

Pengaruh Penambahan Serbuk limbah Marmer Terhadap Kuat Dukung Tanah Lempung Lunak Desa Beluk Kecamatan Bayat

Anto Budi Listyawan*¹, Desi Fitriani², Novia Cindi Oktaviani³, Qunik Wiqoyah⁴, Agus Susanto⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan Kartasura
e-mail: *Anto.Budi@ums.ac.id

Abstrak

Tanah lempung Bayat, Klaten merupakan jeni tanah lempung kohesif yaitu tanah lempung yang memiliki plastisitas cukup tinggi dan mengalami perubahan volume seiring dengan bertambahnya kadar air. Kondisi ini dibuktikan dengan hasil pengujian PI yang dilakukan didapatkan nilai PI = 38,69%. Selain itu dilihat dari keadaan jalan yang banyak terjadi kerusakan, hal ini dikarenakan kondisi subgrade jalan yang kurang baik sehingga tidak mampu mendukung kendaraan yang berada di atasnya dan juga nilai CBR tanah asli yang rendah yaitu 1,866%. Penelitian mengenai kekuatan dukung tanah dengan metode CBR diperlukan berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik. Bahan stabilisasi serbuk marmer dengan persentase 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat sampel kering udara dapat menaikkan nilai CBR. CBR Soaked dan Unsoaked digunakan untuk pengujian kualitas mekanik dan fisik. Hasil uji fisika menunjukkan adanya kenaikan batas plastis dan batas susut, namun terjadi penurunan pada kadar air, berat jenis, batas plastis, persentase lolos saringan no. 200, dan indeks plastisitas. Pada pengujian kualitas mekanik, berat volume tanah kering dan nilai CBR tanah tidak terendam meningkat sebesar 18,088%, sedangkan nilai CBR tanah terendam meningkat sebesar 4,021%.

Kata kunci: CBR unsoaked, CBR soaked, kuat dukung, serbuk marmer, tanah lempung

Pendahuluan

Daya dukung yang terdapat pada jenis tanah di Indonesia sangatlah beragam. Karena peranannya yang penting dalam bangunan dan pondasi, maka tanah harus mempunyai sifat teknis yang sesuai. Kualitas tanah, seperti kompresibilitas, permeabilitas, dan plastisitas, seringkali dianggap tidak mencukupi. Dalam rekayasa geoteknik, ada tiga pendekatan utama dalam menstabilkan tanah dengan tujuan memperbaiki sifat fisiknya: mekanik, kimia, dan fisik. Pemadatan dan konsolidasi merupakan operasi mekanis yang menjadi dasar pendekatan mekanis. Daya dukung dan stabilitas tanah dapat ditingkatkan dengan teknik yang paling populer, yang juga meningkatkan kepadatan tanah dan mengurangi kompresibilitas tanah. Pendekatan kimia melibatkan modifikasi karakteristik dan kekuatan tanah dengan menambahkan bahan pengikat (seperti semen, kapur, atau abu terbang) ke dalam tanah. Sebaliknya, pendekatan fisik melibatkan perkuatan tanah secara fisik dengan memasukkan atau menyusun material perkuatan, misalnya geotekstil, ke dalam lapisan tanah.

Gambar 1 menunjukkan bahwa walaupun telah dilakukan beberapa upaya untuk memulihkan jalan, kondisi jalan di permukiman Beluk, Bayat, dan Klaten berada dalam kondisi yang sangat buruk. Kondisi tanah dasar jalan sangat buruk sehingga tidak mampu menahan beban kendaraan yang berada di atasnya. Fakta bahwa tanah asli memiliki nilai CBR yang rendah yaitu 1,866% dalam pengujian membuktikan keadaan tersebut. Mengingat hal-hal di atas, diperlukan penelitian yang meneliti dampak serbuk marmer yang terbuang terhadap daya dukung tanah liat yang diukur dengan *California Bearing Ratio* (CBR).



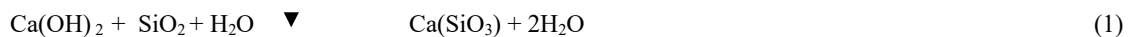
Gambar 1. Kondisi Jalan di Desa Beluk, Bayat, Klaten

Seperti halnya batu kapur, yaitu batuan yang berubah menjadi marmer, marmer sebagian besar tersusun dari kalsium dan magnesium. Meski memiliki kandungan yang sama, struktur kristal marmer berbeda dengan batu kapur biasa. Selain itu, sifat marmer dan batu kapur secara alami berbeda karena perubahan batuan selama beberapa dekade. Oleh karena itu, sifat reaktif marmer dengan tanah liat mungkin berbeda. Tabel 1 menampilkan komposisi komponen kimia serbuk marmer berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Umar et al., 2023).

Tabel 1. Kandungan kimia serbuk marmer

No	Senyawa	Uraian	Persentase (%)
1	CaO	Kalsium Oksida	52,69
2	CaCO ₃	Kalsium Karbonat	41,92
3	MgO	Magnesium Oksida	1,76
4	SiO ₂	Silikon Dioksida	1,62
5	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Aluminium Oksida Besi + III Oksida	0,37

Partikel debu kapur dan marmer memiliki struktur yang sangat mirip. Menurut (Khan et al., 2023), tingginya kandungan kalsium oksida (CaO) pada limbah marmer yang bercampur dengan air akan mengakibatkan terbentuknya kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) dan pelepasan panas. Ca(OH)₂ kemudian membentuk kalsium karbonat (CaCO₃) dengan mengikat karbon dioksida (CO₂). Zat keras dan tidak larut ini dapat meningkatkan struktur mikro dan kualitas mekanik tanah. Dalam proses kimia, reaksi berikut terjadi bila kapur digunakan untuk menstabilkan tanah liat:



Stabilisasi kapur pada tanah liat berpuncak pada Ca(SiO₃). Prosedur ini identik dengan pengerasan semen yang terus-menerus selama beberapa bulan. Mempercepat proses ini pada suhu tinggi dikenal sebagai proses sementasi. Nilai CBR yang dinyatakan dalam satuan persentase membandingkan beban tanah dengan beban standar pada penurunan yang sama. Penurunan 0,1 inci dengan beban standar 1000 psi dan penurunan 0,2 inci dengan beban standar 1500 psi menjadi titik acuan yang digunakan dalam penurunan (Sukawati et al., 2024). Nilai CBR biasanya dipilih pada penetrasi 0,1 inci; Namun, pengujian CBR perlu diulang jika penetrasinya 0,2 inci atau lebih. Namun penetrasi 0,2 inci adalah angka yang dimanfaatkan jika diulang dan hasilnya tetap sama (Waruwu et al., 2024). CBR dipisahkan menjadi tiga kategori menurut cara memperoleh lahan: lapangan, lapangan perendaman, dan laboratorium (Hartono & Santoso, 2021) (Wibowo & Fakhri, 2024). CBR terendam dan CBR tidak terendam merupakan dua kategori CBR laboratorium. Uji penetrasi CBR dilakukan untuk mereplikasi genangan akibat banjir setelah CBR jenuh selama empat hari atau sembilan puluh enam jam. Daya dukung pondasi dalam keadaan terburuk sering kali dinilai dengan menggunakan nilai CBR yang diinginkan ini. Nilai pengembangan (*swelling*) juga akan diperoleh dalam penelitian ini (Mohammed Cherif et al., 2018).

Tujuan dari uji ekspansi adalah untuk mengukur tingkat pembengkakan yang disebabkan oleh gaya vertikal. Hal ini terjadi ketika air merembes ke dalam pori-pori tanah, mengubah komposisinya dan memberikan tekanan vertikal pada tanah. Proses pemuaian tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan yang diberikan pada tanah. Tekanan ini dikenal sebagai tekanan pembengkakan, dan menghentikan perluasan tanah (Lehaf et al., 2025). Ciri-ciri fisik tanah di wilayah Beluk Kecamatan Bayat Klaten sebagai berikut: Kadar air 1,743%, berat jenis 2,611, batas cair 80,21%, batas plastis 36,28%, batas susut 14,72%, indeks plastisitas 43,93% , dan 90,66% lolos filter No. 200. Sistem AASHTO mengklasifikasikannya dalam kelompok A-7-5, yang menunjukkan tanah liat, tetapi sistem klasifikasi tanah USCS menempatkannya dalam kelompok CH, yang merupakan singkatan dari tanah liat anorganik. Hasil uji Proctor Standard diperoleh dengan berat kering 1,25 kg/cm³ dan kadar air optimal 28%. Tanah dengan perendaman CBR menghasilkan 1%, namun tanah asli tanpa perendaman CBR menghasilkan 12%.

Penelitian yang dilakukan oleh (Jassim et al., 2022) menunjukkan bahwa penambahan waste marble powder (WMP) secara signifikan memperbaiki sifat fisis tanah lempung yang digunakan sebagai subgrade. Nilai batas cair dan indeks plastisitas menurun, sedangkan batas plastis meningkat. Hal ini menandakan bahwa tanah menjadi kurang plastis, lebih stabil terhadap air, dan lebih mudah dikerjakan di lapangan. Selain itu, berat isi kering maksimum meningkat dan kadar air optimum menurun, yang menunjukkan bahwa tanah dapat dipadatkan lebih rapat dengan kebutuhan air yang lebih sedikit. Penambahan WMP meningkatkan daya dukung tanah secara nyata. Nilai CBR dan kuat tekan bebas (UCS) meningkat seiring bertambahnya kadar WMP hingga mencapai kadar optimum. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tanah dasar menjadi lebih kuat dan lebih mampu menahan beban lalu lintas. Namun, jika kadar WMP terlalu tinggi, peningkatan kekuatan tidak lagi signifikan dan dapat menurun.

(Indriyanti & Kasmawati, 2018) melakukan analisis karakteristik serbuk marmer, kekuatan tanah sebelum dan sesudah distabilisasi, pengaruh asam akrilat sebagai aktivator, serta perubahan mikrostruktur tanah menggunakan uji SEM dan XRD. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan serbuk marmer 20–30% meningkatkan nilai CBR hingga di atas 6%, sedangkan penambahan asam akrilat pada kadar optimum dan pemeraman 3–7 hari meningkatkan nilai UCS menjadi konsistensi sedang. Kandungan CaO yang sangat tinggi pada serbuk marmer (97,15%) berperan penting dalam proses stabilisasi. Secara keseluruhan, campuran serbuk marmer dan asam akrilat efektif meningkatkan daya dukung tanah lempung sebagai subgrade jalan.

Kajian pemanfaatan limbah serbuk marmer sebagai bahan pengikat alternatif untuk stabilisasi tanah lempung berbutir halus yang memiliki sifat teknik rendah dilakukan oleh (Umar & Lin, 2024). Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi perubahan sifat tanah, meliputi batas Atterberg, pemadatan, CBR, kuat tarik tidak langsung (ITS), dan kuat tekan bebas (UCS), serta menganalisis pengaruh waktu pemeraman, kadar air cetak, dan komposisi campuran terhadap nilai UCS menggunakan metode analisis data eksploratif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk marmer secara signifikan meningkatkan kekuatan tanah. Nilai CBR meningkat dari 10,43% menjadi 22,94% pada kondisi tidak terendam dan dari 4,68% menjadi 12,46% pada kondisi terendam dengan 60% serbuk marmer. Nilai ITS meningkat dari 100 menjadi 208 kN/m² pada kadar 60–75% serbuk marmer, sedangkan UCS meningkat dari 170 menjadi 661 kN/m² setelah pemeraman 28 hari dengan kadar optimum 60% serbuk marmer dan kadar air cetak 22,5%. Hasil pemodelan menunjukkan kecocokan tinggi antara nilai prediksi dan eksperimen ($R^2 = 0,954$). Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa limbah serbuk marmer berpotensi besar sebagai bahan stabilisasi tanah yang berkelanjutan dan ekonomis.

Alternatif pengganti agregat halus dan kasar pada beton perkerasan kaku dengan memanfaatkan limbah serbuk marmer dan batu marmer dicoba oleh (M. Sa'dillah et al., 2025). Penelitian dilakukan secara eksperimen kuantitatif dengan variasi kadar penggantian 0%, 15%, 25%, dan 35% pada pelat beton dan benda uji silinder, serta menguji kuat tekan dan kuat lentur pada umur 7 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur 28 hari, kuat tekan beton paling optimal diperoleh pada penggunaan serbuk marmer 15% dan batu marmer 25%, sedangkan kombinasi serbuk dan batu marmer hanya memenuhi syarat pada variasi 0%. Pada umur 7 hari, seluruh variasi dengan limbah marmer belum memenuhi kuat tekan rencana. Untuk kuat lentur, variasi 25% serbuk marmer, 0% batu marmer, dan 25% kombinasi serbuk dan batu menunjukkan nilai lendutan terbesar saat beban maksimum. Secara umum, limbah marmer berpotensi sebagai material alternatif beton, namun penggunaannya harus pada kadar optimum agar mutu beton tetap memenuhi standar.

Metode Penelitian

Di Desa Beluk, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten, dilakukan survei wilayah untuk memilih lokasi ideal pengambilan sampel tanah. Sampel tanah diambil pada kedalaman 40 cm dalam kondisi terganggu. Serbuk marmer ini berasal dari Desa Besuki Jawa Timur yang terletak di Kecamatan Campurdarat Kabupaten Tulungagung. Pada kondisi kering udara, tanah liat yang dimanfaatkan melewati saringan nomor 4, sedangkan limbah serbuk marmer lolos saringan nomor 200. Dua, lima, tujuh, dan sepuluh persen limbah bubuk marmer yang dimanfaatkan. Baik tanah asli maupun tanah gabungan menjalani pengujian mekanis dan fisik. Sifat fisik tanah yang diperiksa meliputi ukuran partikel, berat jenis, kadar air, dan batas Atterberg. Uji mekanis, termasuk California Bearing Ratio (CBR) dan pengujian kepadatan (Standard Proctor) dapat dilakukan. Analisis ukuran butir (SNI 3423:2008), Standar kepadatan Proctor (SNI 1742:2008), CBR (SNI 1744:2012), Kadar air (SNI 1965:2008), Berat jenis (SNI 1964:2008), Batas Atterberg (cairan batas, plastis, batas susut, indeks plastisitas), dan instrumen lainnya digunakan untuk pengujian.

Ada tiga fase berbeda dalam proses penelitian, **Tahap 1** yaitu pengambilan sampel tanah dilakukan di Desa Beluk, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten, dan pada tahap pertama telah disiapkan peralatan dan perlengkapan penelitian. Langkah selanjutnya adalah menyiapkan semuanya untuk dikeringkan, setelah itu disaring menggunakan filter no 4. Selain itu, dilakukan langkah-langkah untuk menyiapkan semuanya, seperti melewati bubuk limbah marmer melalui filter ukuran 200. **Tahap 2** adalah memeriksa kualitas fisik tanah liat setelah dikeringkan di luar. Hal ini termasuk menentukan klasifikasi tanah, kadar air, kepadatan curah, berat jenis, batas Atterberg, dan analisis ukuran partikel. Untuk penggunaan sebagai penstabil limbah bubuk marmer, hanya sifat fisik bubuk tersebut seperti berat jenis dan kandungan air yang dinilai. Selanjutnya digunakan alat pemadatan Standard Proctor untuk memadatkan kombinasi serbuk limbah tanah liat dan marmer dengan beberapa persentase limbah marmer (2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%) sehingga diperoleh kadar air yang optimal. Sebelum dievaluasi California Bearing Ratio (CBR), contoh tanah direndam selama empat hari atau sembilan puluh enam jam setelah persiapan. Pengujian CBR (California Bearing Ratio) langsung dilakukan pada beberapa sampel tanpa perendaman. **Tahap 3** adalah analisis data untuk membuat kesimpulan dan saran jika diperlukan pada penelitian yang telah dilakukan

Hasil dan Pembahasan

Sifat Fisis Tanah

Pengujian dilakukan terhadap sifat fisik tanah asli, tanah campuran, dan serbuk marmer. Pengujian sifat fisik digunakan untuk mengukur berat jenis bubuk marmer dan kadar air. Baik tanah asli maupun gabungan diuji sifat fisiknya, termasuk batas Atterberg, berat jenis, kadar air, dan analisis ukuran butir, seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Sifat Fisis Tanah Asli

No	Pengujian	Nilai
1	Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)	2,624
2	Kadar Air (%)	9,34
3	Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>) (%)	68,95
4	Batas Plastis (<i>Plastic Limit</i>) (%)	30,27
5	Batas Susut (<i>Shrinkage Limit</i>) (%)	12,93
6	Indeks Plastisitas (<i>Plasticity Index</i>) (%)	38,69
7	Lolos saringan No 200 (%)	65,10
8	Klasifikasi AASHTO	A-7-5
9	Klasifikasi USCS	CH

Tanah di Desa Beluk Kecamatan Bayat Kabupaten Klaten mempunyai nilai indeks plastisitas (PI) yang tinggi yaitu >17 yang menunjukkan bahwa tanah tersebut merupakan tanah liat. Tanah tersebut termasuk dalam standar A-7-5 untuk bahan jenis tanah liat dalam klasifikasi AASHTO dengan deskripsi sedang hingga buruk untuk tanah dasar. Tanah memenuhi kriteria mutu CH (*fat clay*) dengan plastisitas tinggi sesuai kriteria USCS.

Tabel 3 menunjukkan bahwa terdapat beberapa pengujian yang identik dengan pengujian tanah asli yang merupakan uji sifat fisis tanah campuran dan tanah asli.

Tabel 3. Hasil Uji Sifat Fisis Tanah Asli Dan Campuran

No	Pengujian	Nilai				
		0%	2,5%	5%	7,5%	10%
1	Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)	2,684	2,652	2,627	2,608	2,592
2	Kadar Air (%)	9,34	7,50	6,98	6,80	6,53
3	Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>) (%)	68,95	68,49	67,40	62,66	60,48
4	Batas Plastis (<i>Plastic Limit</i>) (%)	30,27	32,73	39,44	43,33	47,41
5	Batas Susut (<i>Shrinkage Limit</i>) (%)	12,93	15,70	17,19	20,43	21,03
6	Indeks Plastisitas (<i>Plasticity Index</i>) (%)	38,69	35,77	27,96	22,36	15,26
7	Lolos saringan No 200 (%)	65,10	63,03	61,50	60,22	59,10
8	LLR	-	-	0,93	0,95	0,97
9	Klasifikasi AASHTO	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5
10	Klasifikasi USCS	CH	CH	MH	MH	MH

Setelah serbuk marmer bekas dimasukkan ke dalam campuran, kadar air turun dari 9,34% pada sampel tanah awal. Nilai kadar air turun karena butiran serbuk marmer yang terbuang banyak menyerap air. Nilai kadar air semakin menurun seiring bertambahnya proporsi kombinasi limbah serbuk marmer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah asli mempunyai kadar air maksimum sebesar 9,34% dan kadar air terendah sebesar 6,53% pada kombinasi limbah serbuk marmer 10%. Pembacaan berat jenis (Gs) tanah awal adalah 2,684, tetapi setelah penambahan bubuk marmer limbah dalam jumlah yang bervariasi yaitu 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%, pembacaannya turun. Dengan berat jenis sebesar 2,592, campuran yang mengandung 10% limbah serbuk marmer mempunyai nilai paling rendah. Akibat penggabungan dua bahan yang berat jenisnya berbeda tanah asli mempunyai berat jenis 2,684 dan serbuk marmer mempunyai berat jenis 2,624 maka nilai berat jenis turun. Hal ini disebabkan karena kedua bahan tersebut mempunyai massa jenis yang berbeda. Nilai Gs tanah gabungan akan turun seiring dengan bertambahnya proporsi campuran limbah serbuk marmer.

Dengan adanya penambahan serbuk limbah marmer sebanyak 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% pada tanah, nilai indeks plastisitas (PI) turun dari 38,69% menjadi 38,59%. Nilai PI terbesar yaitu 15,26% diperoleh pada limbah serbuk marmer 10%. Nilai batas cair (LL) dan batas plastis (PL) perlu diketahui untuk menghitung indeks plastisitas. Dengan bertambahnya jumlah limbah serbuk marmer maka nilai PI yang setara dengan LL dikurangi PL akan turun karena nilai (LL) turun dan nilai (PL) naik. Dapat disimpulkan bahwa potensi pengembangan dari lahan asli ke lahan campuran mengalami penurunan yaitu dari kategori sangat tinggi menjadi sedang berdasarkan data nilai PI.

Hasil uji gradasi menunjukkan bahwa persentase komposisi yang melewati filter berbeda-beda sesuai dengan pencampuran limbah bubuk marmer. Tanah asli yang lolos saringan No.4 memiliki 65,1% butirannya lolos saringan No.200, menurut uji analisis butiran. Namun bila persentasenya dicampur dengan limbah serbuk marmer 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% persentasenya menurun. dengan 63,03%, 61,5%, 60,22%, dan 59,1% masing-masing lolos filter No.200. Prosedur sementasi menyebabkan pengurangan ini. Proses sementasi mengakibatkan terbentuknya butir-butir tanah baru dengan ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan tanah lama. Akibatnya, lebih sedikit sampel yang lolos melalui filter No. 200. Dengan meningkatnya proporsi kombinasi limbah bubuk marmer, maka proporsi nilai yang lolos saringan No. 200 menurun. Data menunjukkan bahwa tanah gabungan masih tergolong tanah liat karena lolos filter No. 200 dengan nilai persentase lebih besar dari 35%. Menurut uji klasifikasi AASHTO, tanah yang mengandung 0% hingga 10% limbah bubuk marmer termasuk dalam kelompok A-7-5, atau tanah liat, bila digunakan sebagai tanah dasar jalan. Kualitas bawah permukaan tanah ini termasuk dalam kategori sedang hingga buruk. Secara khusus, sampel dimasukkan ke dalam kelompok A-7-5 karena lebih dari 36% diantaranya lolos filter 200, lebih dari 41% memiliki skor LL, lebih dari 17% memiliki skor PI, dan lebih dari 30% memiliki skor PL. Tanah campuran dibagi menjadi dua kategori menurut USCS: MH (tanah lanau anorganik dengan plastisitas tinggi) dan CH (tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi). Tanah CH didefinisikan mempunyai nilai LL lebih dari 50% dan persentase limbah serbuk marmer 0% atau 2,5%. Tanah dikategorikan MH jika nilai LLR-nya lebih dari 0,75.

Sifat Mekanis Tanah Asli dan Campuran

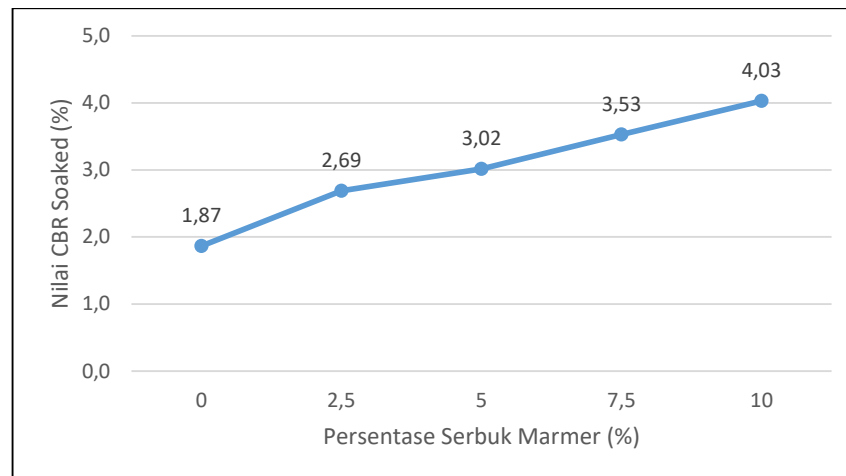
Tabel 4 menunjukkan bagaimana tanah lempung dan serbuk limbah marmer dapat menaikkan berat volume kering maksimum. Penambahan campuran serbuk limbah mineral menimbulkan berat volume kering maksimum tanah asal, yaitu sebesar 1,39 gr/cm³. Peningkatan berat volume kering terbesar, yaitu 1,63 gr/cm³, terjadi bila 10% sampah dipadukan dengan bubuk marmer. Proses sementasi menyebabkan butiran tanah membesar bila bercampur dengan limbah serbuk marmer sehingga meningkatkan berat volume kering maksimum. Ukuran partikel tanah merupakan indikator yang baik untuk volume kering maksimal. Tanah akan semakin padat dan berat volume keringnya akan bertambah apabila butiran-butiran limbah serbuk marmer ditambahkan pada rongga-rongga tanah yang sebelumnya

terisi air. Nilai kadar air tanah awal yang ideal adalah 24,17%; Namun nilai ini berkurang karena adanya penambahan limbah bubuk marmer ke dalam kombinasi tersebut. Kombinasi limbah bubuk marmer 10% mempunyai nilai kadar air optimal terendah sebesar 21,79%. Karena lubang-lubang tanah kini sudah terisi butiran limbah bubuk marmer, maka nilai kadar air idealnya menurun.

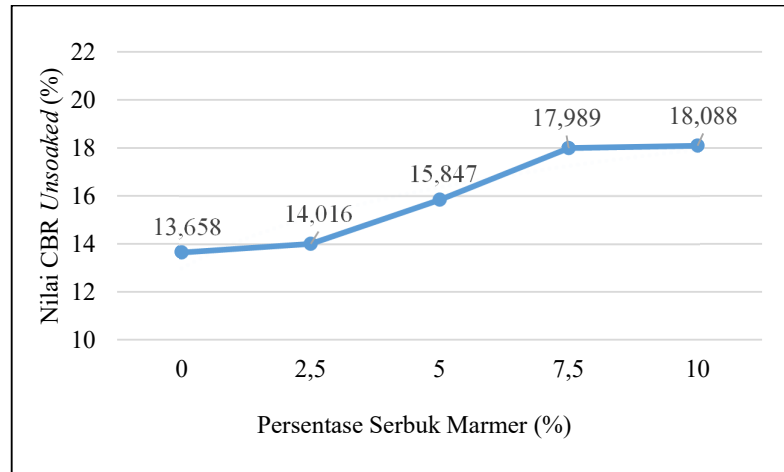
Tabel 4. Hasil Uji Kepadatan Tanah Asli Dan Campuran

Persentase Tanah	w opt (%)	γ_d maks (gr/cm ³)
Tanah Asli	24,17	1,39
Tanah Asli + 2,5% Serbuk Marmer	23,86	1,57
Tanah Asli + 5% Serbuk Marmer	22,69	1,60
Tanah Asli + 7,5% Serbuk Marmer	22,54	1,62
Tanah Asli + 10% Serbuk Marmer	21,79	1,63

Karakteristik sementasi menjadi faktor penyebab peningkatan nilai CBR, seperti terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Kepadatan tanah meningkat selama sementasi karena dihasilkan butiran tanah baru dengan ukuran butir lebih tinggi. Perendaman menyebabkan nilai CBR turun di bawah nilai CBR saat tidak direndam. Setelah empat hari perendaman, CBR menjadi jenuh penuh dengan air, sehingga mempersiapkan tanah untuk skenario terburuk seperti hujan atau tanah yang sangat kering di lapangan. Proses ini menambahkan air ke tanah yang sudah mengalami dehidrasi, menyebabkan tanah membengkak dan kehilangan sebagian kekuatan daya dukungnya. Peningkatan nilai CBR berpengaruh terhadap ketebalan perkerasan jalan; perkerasan jalan yang lebih tipis dicapai bila tanah dasar jalan mempunyai daya dukung yang lebih baik dan dapat menahan gaya beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan.



Gambar 2. Nilai CBR Soaked Tanah Lempung dengan Serbuk Marmer



Gambar 3. Nilai CBR Unsoaked Tanah Lempung dengan Serbuk Marmer

Persentase tertinggi, 18,088%, ditemukan pada tanah campuran, menurut temuan uji CBR *Unsoaked*. Penelitian yang dilakukan oleh Hangge et al., 2021 menyatakan bahwa parameter material tanah dasar masuk dalam kategori sangat baik hingga sedang/kondisi baik, sesuai dengan *Turnbull* (1968) dan *The Asphalt Institute* (1970). Sedangkan kombinasi tanah dengan 10% serbuk marmer menghasilkan nilai tertinggi sebesar 4,021 menurut hasil uji CBR *Soaked*. Berdasarkan temuan ini, jelas bahwa menstabilkan tanah dengan 10% marmer tidak memberikan dasar jalan yang memadai. Sebab, menurut Bina Marga, tanah yang baik mempunyai nilai CBR lebih dari 6%.. Tabel 5 menunjukkan temuan uji *swelling*.

Tabel 5. Hasil Pengujian *Swelling*

Jenis Sampel	Nilai <i>Swelling</i> (%)
Tanah Asli	3,410
Tanah Asli + 2,5% Serbuk Marmer	3,212
Tanah Asli + 5% Serbuk Marmer	2,851
Tanah Asli + 7,5% Serbuk Marmer	2,826
Tanah Asli + 10% Serbuk Marmer	2,705

Tabel 5 menunjukkan bahwa semakin ditambahkan limbah serbuk marmer maka nilai pengembangannya semakin menurun. Karena semakin tebal dan nilai pengembangannya menurun seiring dengan naiknya nilai CBR, hal ini terjadi. Tanah yang mengandung 10% limbah serbuk marmer dan maksimal 10% tanah asli tergolong kelas menengah menurut klasifikasi potensi pengembangan, dengan nilai pengembangan berkisar antara 1,5% hingga 5%. Penurunan *swelling* terjadi karena ion Ca^{2+} menyebabkan partikel lempung yang semula tersusun menyebar (*dispersed*) berubah menjadi struktur menggumpal (*flocculated*). Struktur ini mengurangi luas permukaan aktif lempung dan menghambat masuknya air ke dalam struktur mineral lempung, sehingga potensi kembang tanah menurun (SAYGILI, 2015)

Kesimpulan

Temuan penelitian menunjukkan bahwa meskipun nilai batas plastis dan batas susut cenderung meningkat, nilai berat jenis, kadar air, batas cair, dan % lolos filter No. 200 cenderung turun. Tanah lempung yang tidak sesuai untuk digunakan sebagai lapisan pondasi perkerasan jalan atau bangunan, secara eksplisit disebut sebagai kelompok A-7-5 dalam sistem klasifikasi AASHTO untuk tanah campuran. Namun berdasarkan jumlah lempung yang ada, USCS membagi tanah campuran menjadi dua kategori: CH (tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi) dan MH (tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi). Kelompok CH mencakup tanah dengan kandungan liat 0% dan 2,5%, sedangkan kelompok MH mencakup tanah dengan kandungan liat 5%, 7,5%, dan 10%. tinggi. Tanah

lempung yang distabilisasi limbah serbuk marmer 10% mempunyai kadar air optimum paling rendah dan berat volume kering maksimum paling besar. Baik tanah asli maupun tanah campuran mempunyai nilai CBR basah dan tidak terendam yang lebih tinggi seiring dengan meningkatnya persentase campuran limbah serbuk marmer. Baik basah kuyup maupun tidak direndam, tanah dengan kandungan limbah serbuk marmer 10% mempunyai nilai CBR paling besar.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Lembaga Riset dan Inovasi serta Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta atas pendanaan penelitian melalui skema PID (Pengembangan Individual Dosen) tahun 2024

Daftar Pustaka

- Hartono, E., & Santoso, G. P. (2021). Analisis CBR Tanah Clayshale Akibat Distabilisasi Semen. *Bulletin of Civil Engineering*, 1(2), 49–54. <https://doi.org/10.18196/bce.v1i2.12415>
- Indriyanti, I., & Kasmawati, K. (2018). Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. *TEKNIK HIDRO*, 11(2), 14–25. <https://doi.org/10.26618/th.v11i2.2443>
- Jassim, N. W., Hassan, H. A., Mohammed, H. A., & Fattah, M. Y. (2022). Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*, 14, 100436. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100436>
- Khan, M. A., Ayub Khan, S., Khan, B., Shahzada, K., Althoey, F., & Deifalla, A. F. (2023). Investigating the feasibility of producing sustainable and compatible binder using marble waste, fly ash, and rice husk ash: A comprehensive research for material characteristics and production. *Results in Engineering*, 20, 101435. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101435>
- Lehaf, Z., Morvan, M., & Breul, P. (2025). Effect of Clay Content on Suction and Swelling Behavior in Unsaturated Soils: Insights from Water Retention and Oedometer Testing. *E3S Web of Conferences*, 642, 03017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202564203017>
- M. Sa'dillah, Arifianto, A. K., Oktaviastuti, B., & Jemadun, R. O. (2025). INVESTIGASI PEMANFAATAN LIMBAH BATU DAN SERBUK MARMER SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT PADA PERKERASAN KAKU. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 847–862. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i3.33671>
- Mohammed Cherif, M., Amal, M., & Ramdane, B. (2018). Effect of swelling mineral on geotechnical characteristics of clay soil. *MATEC Web of Conferences*, 149, 02067. <https://doi.org/10.1051/matecon/201814902067>
- SAYGILI, A. (2015). Use of Waste Marble Dust for Stabilization of Clayey Soil. *Materials Science*, 21(4). <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.4.11966>
- Sukawati, N. K. S. A., Juniastra, I. M., Wibawa, I. M. S., Sunatha, I. G. N., & Nada, I. M. (2024). Stabilization of Krobokan Clay Soil with California Bearing Ratio (CBR) for Highway Pavement. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(7), 4301–4312. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i7.7983>
- Umar, I. H., & Lin, H. (2024). Marble Powder as a Soil Stabilizer: An Experimental Investigation of the Geotechnical Properties and Unconfined Compressive Strength Analysis. *Materials*, 17(5), 1208. <https://doi.org/10.3390/ma17051208>
- Umar, I. H., Lin, H., & Ibrahim, A. S. (2023). Laboratory Testing and Analysis of Clay Soil Stabilization Using Waste Marble Powder. *Applied Sciences*, 13(16), 9274. <https://doi.org/10.3390/app13169274>
- Waruwu, A., Pangemanan, I., Yunita, Y., Calvin, F., Lujaya, J., & Wijaya, N. (2024). CBR (California Bearing Ratio) Test on Clay Soil Stabilized with Marble Ash and Biogrouting. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 30(1), 47–55. <https://doi.org/10.14710/mkts.v30i1.58304>

Wibowo, A. H., & Fakhri, K. (2024). Soil Classification and Correlation of Laboratory CBR Values with CBR Value from Subgrade DCP Test on Reconstruction Project of Mirit – Tambakmulyo Road Section, Kebumen, Central Java. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 26(2), 10–18. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v26i2.2590>