

Perbandingan Nilai CBR (*California Bearing Ratio*) pada Uji Model Tanah Lempung Stabilisasi Abu Marmer dan Perbaikan dengan Metode *Biogrouting*

Indah Pangemanan¹, Yulia Yunita¹, Fransiscus Calvin¹, Jason Lujaya¹, Nehemia Wijaya¹,
*Aazokhi Waruwu¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Kota Tangerang
^{*}azokhiw@gmail.com

Received: Revised: Accepted:

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 a comparison of the CBR values of marble ash-stabilized soil with soil improved using the biogrouting method. 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 perbandingan nilai CBR tanah stabilisasi abu marmer dengan tanah yang diperbaiki dengan metode biogrouting. 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 didapatkan 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 yang biasanya dapat berupa pasir, lanau, dan lempung.

Cara membedakannya dapat dilihat pada ukuran partikel, batas cair, dan indeks plastisitas dari tanah tersebut. Umumnya jenis tanah lempung memiliki karakteristik yang kurang baik, sehingga sering menyebabkan terjadinya masalah pada struktur

yang dibangun di atasnya (Siregar and 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 and 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 and Lestari 2014). Salah satu jenis tanah lempung yaitu tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif memiliki kandungan berjenis montmorillonit, jenis pertukaran ion, kandungan elektrolit fase cair dan struktur internal materialnya (Nurliasari and 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 CBR yang rendah (Waruwu *et al.* 2022). Tanah lunak identik dengan nilai daya dukungnya yang rendah dan sifatnya yang komprehensif. Menurut Manual Desain Perkerasan Jalan oleh Bina Marga, nilai CBR (*California Bearing Ratio*) 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%. Metode stabilisasi 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 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 dipadatkan 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 hasil pembakaran batu-bara (*fly ash*), abu marmer (*marble dust*), dan abu vulkanik. Penelitian sebelumnya menunjukkan adanya peningkatan nilai CBR sebanyak 24-33 kali lipat pada tanah ekspansif dengan pemanfaatan limbah abu marmer dan abu vulkanik hingga mencapai nilai CBR yang signifikan (Muhiddin *et al.*, 2019 ; Waruwu *et al.*, 2022).

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 and 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 and 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 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 merupakan *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Christoper Suryanto (Suryanto, 2021), penambahan bakteri *bacillus subtilis* memiliki nilai kohesi paling tinggi pada pengujian *direct shear* dibandingkan dengan bakteri lainnya. Sedangkan, bakteri *bacillus amyloliquefaciens* mampu meningkatkan nilai kohesi pada tanah selama 60 hari masa pemeliharaan.

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.* 2021). Oleh karena itu, pada penulisan ini akan berfokus pada stabilisasi tanah lempung dengan campuran abu marmer dan bakteri untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai CBR pada tanah lempung 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.

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

SiO₂ pada abu marmer merupakan komponen terbesar. CaO merupakan kalsium oksida yang umumnya diperoleh pada material kapur sedangkan SiO₂ 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%

Inokulasi Bakteri

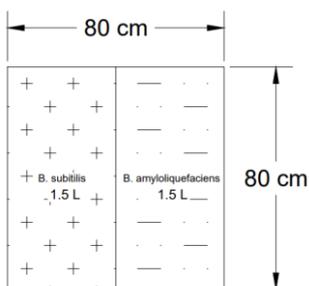
Tanah yang digunakan merupakan tanah hasil stabilisasi menggunakan bakteri *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Bakteri ini menggunakan sumber kalsium cangkang kerang simping untuk menghasilkan CaO sebagai sumber penghasil produk CaCO_3 pada partikel tanah lempung. Medium kultur sebagai 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, 2018). Bakteri disiram pada tanah asli dan dibiarkan mengendap dalam bak dengan skema seperti pada Gambar 2.

Uji Karakteristik Tanah

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



Gambar 1. Proses Inokulasi Bakteri



Gambar 2. Skema inokulasi bakteri dalam sampel tanah lempung

Uji Kompaksi

Uji Kompaksi adalah suatu pengujian yang bertujuan untuk mengetahui kadar air optimum dan berat isi kering maksimum. Kompaksi dilakukan sebanyak 5 kantong plastik dengan berat yang sama yaitu 2 kg pada jumlah kadar abu marmer sebanyak 0%, 3%, dan 6%. Proses pengujian dimulai dengan pencampuran air sedikit demi sedikit pada tanah sembari diratakan menggunakan tangan. Pencampuran air dengan tanah tidak boleh terlalu banyak ataupun sedikit, tetapi harus diupayakan dalam kondisi optimum, setelah jumlah air sudah sesuai maka dilanjutkan dengan proses pemeraman selama 1 hari untuk mencapai tanah tercampur secara merata.

Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR)

Pengujian ini dilakukan dalam bak berukuran 120 cm x 90 cm x 90 cm seperti pada Gambar 3. Penelitian di lapangan dinilai sulit untuk dilakukan, untuk itu dilakukan suatu 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.* 2021). Bak uji diisi agregat kasar dan halus setinggi 40 cm dan 50 cm untuk tanah asli dengan kepadatan mendekati kondisi di lapangan. 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. Setelah itu digali lobang dengan diameter 30 cm dengan kedalaman sesuai dengan rencana ketebalan tanah stabilisasi yang dilakukan. Setelah digali, akan diisi dengan tanah yang telah dicampur dengan 3% abu marmer, 6% abu marmer, tanah yang telah diperbaiki dengan *biogrouting* menggunakan *bacillus subtilis* dan *bacillus amyloliquefaciens*. Kemudian akan dilakukan pengujian CBR pada setiap titik uji yang telah ditentukan.



Gambar 3. Pengujian CBR pada Tanah dalam Bak Uji

Hasil dan Pembahasan

Hasil Uji Karakteristik Tanah Asli

Hasil uji karakteristik tanah asli yang belum distabilisasi ditunjukkan pada Tabel 2. Beberapa pengujian yang dilakukan seperti kadar air, berat isi, berat jenis, dan batas-batas *Atterberg* yang terdiri dari *Liquid Limit*, *Plastic Limit*, dan *Plasticity Index*.

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%

Berdasarkan hasil uji pada Tabel 2, jenis dan karakteristik tanah dikelompokkan dalam CL sebagai lempung berplastisitas rendah menurut klasifikasi USCS (Hardiyatmo 2002). Hal ini dikarenakan hasil nilai *LL* yang didapatkan yaitu kurang dari 50% dan material yang diuji lebih 50%

lolos saringan No. 200. Hal yang sama dilakukan 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

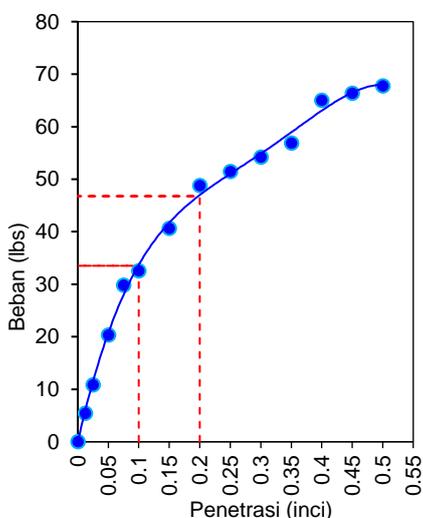
Pengujian kompaksi dilakukan untuk mengetahui w_{opt} yang nantinya akan digunakan pada pengujian CBR. Nilai berat isi kering maksimum dan kadar air optimum dari hasil uji kompaksi diperlihatkan pada Tabel 3. Hasil uji dapat dilihat bahwa berat volume kering pada kadar abu marmer 6% memiliki hasil lebih 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.



Gambar 4. Hasil uji CBR tanah asli

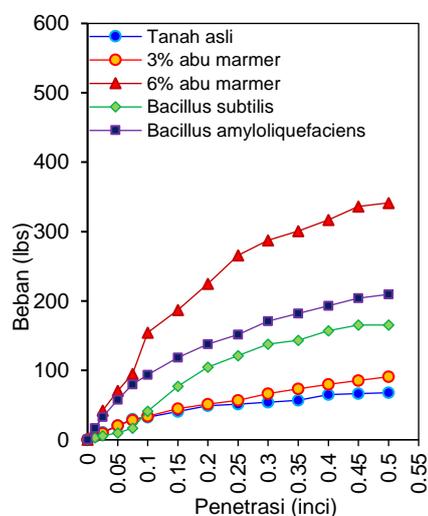
Nilai CBR tanah asli tanpa stabilisasi dan perbaikan tanah didapatkan pada penetrasi 0,1 inci sebesar 1,12% dan pada penetrasi 0,2 inci sebesar 1,04%, dengan demikian nilai CBR tanah diambil yang

terbesar yaitu 1,12% (Gambar 4). Nilai CBR tanah asli ini tergolong sebagai tanah lempung dengan daya dukung sangat rendah (Bowles 1992); (Waruwu, O. Zega, et al. 2021). 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 pada tanah stabilisasi dengan tebal 10 cm ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil uji ini ditunjukkan dalam hubungan penetrasi dan beban yang diterapkan. Perbaikan tanah memberikan dampak dalam meningkatkan beban pada penetrasi yang sama. Hasil uji pada tanah stabilisasi 10 cm menunjukkan 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

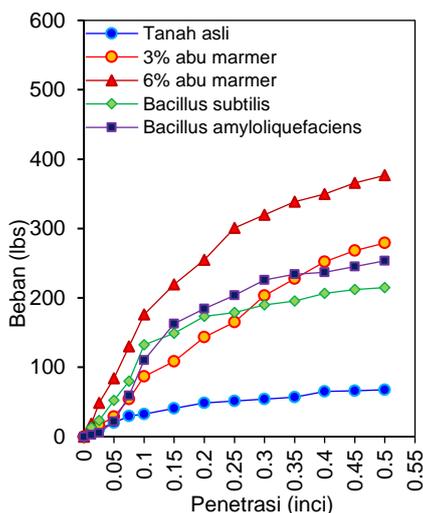
Nilai CBR tanah dari masing-masing tipe perbaikan untuk ketebalan tanah stabilisasi 10 cm diuraikan pada Tabel 4. Nilai CBR tanah yang diperoleh semuanya masih tergolong belum memenuhi syarat

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 sebesar 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 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

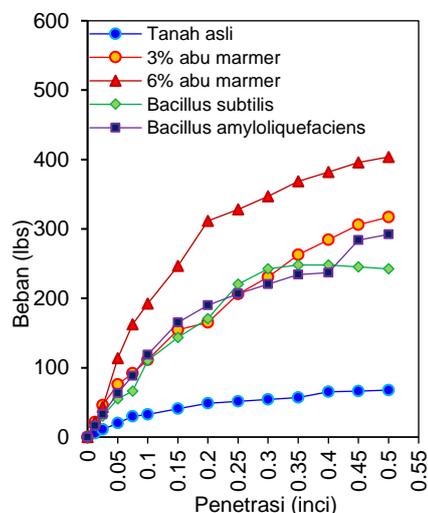
Nilai CBR tanah dari masing-masing tipe perbaikan untuk ketebalan tanah stabilisasi 20 cm diuraikan pada Tabel 5. Nilai CBR tanah stabilisasi 3% abu marmer hampir sama dengan tanah yang diperbaiki dengan *Bacillus subtilis* dan *Bacillus amyloliquefaciens*. Nilai CBR untuk tanah yang stabilisasi 6% abu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

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.

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



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. 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%. Hasil 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.

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

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.

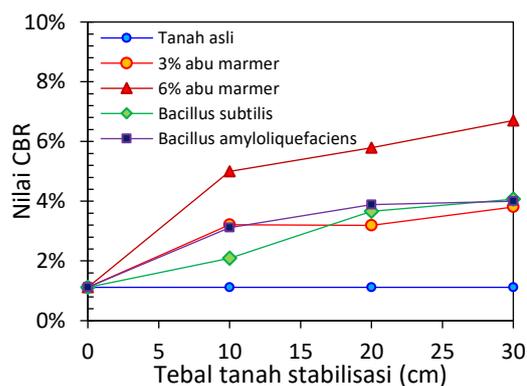
Secara keseluruhan ditemukan bahwa nilai CBR tanah dengan stabilisasi 6% abu marmer menghasilkan nilai CBR $\geq 5\%$ untuk semua tebal tanah stabilisasi. Tanah hasil stabilisasi dengan CBR $\geq 5\%$ dapat dianggap memenuhi syarat untuk tanah dasar untuk jalan (Waruwu *et al.* 2021).

Perbandingan CBR Tanah

Perbandingan nilai CBR tanah yang distabilisasi abu marmer dengan tanah yang diperbaiki dengan metode *biogrouting* diperlihatkan pada Gambar 8. Perbaikan tanah dengan stabilisasi abu marmer maupun dengan metode *biogrouting* menunjukkan peningkatan nilai CBR tanah lempung. 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.* 2021); (Seyrek 2018); (Zorluer and Demirbas 2013); (Zorluer and Gucek 2014). Walaupun demikian, nilai CBR yang didapatkan belum cukup untuk memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk pekerjaan jalan, karena nilai CBRnya lebih kecil 6%. Hasil penelitian sebelumnya didapatkan bahwa penggunaan abu

marmer efektif dalam memperbaiki sifat-sifat tanah apabila digunakan minimal 5% abu marmer (Zorluer and Demirbas 2013). Sedangkan hasil penelitian lain mengungkapkan bahwa peningkatan nilai CBR tanah yang distabilisasi abu marmer didapatkan apabila kadar abu marmer sebanyak 5-30% (Harianto and Masri 2016). Sementara (Zorluer and Gucek 2014) menyatakan jumlah abu marmer yang efektif adalah $< 15\%$.

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. 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.* 2022). 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.



Gambar 8. Pengujian CBR pada Tanah

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini didapatkan beberapa hal yang dapat disimpulkan. 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

didapatkan 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*, hal ini 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. Gusti, and Ayu Istri Lestari. 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, Rizgar A., Aryan Far H. Sherwani, Hawkar Hashim Ibrahim, Rabar H. Faraj, and Ako Daraei. 2020. "Strength Improvement of Expansive Soil by Utilizing Waste Glass Powder." *Case Studies in Construction Materials* 13:e00427. doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00427.

Bowles, J. E. 1992. *Engineering Properties of Soil and Their Measurement*. England: McGraw-Hill Book Company Limited.

Han, Shaoyang, Baotian Wang, Marte Gutierrez, Yibo Shan, and Yijiang Zhang. 2021. "Laboratory

Study on Improvement of Expansive Soil by Chemically Induced Calcium Carbonate Precipitation." *Materials* 14(12):1–23. doi: 10.3390/ma14123372.

Hardiyatmo, Hary Christady. 2002. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Hariato, Tri, and Ahmad Masri. 2016. "Karakteristik Mekanis Tanah Kembang Susut Yang Distabilisasi Dengan Limbah Marmer." Pp. 293–300 in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2016*.

Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, and Tri Harianto. 2018. "A Study on Clay Soil Improvement with Bacillus Subtilis Bacteria as the Road Subbase Layer." *International Journal of GEOMATE* 15(52):114–20. doi: 10.21660/2018.52.97143.

Indriyanti, and Kasmawati. 2018. "Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer." *Teknik Hidro* 11(2):14–25. doi: 10.26618/th.v11i2.2443.

Mufarrihah, Zakiatul. 2022. *Pengaruh Penambahan Campuran Serbuk Limbah Marmer Dan Matos Soil Stabilizer Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah Berbutir Halus*. Yogyakarta.

Muhammed, Jemal Jibril, Priyantha W. Jayawickrama, Alemayehu Teferra, and M. Aydin Özer. 2020. "Settlement of a Railway Embankment on PVD-Improved Karakore Soft Alluvial Soil." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23(5):1015–27. doi: 10.1016/j.jestch.2020.03.004.

Muhiddin, A. B., T. Harianto, A. Arsyad, and Indriyanti. 2019. "Experimental Study on Clay Stabilization with Waste Limestone from Marble Industry." *Lowland Technology International* 21(3):172–86.

Nurliasari, Fauzia Ratna, and Veronika Navratilova Kairupan. 2006. *Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Di Daerah Godong KM-51 Dengan Menggunakan Gypsum Atau Arang*. Semarang.

Seyrek, Evren. 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):273–87. doi: 10.1515/secm-2016-0084.

Siregar, Dian Rokhmatika, and Nur Andajani. 2018. "Pengaruh Penambahan Limbah Marmer Terhadap Potensial Swelling Pada Tanah Lempung Ekspansif

Di Daerah Driyorejo.” *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil* 1(1):186–94.

Sugata, M., J. Widjajakusuma, A. Augestasia, A. Zacharia, and T. J. Tan. 2020. “The Use of Eggshell Powder as Calcium Source in Stabilizing Expansive Soil Using *Bacillus Subtilis*.” *Journal of Physics: Conference Series* 1567(3). doi: 10.1088/1742-6596/1567/3/032058.

Waruwu, Aazokhi. 2021. *Perbaikan Dan Perkuatan Tanah Gambut*. Banyumas, Jawa Tengah: Amerta Media.

Waruwu, Aazokhi, Muhammad Arfan, and Tubel Oktor Waruwu. 2022. “The Behavior of the Perbaungan Railway Subgrade.” *Journal of Infrastructure Planning and Engineering (JIPE)* 1(1):46–50.

Waruwu, Aazokhi, Arif Darmawandi, Tematius Halawa, and Muammar. 2022. “Perbandingan Abu Vulkanik Dan Kapur Sebagai Material Stabilisasi Tanah Lempung.” *Jurnal Proyek Teknik Sipil* 5(1):8–15.

Waruwu, Aazokhi, Fembriaman Gea, Jefri Yanto Agustria H, Ebtanas Murni W, and Memotani Zega. 2022. “Pengaruh Model Perkuatan Bambu

Terhadap Nilai CBR Tanah Lempung Lunak.” *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 20(2):131–38.

Waruwu, Aazokhi, Memotani Zega, Debby Endriani, and Rika Deni Susanti. 2021. “Pemanfaatan Matras Bambu Pada Perbaikan Nilai California Bearing Ratio (CBR) Tanah Lempung.” *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)* 9(2):95–103.

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>.

Zorluer, Ismail, and Abdullah Demirbas. 2013. “Use of Marble Dust and Fly Ash in Stabilization of Base Material.” *Science and Engineering of Composite Materials* 20(1):47–55. doi: 10.1515/secm-2012-0074.

Zorluer, Ismail, and Suleyman Gucek. 2014. “The Effects of Marble Dust and Fly Ash on Clay Soil.” *Science and Engineering of Composite Materials* 21(1):59–67. doi: 10.1515/secm-2012-0100.