



Uji CBR (*California Bearing Ratio*) pada Tanah Lempung Stabilisasi Abu Marmer dan *Biogrouting*

*Aazokhi Waruwu, Indah Pangemanan, Yulia Yunita, Fransiscus Calvin, Jason Lujaya, Nehemia Wijaya

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Kota Tangerang

^{*}azokhiw@gmail.com

Received: 20 September 2023 Revised: 27 Juli 2024 Accepted: 7 Agustus 2024

Abstract

The existing subgrade for road construction is quite diverse, and sometimes it does not meet the standards for construction subgrade. Repair efforts are needed if the existing land has a fairly low CBR (California Bearing Ratio) value. Stabilization materials for soil improvement can use waste in the form of marble ash, and as a comparison in this research improvements were also conducted using the biogrouting method. The aim of this research is to obtain the effect of marble ash stabilization and biogrouting on the CBR value. The research was carried out through CBR tests on a physical model of soil stabilized with 3-6% marble ash and soil improved using the bacteria bacillus subtilis and bacillus amyloliquefaciens. Tests are differentiated based on the thickness of the stabilized soil, which is 10–30 cm. The research results showed that marble ash-stabilized soil resulted in a better increase in CBR values compared to soil improved using the biogrouting method. CBR values that meet standards for road construction base soils are obtained on soil stabilized with 6% marble ash with a minimum stabilized soil layer thickness of 20 cm.

Keywords: Clay soils, marble ash, soils stabilization, california bearing ratio

Abstrak

Tanah dasar yang ada untuk konstruksi jalan cukup beragam, ada kalanya tidak memenuhi standar sebagai tanah dasar konstruksi. Upaya perbaikan diperlukan apabila tanah yang ada memiliki nilai CBR (California Bearing Ratio) yang cukup rendah. Bahan stabilisasi untuk perbaikan tanah dapat menggunakan limbah berupa abu marmer dan sebagai pembanding dalam penelitian ini juga dilakukan perbaikan dengan metode biogrouting. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan pengaruh stabilisasi abu marmer dan biogrouting terhadap nilai CBR. Penelitian dilakukan melalui uji CBR pada model fisik tanah yang distabilisasi 3-6% abu marmer dan tanah dengan perbaikan menggunakan bakteri bacillus subtilis dan bacillus amyloliquefaciens. Pengujian dibedakan berdasarkan tebal tanah stabilisasi 10-30 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah stabilisasi abu marmer menghasilkan peningkatan nilai CBR yang lebih baik dibandingkan tanah yang diperbaiki dengan metode biogrouting. Nilai CBR yang memenuhi standar untuk tanah dasar konstruksi jalan didapatkan pada tanah dengan stabilisasi 6% abu marmer dengan tebal lapisan tanah stabilisasi minimum 20 cm.

Kata kunci: Tanah lempung, abu marmer, stabilisasi tanah, california bearing ratio

Pendahuluan

Tanah berperan penting dalam pembangunan konstruksi. Jenis dan sifat tanah mempengaruhi perilaku konstruksi di atasnya. Jenis tanah biasanya dapat berupa pasir, lanau dan lempung. Perbedaannya dapat dilihat pada ukuran partikel, batas cair, dan indeks plastisitas dari tanah tersebut. Pada umumnya jenis tanah lempung memiliki

karakteristik yang kurang baik, sehingga sering menyebabkan masalah pada struktur yang dibangun di atasnya (Siregar & Andajani, 2018).

Tanah lempung merupakan jenis tanah yang terdiri dari butiran-butiran sangat kecil memiliki sifat plastisitas dan kohesi. Kohesi menunjukkan bahwa bagian-bagian tersebut melekat satu dengan yang lainnya, sedangkan plastisitas merupakan sifat yang

memungkinkan bentuk bahan itu sendiri dapat berubah tanpa adanya perubahan dari isinya atau tanpa kembali ke bentuk aslinya, serta tanpa terjadi retakan atau terpecah (Nurliasari & Kairupan, 2006). Tanah lempung pada umumnya terdiri dari hidrat aluminium silika yang tercampur dengan bahan organik yang memiliki sifat kohesif, berplastis, dan mudah terkonsolidasi bila terbebani serta memiliki kembang-susut yang diakibatkan oleh perubahan kadar air (Agung & Lestari, 2014). Salah satu jenis tanah lempung adalah tanah lempung ekspansif yang memiliki kandungan berjenis montmorillonit, jenis pertukaran ion, kandungan elektrolit fase cair dan struktur internal materialnya (Nurliasari & Kairupan, 2006).

Tanah lempung memiliki sifat *swelling* yang merupakan pembesaran volume yang diakibatkan penambahan kadar air. Tanah lempung memiliki potensi pembesaran volume berdasarkan peningkatan kadar air, indeks plastisitas, gradasi dan tekanan overburden. Tanah lempung lunak memberikan pengaruh yang buruk apabila digunakan sebagai tanah dasar, karena jenis tanah ini memiliki daya dukung dan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) yang rendah (Waruwu *et al.*, 2022c). Tanah lunak identik dengan nilai daya dukungnya yang rendah dan sifatnya yang komprehensif. Menurut Manual Desain Perkerasan Jalan oleh Bina Marga, nilai CBR yang dianjurkan untuk keperluan pembangunan jalan raya adalah tidak kurang dari 6%. Sementara nilai CBR tanah dasar yang umum ditemukan di Indonesia memiliki kisaran nilai 2-4%. Stabilisasi tanah menggunakan bahan aditif kimia seperti batu kapur dan semen tergolong sebagai material yang sulit diperbaharui dan membutuhkan biaya yang besar dalam produksinya (Han *et al.*, 2021).

Stabilisasi tanah bermanfaat untuk memperbaiki karakteristik dari tanah lempung. Stabilisasi tanah terdiri dari stabilisasi tanah mekanik dan kimiawi (Mufarrihah, 2022). Stabilisasi mekanik merupakan stabilisasi tanah dengan mencampur dua jenis tanah yang berbeda untuk mendapatkan sifat tanah yang diinginkan. Sedangkan stabilisasi kimiawi adalah stabilisasi tanah dengan mencampur tanah dengan bahan tambah seperti kapur, abu marmer, semen, dan material lainnya.

Perbaikan tanah dengan cara stabilisasi adalah salah satu usaha untuk memperbaiki sifat-sifat yang kurang baik agar dapat memenuhi syarat spesifikasi tertentu yang dapat dilakukan melalui penambahan material stabilisasi tanah (Waruwu, 2021). Tanah stabilisasi didapatkan di atas permukaan tanah lunak tanpa atau dengan urugan tambahan dapat mempercepat proses penurunan pada tanah dasar (Muhammed *et al.*, 2020).

Penggunaan material dengan prinsip ramah lingkungan dapat dipertimbangkan sebagai solusi perbaikan tanah. Salah satu upaya tersebut adalah pemanfaatan limbah pabrik berupa pembakaran batu-bara (*fly ash*), abu marmer (*marble dust*), dan abu vulkanik. Penelitian menunjukkan adanya peningkatan nilai BR sebanyak 24-33 kali pada tanah ekspansif dengan pemanfaatan limbah abu marmer dan abu vulkanik hingga mencapai nilai CBR yang signifikan (Muhiddin *et al.*, 2019; Waruwu *et al.*, 2022b).

Abu marmer merupakan sisa limbah dari pengolahan marmer. Marmer ini berasal dari metamorfosis batu kapur yang diakibatkan oleh tekanan dan suhu sehingga berubah seiring berjalannya waktu. Meskipun begitu, marmer memiliki kandungan yang berbeda dengan kapur (Indriyanti & Kasmawati, 2018). Abu marmer memiliki senyawa Ca yang bermuatan positif. Senyawa ini yang dapat mengubah karakteristik dari tanah lempung. Muatan positif dari senyawa Ca dapat mengimbangi muatan negatif dari tanah lempung sehingga abu marmer bisa digunakan sebagai salah satu bahan stabilisasi kimiawi (Siregar & Andajani, 2018). Keandalan perbaikan tanah dengan stabilisasi abu marmer perlu dibandingkan dengan metode perbaikan dengan *biogrouting*.

Metode perbaikan tanah menggunakan *biogrouting* marak digunakan untuk mengubah sifat-sifat tanah yang kurang menguntungkan. Bahan aditif seperti semen, resin epoksi dan akrilida digunakan sebagai material untuk mengisi pori dalam tanah. Metode *biogrouting* memberikan efek yang lebih signifikan dibanding metode pencampuran tanah konvensional dan memiliki tingkat toksisitas rendah terhadap lingkungan dibandingkan dengan metode *grouting* konvensional karena tidak menggunakan bahan kimia yang berbahaya (Han *et al.*, 2021). Pemanfaatan bakteri *bacillus subtilis* sebagai bahan utama dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak dan ekspansif telah diteliti di laboratorium dan menunjukkan hasil yang positif terhadap parameter kekuatan tanah seperti nilai kohesi, daya dukung, dan nilai kuat geser (Hasriana *et al.*, 2018; Sugata *et al.*, 2020).

Bakteri merupakan mikroorganisme yang hidup didalam tanah sebagai pengurai, terutama karena ketersediaan komponen organik yang berlimpah. Perbaikan tanah ternyata juga dapat dilakukan dengan memanfaatkan bakteri sebagai perbaikan untuk tanah lempung. Bakteri yang umum digunakan untuk perbaikan tanah adalah bakteri dengan jenis *sporosaccina pasteurii* dan *bacillus subtilis*. Bakteri berperan sebagai agen pengurai kalsium, yang dapat meningkatkan

kekuatan tanah melalui timbulnya rekatan antar partikel tanah oleh kristal CaCO_3 . Pada penelitian ini, bakteri yang digunakan adalah *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Penambahan bakteri *bacillus subtilis* memiliki nilai kohesi paling tinggi pada pengujian *direct shear* dibandingkan dengan bakteri lainnya. Sedang bakteri *bacillus amyloliquefaciens* mampu meningkatkan nilai kohesi tanah selama 60 hari masa pemeliharaan (Suryanto, 2021).

Pengujian penambahan abu marmer dan bakteri untuk tanah lempung dapat dilakukan dengan menggunakan uji CBR (*California Bearing Ratio*) untuk mengetahui perubahan kekuatan tanah. Uji CBR merupakan bahan pembanding antara beban penetrasi di lapisan tanah dengan perkerasan tanah sesuai dengan bahan standar yang memiliki sama pada nilai kedalaman dan kecepatan penetrasi (Badan Standardisasi Nasional, 2011). Umumnya masalah yang sering ditemui pada tanah dasar jalan yaitu rendahnya daya dukung tanah yang terlihat dari rendahnya nilai CBR (Waruwu *et al.*, 2021b). Oleh karena itu, perlu dilakukan stabilisasi tanah lempung dengan campuran abu marmer dan *biogrouting* sebagai upaya dalam meningkatkan nilai CBR tanah dasar melalui uji model fisik di laboratorium.

Metode

Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Pelita Harapan melalui model fisik skala laboratorium. Tanah menggunakan tanah lempung dari Cikarang dengan bahan tambah abu marmer dari limbah pabrik marmer. Selain perbaikan tanah dengan metode stabilisasi, tanah lempung juga diperbaiki dengan metode *biogrouting* sebagai pembanding.

Inokulasi bakteri.

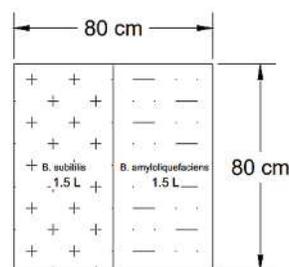
Tanah yang digunakan merupakan tanah hasil stabilisasi menggunakan bakteri *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Bakteri ini menggunakan sumber kalsium cangkang kerang simping untuk menghasilkan CaO sebagai sumber penghasil produk CaCO_3 pada partikel tanah lempung. Medium kultur sebagai media nutrisi untuk kedua bakteri menggunakan komposisi 0,4% *yeast extract*, 0,5% *dextrose* dan 0,25% *calcium oxide*, kemudian disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit.

Gambar 1 memperlihatkan proses inokulasi bakteri dilakukan dalam keadaan steril pada vial yang berisi 10 mL berisi 0,8% NB (*nutrient broth*). Vial berisi bakteri dituang ke dalam erlenmeyer berukuran 600 mL berisi medium kultur yang telah disiapkan

sebelumnya (Suryanto, 2021). Bakteri disiram pada tanah asli dan dibiarkan mengendap dalam bak dengan skema seperti pada Gambar 2.



Gambar 1. Proses Inokulasi bakteri



Gambar 2. Skema inokulasi bakteri dalam sampel tanah lempung

Abu marmer.

Material abu marmer yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah dari pabrik marmer PT. Jaya Abadi Granitama. Berdasarkan dari uji komposisi kimia yang dikandung oleh abu marmer ini ditunjukkan pada Tabel 1. Kandungan CaO dan SiO_2 pada abu marmer merupakan komponen terbesar. CaO merupakan kalsium oksida yang umumnya diperoleh pada material kapur sedangkan SiO_2 merupakan kuarsa atau silika yang biasa ditemukan dalam kandungan semen.

Tabel 1. Komposisi abu marmer

Komposisi kimia	Hasil (%)
CaO	68,9
SiO ₂	14,6
Fe ₂ O ₃	6,0
MgO	4,4
Al ₂ O ₃	3,9
Sc ₂ O ₃	0,6
TiO ₂	0,5
K ₂ O	0,4
Na ₂ O	0,2
Cl	0,1
MnO	0,1
SO ₃	0,1
SrO	0,1

Uji karakteristik tanah.

Karakteristik tanah asli yang digunakan diketahui melalui serangkaian pengujian di laboratorium. Karakteristik tanah meliputi kadar air, berat jenis (*specific gravity*), batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), indeks plastisitas (*plasticity index*), dan jumlah butiran halus yang lolos oleh saringan #200.

Uji kompaksi.

Uji kompaksi adalah suatu pengujian untuk mengetahui kadar air optimum dan berat isi kering maksimum. Kompaksi dilakukan sebanyak lima kantong plastik dengan berat yang sama yaitu 2 kg pada jumlah kadar abu marmer sebanyak berturut-turut 0%, 3%, dan 6%. Proses pengujian dimulai dengan pencampuran air sedikit demi sedikit pada tanah yang diratakan dengan tangan. Pencampuran air dengan tanah tidak boleh terlalu banyak ataupun sedikit, namun harus diupayakan dalam kondisi optimum. Setelah jumlah air optimum, dilanjutkan dengan proses pemeraman selama satu hari untuk mencapai tanah tercampur secara merata.

Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR).

Pengujian ini dilakukan dalam bak berukuran 120cm x 90cm x 90 cm seperti pada Gambar 3. Mengingat penelitian di lapangan dinilai sulit untuk dilakukan, maka dilakukan pemodelan uji fisik di laboratorium yang menyerupai kepadatan dan kadar air lapangan untuk melihat pengaruh ketebalan tanah stabilisasi terhadap daya dukung dan deformasi (Waruwu *et al.*, 2021b). Bak uji diisi agregat kasar dan halus setinggi 40 cm dan 50 cm untuk tanah asli dengan kepadatan mendekati kondisi di lapangan.



Gambar 3. Pengujian CBR pada tanah dalam bak uji

Kondisi lapangan didekati dengan kadar air dan kepadatan tanah berdasarkan kepadatan lapangan. Kepadatan tanah diketahui dengan melakukan pengujian *core cutter* pada setiap lapis yang diisi tanah. Selanjutnya digali lobang dengan diameter 30 cm dengan kedalaman sesuai dengan rencana ketebalan tanah stabilisasi yang dilakukan. Lobang diisi dengan tanah yang telah dicampur dengan 3% dan 6% abu marmer, tanah yang telah diperbaiki dengan *biogrouting* menggunakan *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Pengujian CBR dilakukan pada setiap titik uji yang ditentukan.

Hasil dan Pembahasan.

Hasil uji karakteristik tanah asli.

Pengujian karakteristik tanah asli yang dilakukan adalah kadar air, berat isi, berat jenis, dan batas-batas *Atterberg* yang terdiri dari *liquid limit*, *plastic limit*, dan *plasticity index*. Hasil uji karakteristik tanah asli yang belum distabilisasi ditunjukkan pada Tabel 2. Tampak bahwa jenis dan karakteristik tanah dikelompokkan dalam CL sebagai lempung berplastisitas rendah menurut klasifikasi USCS (Hardiyatmo, 2002).

Tabel 2. Hasil uji karakteristik tanah asli

Komponen	Hasil (%)
Kadar air	32,97
<i>Specific gravity</i>	2,68
<i>Liquid limit</i> (LL)	36
<i>Plastic limit</i> (PL)	25
<i>Plasticity index</i> (PI)	11
Lolos saringan #200	84,35

Hal ini dikarenakan hasil nilai *LL* yang didapat kurang dari 50% dan material yang diuji lebih 50% lolos saringan No. 200. Untuk klasifikasi AASHTO, tanah ini dapat diklasifikasi pada golongan A-6, karena selain > 35% lolos saringan No. 200, juga nilai *LL* lebih kecil 40% dan nilai *PI* yang didapatkan yaitu 11%.

Hasil pengujian kompaksi

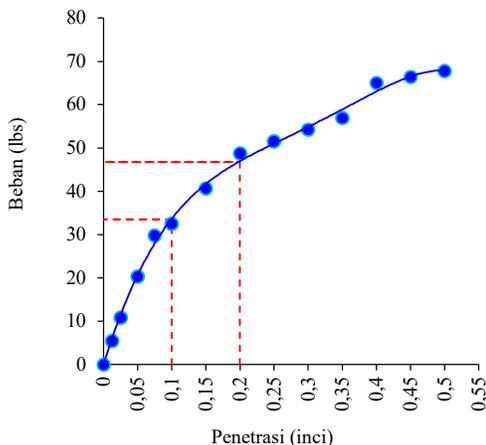
Pengujian kompaksi dilakukan untuk mengetahui w_{opt} yang digunakan pada pengujian CBR. Nilai berat isi kering maksimum dan kadar air optimum dari hasil uji kompaksi diperlihatkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa berat volume kering pada kadar abu marmer 6% memiliki nilai lebih tinggi dari pada kadar abu marmer 3% dan tanah yang diperbaiki dengan *biogrouting*. Nilai berat volume kering maksimum dapat dijadikan sebagai petunjuk awal dalam mencapai kepadatan tanah dan perbaikan sifat-sifatnya.

Tabel 3. Hasil uji kompaksi abu marmer

Perbaikan tanah	γ_d (gr/cm ³)	w (%)
Abu marmer 3%	1,54	23,3
Abu marmer 6%	1,59	23,7
<i>Bacillus subtilis</i>	1,35	27,4
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	1,41	22,0

Hasil pengujian CBR tanah asli

Pengujian CBR merupakan pengujian utama yang dilakukan pada penelitian ini. Pengujian CBR dimulai pada tanah asli tanpa stabilisasi dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai CBR tanah asli tanpa stabilisasi dan perbaikan tanah didapatkan pada penetrasi 0,1 inci sebesar 1,12% dan pada penetrasi 0,2 inci sebesar 1,04%. Dengan demikian nilai CBR tanah diambil yang terbesar yaitu 1,12% (Gambar 4). Nilai CBR tanah asli ini tergolong sebagai tanah lempung dengan daya dukung sangat rendah (Bowles, 1992); (Waruwu *et al.*, 2021a).



Gambar 4. Hasil uji CBR tanah asli

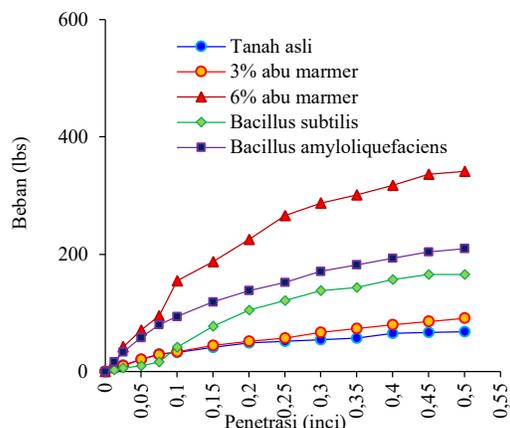
Tanah lunak identik dengan daya dukungnya yang rendah dan kadar airnya yang tinggi (Blayi *et al.*, 2020). Tanah dengan jenis ini biasanya memiliki daya dukung yang rendah dan rawan terhadap deformasi. Pembangunan infrastruktur dilakukan dalam skala besar, sehingga kondisi tanah lunak seringkali tidak dapat dihindari.

Hasil pengujian CBR tanah stabilisasi

Pengujian CBR dilakukan pada tanah yang distabilisasi abu marmer dan tanah yang telah diperbaiki dengan *biogrouting* menggunakan *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Penambahan abu marmer pada tanah lempung masing-masing 3% dan 6% dari berat kering tanah.

Hasil uji CBR tanah stabilisasi dengan tebal 10 cm ditunjukkan pada Gambar 5 yang digambarkan dengan hubungan penetrasi dan beban yang diterapkan.

Perbaikan tanah memberikan dampak dalam meningkatkan beban pada penetrasi yang sama. Stabilisasi tanah dengan 3% abu marmer sedikit lebih tinggi dibandingkan tanah asli, sedangkan perbaikan tanah dengan *biogrouting* memperlihatkan hasil yang lebih baik dan stabilisasi tanah dengan 6% abu marmer merupakan hasil terbaik dibandingkan hasil uji lainnya. Ini dapat diartikan bahwa perbaikan tanah setebal 10 cm sudah menunjukkan tanda-tanda perbaikan walaupun masih belum signifikan.



Gambar 5. Hasil uji CBR untuk ketebalan 10 cm

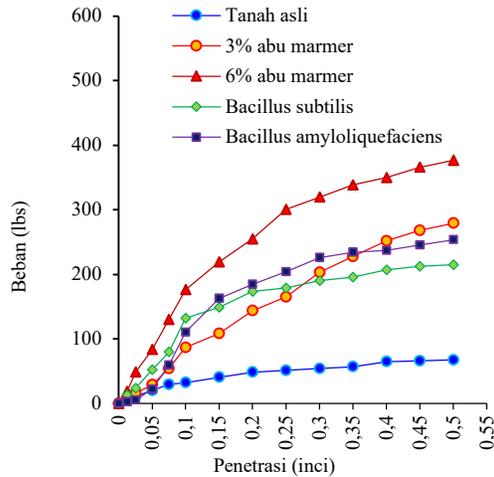
Nilai CBR tanah dari masing-masing tipe perbaikan untuk ketebalan tanah stabilisasi 10 cm diuraikan pada Tabel 4. Nilai CBR tanah yang diperoleh semuanya masih tergolong belum memenuhi syarat sebagai tanah dasar konstruksi jalan karena masih lebih kecil dari 6%. Namun demikian, nilai CBR tanah yang distabilisasi abu marmer sudah mendekati nilai CBR yang diperlukan. Tebal tanah stabilisasi 10 cm belum cukup meningkatkan nilai CBR tanah secara signifikan.

Tabel 4. Nilai CBR tanah ketebalan 10 cm

Perbaikan tanah	Nilai CBR (%)
Abu marmer 3%	3,21
Abu marmer 6%	5,00
<i>Bacillus subtilis</i>	2,09
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	3,11

Hasil uji CBR pada tanah stabilisasi dengan tebal 20 cm ditunjukkan pada Gambar 6. Beban yang dapat dipikul oleh tanah stabilisasi semakin tinggi pada ketebalan 20 cm. Ini diartikan bahwa lapisan tanah setebal 20 cm dapat memberikan hasil yang jauh

lebih baik dibandingkan dengan ketebalan 10 cm. Beban yang dihasilkan pada tanah stabilisasi 3% abu marmer dan perbaikan dengan *biogrouting* terlihat semakin jauh melebihi tanah asli tanpa stabilisasi. Hasil yang baik diperoleh pada stabilisasi tanah dengan 6% abu marmer.



Gambar 6. Hasil uji CBR untuk ketebalan 20 cm

Nilai CBR tanah dari masing-masing tipe perbaikan untuk ketebalan tanah stabilisasi 20 cm diuraikan pada Tabel 5. Nilai CBR tanah stabilisasi 3% abu marmer hampir sama dengan tanah yang diperbaiki menggunakan *Bacillus subtilis* dan *Bacillus amyloliquefaciens*. Nilai CBR untuk tanah yang stabilisasi 6% abu marmer memberikan nilai CBR yang mendekati 6% sebagai syarat minimum untuk tanah dasar konstruksi jalan.

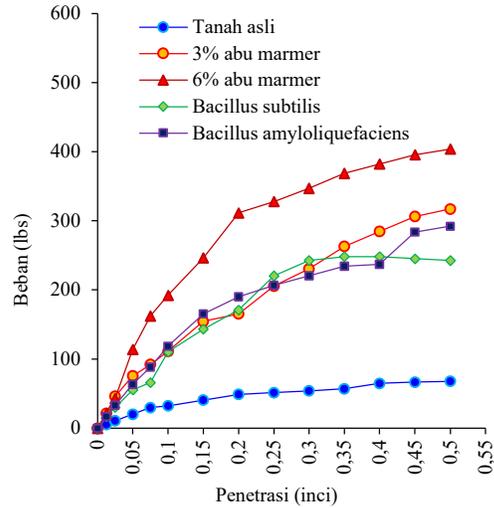
Tabel 5. Nilai CBR tanah – ketebalan 20 cm

Perbaikan tanah	Nilai CBR (%)
Abu marmer 3%	3,19
Abu marmer 6%	5,79
<i>Bacillus subtilis</i>	3,67
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	3,89

Hasil uji CBR pada tanah stabilisasi dengan tebal 30 cm ditunjukkan pada Gambar 7. Perilaku hubungan beban dengan penetrasi untuk tanah dengan 3% abu marmer dan tanah dengan perbaikan *biogrouting* terlihat tidak jauh beda satu sama lainnya. Sementara beban pada penetrasi yang sama untuk tanah dengan 6% abu marmer masih lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.

Secara keseluruhan dari tiga variasi tebal tanah stabilisasi terlihat bahwa tanah stabilisasi 3% abu marmer mengalami peningkatan yang lebih signifikan dibandingkan dengan tanah dengan perbaikan *biogrouting*, namun tidak bisa

mengimbangi peningkatan pada tanah stabilisasi 6% abu marmer.



Gambar 7. Hasil uji CBR untuk ketebalan 30 cm

Nilai CBR tanah dari masing-masing tipe perbaikan untuk ketebalan tanah stabilisasi 10 cm diuraikan pada Tabel 6. Perilaku hubungan penetrasi dengan beban dari hasil uji CBR relevan dengan nilai CBR yang dihasilkan. Hal ini ditunjukkan pada nilai CBR tanah stabilisasi dengan 3% abu marmer dan tanah dengan perbaikan *biogrouting* terlihat hampir sama satu sama lainnya.

Tabel 6. Nilai CBR tanah – ketebalan 30 cm

Perbaikan tanah	Nilai CBR (%)
Abu marmer 3%	3,81
Abu marmer 6%	6,70
<i>Bacillus subtilis</i>	4,07
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	4,00

Beban yang semakin tinggi menunjukkan nilai CBR yang semakin tinggi juga, ini diperlihatkan pada nilai CBR tanah dengan 6% abu marmer menunjukkan nilai CBR sebesar 6,70%. Nilai ini menjadikan tanah yang telah distabilisasi cukup memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk konstruksi jalan.

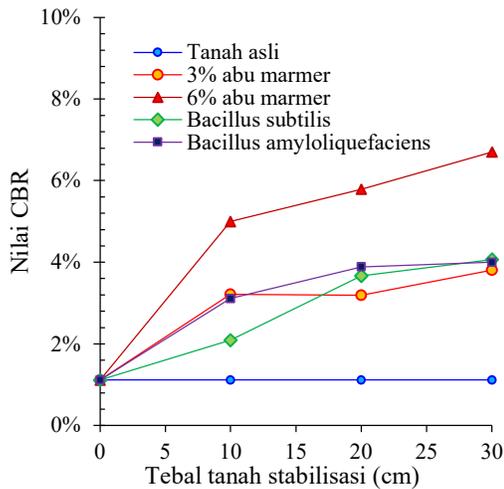
Nilai CBR terlihat meningkat sesuai dengan peningkatan ketebalan tanah stabilisasi yaitu 10 cm, 20 cm, dan 30 cm. Selain itu, penambahan abu marmer berpengaruh pada kenaikan nilai CBR tanah. Tanah yang hanya dicampur dengan abu marmer sedalam 10 cm cenderung lebih rendah daripada tanah yang telah dicampur dengan abu marmer dengan kedalaman 20 cm dan 30 cm. Kadar abu marmer yang menghasilkan nilai CBR yang tertinggi terdapat pada campuran abu marmer 6%

dan dengan kedalaman 30 cm. Nilai yang didapatkan adalah 6,70%. Selain abu marmer, nilai CBR tanah menggunakan metode *biogrouting* terlihat mengalami peningkatan nilai CBR dari tanah asli. Meskipun peningkatan nilai CBR dengan penggunaan bakteri tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan stabilisasi menggunakan abu marmer, tetapi penambahan bakteri pada tanah lempung dapat menaikkan nilai CBR dari tanah lempung.

Secara keseluruhan ditemukan bahwa nilai CBR tanah stabilisasi 6% abu marmer menghasilkan nilai CBR $\geq 5\%$ untuk semua tebal tanah stabilisasi. Tanah hasil stabilisasi dengan CBR $\geq 5\%$ dapat dianggap memenuhi syarat untuk tanah dasar jalan (Waruwu *et al.*, 2021a).

Optimalisasi stabilisasi tanah

Optimalisasi stabilisasi tanah diketahui dari penambahan bahan tambah dalam menghasilkan nilai CBR tanah dasar yang maksimal. Optimasi dalam perbaikan tanah dasar dapat mendukung pembangunan jalan pada akses tanah lunak (Yudhistira *et al.*, 2024). Nilai CBR tanah dasar untuk setiap kandungan abu marmer dan *biogrouting* pada setiap tebal tanah stabilisasi diperlihatkan pada Gambar 8. Perbaikan tanah dengan stabilisasi abu marmer maupun dengan metode *biogrouting* menunjukkan peningkatan nilai CBR tanah lempung.



Gambar 8. Pengujian CBR pada tanah

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nilai CBR tanah dengan metode *biogrouting* menggunakan *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens* terlihat lebih kurang sama dengan tanah yang distabilisasi 3% abu marmer. Pemanfaatan abu marmer dari limbah pabrik dapat memperbaiki sifat-sifat yang kurang menguntungkan dari tanah.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan adanya peningkatan nilai CBR dan kuat tekan tanah yang distabilisasi abu vulkanik dan abu marmer (Waruwu *et al.*, 2021b); (Seyrek, 2018); (Zorluer & Demirbas, 2013); (Zorluer & Gucek, 2014). Walaupun demikian, nilai CBR yang didapatkan belum cukup memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk pekerjaan jalan, karena nilai CBR lebih kecil 6%.

Penggunaan bahan abu marmer efektif dalam memperbaiki sifat-sifat tanah apabila digunakan minimal 5% abu marmer (Zorluer & Demirbas, 2013). Penelitian lain mengungkapkan bahwa peningkatan nilai CBR tanah yang distabilisasi abu marmer didapatkan apabila kadar abu marmer sebanyak 5-30% (Harianto & Masri, 2016). Sementara (Zorluer & Gucek, 2014) menyatakan jumlah abu marmer yang efektif adalah $<15\%$. Nilai CBR maksimal pada penambahan abu marmer 6%, hal ini lebih sedikit dibandingkan penambahan 15% tanah putih yang dihasilkan oleh (Priastwi *et al.*, 2020).

Hasil stabilisasi tanah dengan abu marmer yang didapatkan pada penelitian menunjukkan 6% abu marmer dapat meningkatkan nilai CBR yang cukup signifikan sebagai tanah dasar untuk pekerjaan jalan. Persyaratan yang harus dipenuhi dalam tanah dasar jalan, seharusnya mengacu pada Peraturan Bina Marga (Mahmudah *et al.*, 2024). Hal ini terlihat dari nilai CBR untuk tebal tanah stabilisasi minimum 20 cm menghasilkan nilai CBR tanah lebih besar dari 6%.

Tebal minimum ini relevan dengan tebal lapisan tanah yang biasa digunakan untuk tebal lapisan pada setiap tahapan pemadatan tanah di lapangan sebelum dilakukan pengujian kepadatan maupun CBR lapangan (Waruwu *et al.*, 2022a). Abu marmer memiliki potensi yang cukup baik untuk digunakan sebagai material stabilisasi tanah. Upaya ini juga dapat berkontribusi dalam mengurangi dampak lingkungan akibat limbah pabrik marmer, untuk itu penggunaan abu marmer perlu dipertimbangkan sebagai alternatif material maju di masa yang akan datang. Perbaikan tanah di permukaan lebih cocok menggunakan metode stabilisasi, tetapi untuk sistem perkuatan menggunakan tiang-tiang lebih menguntungkan digunakan pada perbaikan lapisan yang lebih dalam (Jogiadinata *et al.*, 2021).

Kesimpulan

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari Uji CBR pada tanah lempung stabilisasi abu marmer dan *biogrouting* adalah stabilisasi tanah dengan abu marmer dan perbaikan tanah dengan metode *biogrouting* memberikan dampak yang baik dalam

meningkatkan nilai CBR tanah. Peningkatan nilai CBR tanah yang distabilisasi dengan abu marmer dipengaruhi secara signifikan oleh tebal lapisan tanah stabilisasi, hal ini berbeda dengan perbaikan tanah menggunakan metode *biogrouting*.

Tebal lapisan tanah minimum yang distabilisasi mempunyai nilai CBR yang baik pada tebal 20 cm terutama untuk tanah stabilisasi 6% abu marmer. Hal ini relevan dengan tebal minimum setiap tahapan pemadatan tanah di lapangan sebelum pengujian kepadatan dan CBR lapangan. Secara keseluruhan ditemukan bahwa stabilisasi tanah dengan 6% abu marmer menghasilkan nilai CBR tanah yang memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk konstruksi jalan terutama untuk tebal minimum 20 cm.

Stabilisasi tanah dengan abu marmer memberikan dampak yang lebih baik dibandingkan dengan metode *biogrouting* yang terlihat dari peningkatan nilai CBR yang lebih baik pada tanah stabilisasi abu marmer. Dengan demikian, material abu marmer perlu dikembangkan sebagai material alternatif untuk stabilisasi tanah dasar konstruksi jalan. Hal ini memberikan manfaat untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah marmer dan biaya yang lebih ekonomis dalam upaya perbaikan tanah.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada laboran yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini dan pihak lain yang berkontribusi. Penulis berterima kasih kepada PT. Jaya Abadi Granitama yang telah menyediakan abu marmer yang diperlukan dalam penelitian ini. Penelitian ini terlaksana dengan dukungan dana dari Program Kreativitas Mahasiswa – bidang Riset Eksakta Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi tahun anggaran 2023.

Daftar Pustaka

Agung, I. G., & Lestari, A. I. (2014). Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif. *Ganec Swara*, 8(2), 15–19.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1738:2011 Cara uji CBR (California Bearing Ratio) Lapangan*.

Blayi, R. A., Sherwani, A. F. H., Ibrahim, H. H., Faraj, R. H., & Daraei, A. (2020). Strength Improvement of Expansive Soil by Utilizing Waste Glass Powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13.

Bowles, J. E. (1992). *Engineering properties of soil and their measurement*. McGraw-Hill Book Company Limited.

Han, S., Wang, B., Gutierrez, M., Shan, Y., & Zhang, Y. (2021). Laboratory Study on Improvement of Expansive Soil by Chemically Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Materials*, 14(12), 1–23.

Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Gajah Mada University Press.

Hariato, T., & Masri, A. (2016). Karakteristik Mekanis Tanah Kembang Susut yang Distabilisasi Dengan Limbah Marmer. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2016*, 293–300.

Hasriana, Samang, L., Djide, M. N., & Harianto, T. (2018). A Study on Clay Soil Improvement with *Bacillus Subtilis* Bacteria as the Road Subbase Layer. *International Journal of GEOMATE*, 15(52), 114–120.

Indriyanti, & Kasmawati. (2018). Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. *Teknik Hidro*, 11(2), 14–25.

Jogiadinata, E., Pramono Rahardjo, P., & Lim, A. (2021). Analisis Tiga Dimensi Pondasi Tiang-Rakit pada Tanah Lempung, Menteng-Jakarta. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(1), 107–117.

Mahmudah, N., Reswara, H., & Al-Haji, G. (2024). Analysis of Relationship between Geometric and Potential Accident on Imogiri - Dlingo Road, Bantul, Indonesia. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(2), 271–279.

Mufarrihah, Z. (2022). *Pengaruh Penambahan Campuran Serbuk Limbah Marmer dan Matos Soil Stabilizer Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah Berbutir Halus*, Tugas Akhir, Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.

Muhammed, J. J., Jayawickrama, P. W., Teferra, A., & Özer, M. A. (2020). Settlement of a Railway Embankment on PVD-Improved Karakore soft Alluvial Soil. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1015–1027.

Muhiddin, A. B., Harianto, T., Arsyad, A., & Indriyanti. (2019). Experimental Study on Clay Stabilization with Waste Limestone from Marble Industry. *Lowland Technology International*, 21(3), 172–186.

Nurliasari, F. R., & Kairupan, V. N. (2006).

- Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Godong KM-51 dengan Menggunakan Gypsum atau Arang*, PhD Thesis, Semarang: Universitas Diponegoro.
- Priastiwati, Y. A., Hidayat, A., Daryanto, D., & Salamasyah, Z. (2020). Pengaruh Substitusi Tanah Putih pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktifator Natrium Hidroksida. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 9–16.
- Seyrek, E. (2018). Engineering Behavior of Clay Soils Stabilized with Class C and Class F Fly Ashes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(2), 273–287.
- Siregar, D. R., & Andajani, N. (2018). Pengaruh Penambahan Limbah Marmer Terhadap Pteensial Swelling Pada Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Driyorejo. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 186–194.
- Sugata, M., Widjajakusuma, J., Augestasia, A., Zacharia, A., & Tan, T. J. (2020). The Use of Eggshell Powder as Calcium Source in Stabilizing Expansive Soil Using *Bacillus Subtilis*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1567(3).
- Suryanto, C. L. (2021). *Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Metode Biogrouting Menggunakan Bakteri Bacillus Subtilis dan Bacillus Amyloliquefaciens dengan Tambah Limbah Cangkang Kerang*, Tugas Akhir, Tangerang: Universitas Pelita Harapan.
- Waruwu, A. (2021). *Perbaikan dan Perkuatan Tanah Gambut*. Amerta Media.
- Waruwu, A., Arfan, M., & Waruwu, T. O. (2022a). The Behavior of the Perbaungan Railway Subgrade. *Journal of Infrastructure Planning and Engineering (JIPE)*, 1(1), 46–50.
- Waruwu, A., Darmawandi, A., Halawa, T., & Muammar. (2022b). Perbandingan Abu Vulkanik dan Kapur Sebagai Material Stabilisasi Tanah Lempung. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 5(1), 8–15.
- Waruwu, A., Gea, F., Hia, J. Y. A., Waruwu, E. M., & Zega, M. (2022c). Pengaruh Model Perkuatan Bambu Terhadap Nilai CBR Tanah Lempung Lunak. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 131–138.
- Waruwu, A., Zega, M., Endriani, D., & Susanti, R. D. (2021a). Pemanfaatan Matras Bambu pada Perbaikan Nilai California Bearing Ratio (CBR) Tanah Lempung. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 9(2), 95–103.
- Waruwu, A., Zega, O., Rano, D., Panjaitan, B. M. T., & Harefa, S. (2021b). 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.
- Yudhistira, A. T., Fathani, T. F., Budi Nugroho, A. S., Prianugroho, N. A., & Wibisono, H. (2024). Practical Optimization of Access Road Construction Methods in Soft Soil Areas. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(2), 289–299.
- Zorluer, I., & Demirbas, A. (2013). Use of Marble Dust and Fly Ash in Stabilization of Base Material. *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(1), 47–55.
- Zorluer, I., & Gucek, S. (2014). The Effects of Marble Dust and Fly Ash on Clay Soil. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(1), 59–67.