Stabilisasi Tanah Menggunakan Lempung Plastisitas Rendah Dengan Kapur." *Jurnal Rekayasa* 13(3):239-46.
- Alo, Benjamin A., Folahan O. Ayodele, and Jonathan S. Adekanmi. 2021. "Effect of Abattoir Wastewater on Geotechnical Properties of Lateritic Soil." *Journal of Engineering Science and Technology* 16(3):2114-27.

- Ara, Enrico Penyang, Suradji Gandi, and Fatma Sarie. 2021. "Perbandingan Penggunaan Abu Sekam Padi, Serbuk Batu Bata, Dan Pasir Sirkon Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung." *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil* 4(1):244–57. doi: <http://dx.doi.org/10.31602/jk.v4i1.5273>.
- Darmawan, I. Made Yuda, Akram Bikram, and Muhammad Zakaria Umar. 2020. "Pemanfaatan Tanah Sekitar Sebagai Material Interlock Block." *Jurnal Proyek Teknik Sipil* 3(2):50–59. doi: 10.14710/potensi.2020.9229.
- Darmawandi, Arif, Aazokhi Waruwu, Tematius Halawa, Doni Harianto, and Muammar. 2020. "Karakteristik Tanah Lunak Sumatera Utara Berdasarkan Pengujian Kuat Tekan Bebas." Pp. 16–20 in *Semnastek UISU*. Vol. 1. Medan: UISU Press.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2014. *Tanah Ekspansif - Permasalahan Dan Penanganan*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Kalawa, Nuah, Fatma Sarie, and Mohammad Ikhwan Yani. 2021. "Pengaruh Penambahan Semen Portland, Abu Sekam, Dan Fly Ash Terhadap Nilai Daya Dukung Tanah Lempung Sebagai Subgrade Perkerasan Jalan." *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil* 4(1):42–51. doi: <http://dx.doi.org/10.31602/jk.v4i1.5127>.
- Latif, Devi Oktaviana, Ahmad Rifa'i, and Kabul Basah Suryolelono. 2017. "Perbaikan Sifat Mekanis Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Abu Vulkanis Sinabung Dan Kapur." *Jurnal Saintis* 17(1):24–32.
- Pahrida, Arpina, Suradji Gandi, and Fatma Sarie. 2021. "Pengaruh Penambahan Bubuk Arang Kayu Pada Tanah Lempung Terhadap Nilai Indeks Plastisitas Dan Nilai CBR." *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil* 4(1):223–33. doi: <http://dx.doi.org/10.31602/jk.v4i1.5271>.
- Singh, Daljeet, J. N. Jha, and K. S. Gill. 2016. "Strength Evaluation of Soil Subgrade Using In-Situ Tests." *Civil Engineering and Architecture* 4(6):201–12. doi: 10.13189/cea.2016.040601.
- Sutikno, and Budi Damianto. 2009. "Stabilisasi Tanah Ekspansif Dengan Penambahan Kapur (Lime): Aplikasi Pada Pekerjaan Timbunan." *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan* 11(2):101–8. doi: 10.15294/jtsp.v11i2.1718.
- Tripuro, Farhan Asmoro, and Tanjung Rahayu. 2016. "Analisa Pengaruh Abu Vulkanik Gunung Kelud Pada Stabilisasi Tanah Lempung." *Jurnal Konstruksia* 7(2):75–82. doi: <https://doi.org/10.24853/jk.7.2.%25p>.
- Waruwu, Aazokhi, Optimisman Zega, Dian Rano, Baby M. T. Panjaitan, and Syukurman Harefa. 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):116–30. doi: <https://doi.org/10.25077/jrs.17.2.116-130.2021>.