
Evaluasi Kinerja Subgrade Dengan Stabilisasi Limbah Industri Marmer Terhadap Lama Waktu Perendaman

¹Humairah Annisa, ²Ilham Yunus, ³Zulfadli Ibrahim, ⁴Aisyah Madiana Ali

^{1,2} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lamappapoleonro

³ Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Makassar

⁴ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia

^{1,2} Jl. Kesatria No 60, Soppeng, Sulawesi Selatan-Indonesia

³ Jl. Daeng Tata Raya Parang Tambung, Makassar, Sulawesi Selatan

³ Jl. Urip Sumoharjo km. 5, Makassar, Sulawesi Selatan

e-mail : ¹humairah@unipol.ac.id, ²ilham.yunus@unipol.ac.id ,

³zulfadli.ibrahim@unm.ac.id, ³aisyah.madiana@umi.ac.id

JTEKSIL

Abstrak

Kata Kunci :

Subgrade, limbah marmer, kepadatan, CBR

Subgrade berperan penting dalam menunjang stabilitas jalan. Namun, subgrade seringkali memiliki daya dukung rendah dan tidak memenuhi standar minimal subgrade. Stabilisasi menggunakan limbah marmer merupakan salah satu cara, terbukti meningkatkan daya dukung, kekuatan, dan stabilitas tanah. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh lama waktu perendaman pada subgrade yang distabilisasi marmer untuk meningkatkan kualitas subgrade dan pengelolaan limbah berkelanjutan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh lama waktu perendaman terhadap perubahan nilai CBR dan kepadatan pada subgrade yang telah disubstitusi limbah marmer. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental menggunakan alat CBR dan Standar Proctor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimum substitusi limbah marmer 15% (LM15%) mampu meningkatkan nilai CBR sebesar 8,922% dan kepadatan sebesar 21,535%, serta tanpa perendaman (0 hari) menunjukkan CBR dan kepadatan tertinggi dibanding direndam 7, 14, dan 21 hari atau semakin lama waktu perendaman menyebabkan penurunan nilai CBR dan kepadatan tanah subgrade meskipun telah distabilisasi limbah marmer.

Abstract

Keywords:

Subgrade, marble waste, density, CBR

The subgrade plays a crucial role in supporting road stability. However, it often has low bearing capacity and does not meet the minimum subgrade standards. Stabilization using marble waste is one method that has proven effective in improving the bearing capacity, strength, and stability of soil. This study evaluates the effect of soaking duration on subgrades stabilized with marble waste to enhance subgrade quality and promote sustainable waste management. The aim of this research is to analyze the impact of soaking duration on changes in CBR (California Bearing Ratio) values and density in subgrades substituted with marble waste. The method used is an experimental approach employing CBR and Standard Proctor tests. The results indicate that the optimum substitution rate of marble waste, 15% (MW15%), increases the CBR value by 8.922% and density by 21.535%. Additionally, without soaking (0 days), the highest CBR and density values were observed compared to soaking durations of 7, 14, and 21 days. Prolonged soaking durations resulted in a decrease in CBR values and subgrade density, even when stabilized with marble waste.

PENDAHULUAN

Subgrade merupakan lapisan tanah dasar yang memiliki peran penting sebagai lapisan dasar dalam konstruksi jalan. Kinerja subgrade sangat memengaruhi daya dukung dan stabilitas struktur jalan di atasnya. Namun, kualitas subgrade seringkali menjadi permasalahan dalam pembangunan infrastruktur, terutama ketika material tanah yang tersedia memiliki sifat mekanik yang lemah, seperti daya dukung rendah, potensi ekspansi (mengembang), atau sensitivitas terhadap air tinggi. Subgrade yang tidak memadai dapat menyebabkan penurunan jalan, retakan, deformasi permanen, bahkan kegagalan struktur jalan secara keseluruhan.

Tanah lempung lunak merupakan contoh jenis tanah yang memiliki sifat mekanik yang rendah sebagai subgrade. Tanah ini sering kali memiliki nilai California Bearing Ratio (CBR) yang rendah, yang menunjukkan bahwa tanah tersebut tidak mampu mendukung beban yang diterapkan secara efektif (Waruwu et al., 2022). Selain itu, kualitas tanah subgrade juga sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kadar air. Kadar air yang berlebihan dapat menyebabkan perubahan sifat fisik tanah, seperti pengembangan (*swelling*) dan penurunan (*settlement*), yang berdampak pada stabilitas perkerasan jalan (Saputra et al., 2022). Untuk meningkatkan daya dukung tanah subgrade, salah satu cara bisa dilakukan seperti stabilisasi, terutama jika menggunakan tanah yang mengalami degradasi akibat perendaman (Badaron & Maricar, 2024).

Berbagai metode stabilisasi telah digunakan untuk memperbaiki subgrade, seperti penambahan bahan kimia, semen, atau kapur. Namun, metode tersebut seringkali memerlukan biaya tinggi dan tidak ramah lingkungan (Dhatrak & Kolhe, 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian mulai beralih pada penggunaan limbah industri, seperti bubuk marmer, sebagai alternatif bahan stabilisasi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan. Bubuk marmer, yang merupakan limbah dari industri pengolahan batu marmer, mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat bertindak sebagai agen pengikat dan filler untuk memperbaiki sifat mekanik tanah (Borlon & Bhoi, 2023).

Stabilisasi tanah dengan limbah marmer dapat meningkatkan sifat mekanik tanah, terutama dalam hal daya dukung dan stabilitas. Penggunaan limbah marmer sebagai bahan tambahan dalam campuran tanah dapat meningkatkan kekuatan tekan dan daya dukung subgrade (Utama et al., 2020). Selain itu, limbah marmer juga berfungsi sebagai agen pengikat yang dapat memperbaiki struktur tanah, sehingga mengurangi deformasi dan meningkatkan ketahanan terhadap beban (Utama et al., 2020). Penggunaan serbuk marmer hasil limbah industri sebagai bahan stabilisasi menunjukkan hasil positif dalam meningkatkan daya dukung tanah lempung. Penambahan larutan asam akrilat juga berkontribusi pada peningkatan kekuatan tanah, menjadikannya pilihan yang layak untuk perbaikan tanah dalam proyek konstruksi (Indriyanti & Kasmawati, 2018). Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan bubuk marmer dalam stabilisasi subgrade dapat meningkatkan kekuatan tekan, daya dukung, dan stabilitas dimensi (Amakye et al., 2021).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah banyak menggunakan limbah marmer sebagai bahan stabilisasi tanah subgrade atau tanah lempung. Siregar & Andajani, (2017) menambahkan limbah marmer pada tanah lempung ekspansif di daerah Driyorejo untuk menurunkan nilai potensial *swelling*. Setyono & Sunarto (2018) menambahkan serbuk marmer pada tanah lempung sehingga nilai CBR meningkat signifikan dan nilai UCT (kuat tekan bebas) meningkat.

Annisa et al. (2024), menjelaskan bahwa penggunaan serbuk marmer sebagai bahan tambah dapat meningkatkan kepadatan dan mengurangi potensi pengembangan tanah lempung. Pengujian laboratorium menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer dapat meningkatkan kepadatan tanah antara 6,258% hingga 12,044% dan pengembangan berkurang sebesar 12,883% - 21,739%.

Di sisi lain, penelitian yang ada belum secara spesifik menjelaskan pengaruh lama waktu perendaman pada tanah subgrade yang telah distabilisasi limbah marmer. Lama waktu perendaman juga diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja subgrade yang distabilisasi, seperti pada penggunaan kapur pada tanah subgrade (Soehardi & Putri, 2024). Proses ini memengaruhi distribusi kelembapan dan interaksi antara bubuk marmer dengan tanah. Dengan pemilihan waktu perendaman yang tepat, stabilisasi dapat menghasilkan subgrade yang lebih tahan lama terhadap perubahan kondisi lingkungan.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar (*subgrade*) merupakan lapisan tanah yang berada di bagian paling bawah struktur perkerasan jalan. Kekuatan dan stabilitas tanah dasar sangat menentukan kinerja perkerasan jalan, baik dari segi daya dukung maupun keawetannya. (Das & Sobhan, 2014). Tanah dasar berperan sebagai pondasi yang mendukung seluruh beban yang diterima oleh lapisan perkerasan. Oleh karena itu, tanah dasar harus memiliki daya dukung yang memadai, tidak mengalami deformasi berlebihan, dan tahan terhadap pengaruh cuaca. Perkerasan yang dibangun di atas tanah dasar yang lemah dapat mengalami kerusakan dini seperti retak, gelombang, dan amblas (Yoder & Witczak, 1991).

Kinerja tanah dasar sangat menentukan kekuatan dan keawetan perkerasan jalan, sehingga karakteristik tanah dasar perlu diperhatikan dengan cermat. Beberapa karakteristik penting tanah dasar meliputi daya dukung tanah yang diukur menggunakan *California Bearing Ratio* (CBR). CBR adalah perbandingan antara beban yang mampu dipikul oleh subgrade dengan beban standar dalam penetrasi. Nilai CBR setiap lapis tanah berbeda-beda tergantung pada karakteristik tanah dan kadar air. Berdasarkan Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2, tanah dasar (*subgrade*) tidak memerlukan perbaikan apabila CBR minimal 6% (Dirjen Bina Marga, 2018). Menurut Bowles (1992), karakteristik CBR (*California Bearing Ratio*) untuk konstruksi jalan:

1. Nilai CBR tanah dasar yang baik untuk konstruksi jalan adalah 20%–30%.
2. Nilai CBR tanah dasar yang buruk adalah 0%–3%, sedang adalah 7%–20%, baik adalah 20%–50%, dan sangat baik adalah lebih dari 50%

Dalam praktiknya, tanah dasar sering menghadapi berbagai masalah seperti tanah ekspansif yang mengalami perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, tanah lunak dengan daya dukung rendah, serta kadar air berlebih yang menyebabkan penurunan daya dukung. Untuk mengatasi masalah tersebut, berbagai metode perbaikan tanah dasar telah dikembangkan, seperti stabilisasi mekanis melalui pemadatan, stabilisasi kimia dengan penambahan bahan seperti semen atau kapur, serta penggunaan geosintetik untuk meningkatkan stabilitas dan mengurangi deformasi.

Limbah Marmer

Marmer, atau yang dikenal juga sebagai batu pualam, terbentuk melalui proses metamorfosis dari batu gamping yang kaya akan kandungan karbonat. Proses ini terjadi akibat pengaruh suhu tinggi dan tekanan yang dihasilkan oleh gaya endogen, yang menyebabkan rekristalisasi pada batu tersebut sehingga terbentuk struktur foliasi atau non-foliasi.

Limbah marmer dihasilkan dari proses pengolahan marmer mentah menjadi produk jadi seperti ubin. Tahapan meliputi pemotongan blok marmer (block cutting), perataan (cross cutting), kalibrasi ukuran, hingga pemolesan akhir. Jika ada lubang, permukaan ditambal lalu dipoles hingga mengkilap sebelum dipotong sesuai ukuran. Proses ini menghasilkan limbah potongan marmer dan cairan, dengan penggunaan air hingga 1000 liter per menit yang disirkulasikan ulang. Limbah cair diproses di kolam pengendapan untuk memisahkan air dari partikel marmer (Ferriyall, 2005).

Pengolahan marmer kini menggunakan teknologi bubut batu besar. Studi PT. Sucofindo Jakarta menunjukkan limbah marmer mengandung 52,69% CaO, 41,92% CaCO₃, dan senyawa lain dalam kadar kecil (Harianto & Ahmad Masri, 2016). Analisis mengungkapkan bahwa limbah marmer didominasi oleh zat kapur, dengan kadar CaO mendekati kandungan pada semen (52,69% vs. 60%-70%).

Tabel 1. Unsur Kimia Limbah Marmer (Harianto & Ahmad Masri, 2016)

Unsur Kimia	Kandungan (%)
CaO	52,69
CaCO ₃	41,92
MgO	0,84
MgCO ₃	1,76
SiO ₂	1,62
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,37

Jamal et al (2021) menemukan bahwa serbuk limbah marmer dari industri penambangan di Kabupaten Maros mengandung 53,56% Kalsium Oksida (CaO) dan 0,68% Silika Dioksida (SiO₂), sejalan dengan karakteristik limbah marmer secara umum, termasuk temuan dari PT. Sucofindo.

METODE PENELITIAN

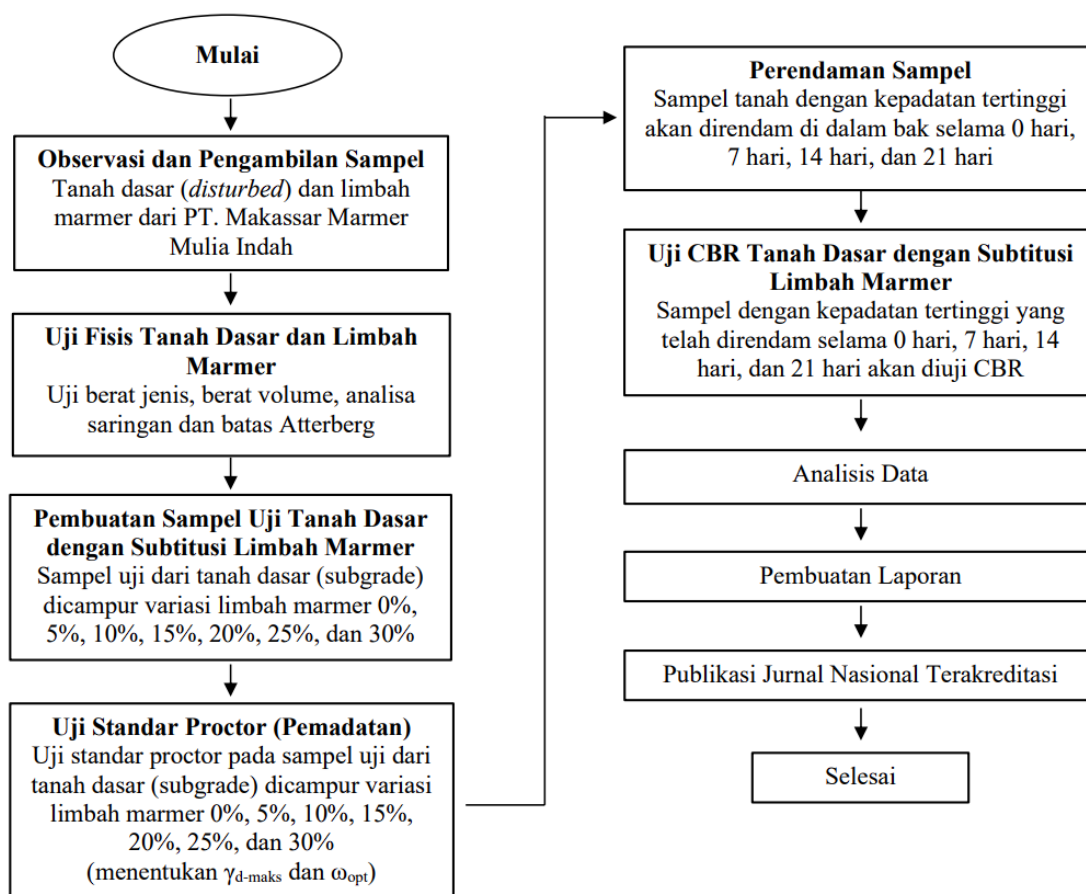
Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif (*quantitative research*) dengan metode eksperimental, dimana pengambilan data dilakukan dari hasil pengujian laboratorium. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Muslim Indonesia. Penelitian ini berfokus menganalisis kinerja tanah dasar (subgrade), yaitu daya dukung tanah dasar yang dinyatakan dalam nilai CBR. Tanah subgrade yang diuji berasal dari Proyek Rekonstruksi Jalan Kotu-Mebali pada STA 0+500 yang memiliki nilai CBR <6%, lalu distabilisasi dengan limbah marmer dari Kab. Maros oleh PT. Makassar Marmer Mulia Indah.

Beberapa penelitian terkait penggunaan marmer telah dibandingkan. Harianto dan Masri (2016) telah meneliti penggunaan limbah marmer dengan variasi 5% - 30% interval 5%, Indriyanti dan Kasmawati (2018) menggunakan serbuk marmer dengan variasi 0% - 30% dengan interval 5%, Nursamiah et al (2022) menggunakan limbah marmer dengan variasi 0% - 20% dengan interval 5%, dan Annisa et al (2024) menggunakan limbah marmer dengan variasi 0% - 50% dengan interval 10%. Semua penelitian terkait penggunaan marmer atau limbah marmer

belum memperhitungkan pengaruh lama waktu perendaman. Sehingga berdasarkan beberapa penelitian terkait, maka peneliti menggunakan variasi limbah marmer 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30% dan lama waktu perendaman 0 hari, 7 hari, 14 hari, dan 21 hari.

Tahapan Penelitian

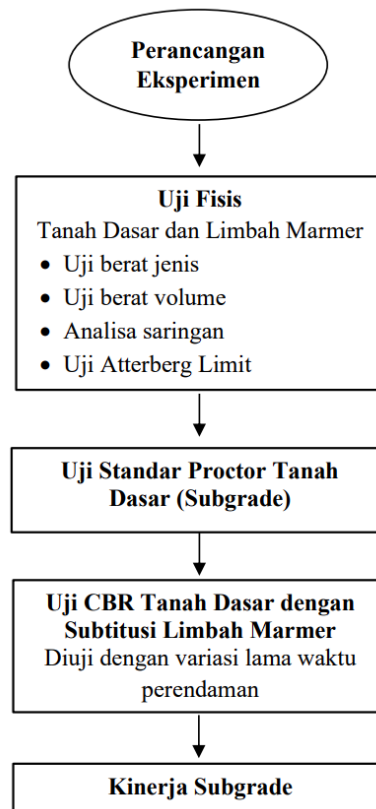
Penelitian ini diawali dengan melakukan survey lapangan dan pengambilan sampel tanah dasar di Proyek Rekonstruksi Jalan Kotu-Mebali, Kab. Enrekang pada STA 0+500 yang memiliki nilai CBR <6%. Sampel tanah kemudian diuji melalui pengujian fisis dan mekanis. Penelitian ini utamanya berfokus pada perubahan daya dukung tanah dasar yang dinyatakan dalam nilai CBR (%) subgrade yang distabilisasi dengan limbah marmer dari PT. Makassar Marmer Mulia Indah dengan variasi lama waktu perendaman. Berikut tahapan penelitian digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

Metode Perancangan Eksperimen

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja subgrade yang distabilisasi dengan limbah industri marmer, khususnya dalam kondisi lama waktu perendaman tertentu. Parameter utama yang akan diuji adalah daya dukung tanah (CBR) dan kepadatan tanah setelah stabilisasi. Berikut detail perancangan pengujian tanah subgrade yang distabilisasi limbah marmer terhadap lama waktu perendaman.



Gambar 2. Diagram Perancangan Eksperimen

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Fisis Tanah Dasar (*Subgrade*)

Pengujian fisis terdiri dari uji berat jenis, berat volume, analisa saringan, dan batas-batas Atterberg (*Atterberg Limit*). Berikut pada Tabel 2 hasil pemeriksaan sampel tanah dasar.

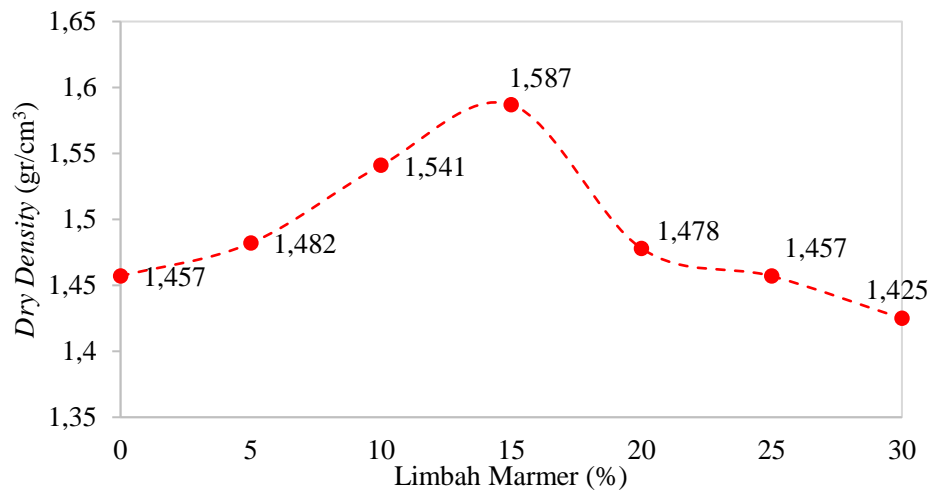
Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Fisis dan Mekanis Tanah *Subgrade*

Jenis Uji	Hasil Uji	Ket.
Berat Jenis (<i>Spesific Gravity</i>)	2,146	-
Berat Volume (<i>Unit Weight</i>)	1,651	gr/cm ³
<i>Grain Size Analysis</i>	4	%
	200	
<i>Atterberg Limit</i>	LL	53,40
	PL	16,93
	PI	36,47

Berdasarkan hasil uji yang disajikan pada Tabel 2, berat jenis (*specific gravity*) tanah subgrade sebesar 2,146, berat volume (*unit weight*) sebesar 1,651 gr/cm³ mengindikasikan bahwa tanah memiliki porositas sedang hingga tinggi, yang umum ditemukan pada tanah lempung. Selanjutnya, hasil uji *Atterberg Limit* menunjukkan bahwa tanah memiliki nilai *Liquid Limit* (LL) sebesar 53,40%, yang berarti tanah mulai menunjukkan sifat cair pada kadar air ini. *Plastic Limit* (PL) tercatat sebesar 16,93%, *Plasticity Index* (PI) sebesar 36,47%, yang menunjukkan bahwa tanah memiliki plastisitas sangat tinggi. Nilai-nilai ini mengindikasikan bahwa tanah tersebut merupakan tanah lempung ekspansif.

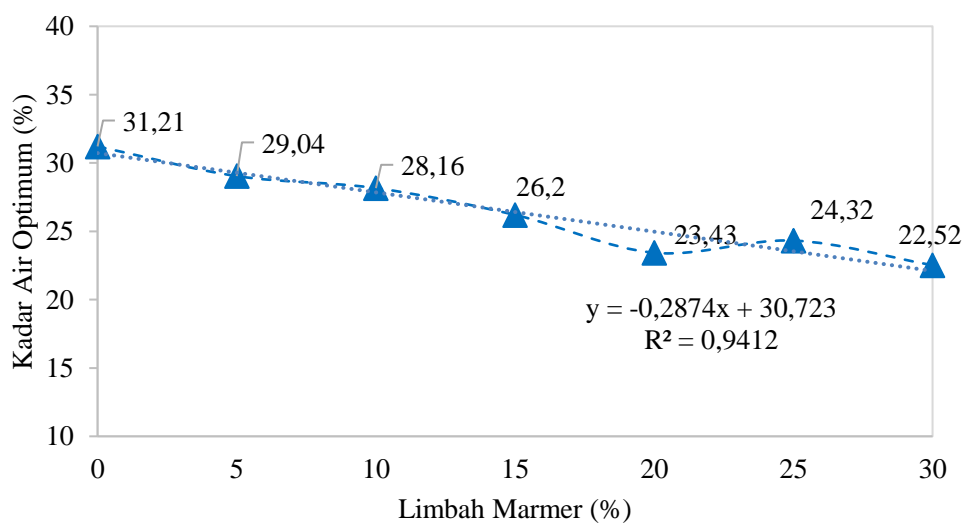
Hasil Uji Pemadatan Tanah Dasar (*Subgrade*) dengan Stabilisasi Limbah Marmer

Pemadatan dilakukan pada tanah dasar (*subgrade*) tanpa dan dengan stabilisasi limbah marmer (LM). Pengujian ini bertujuan untuk melihat pengaruh perubahan kepadatan tanah dasar dengan tambahan limbah marmer.



Gambar 3. Grafik Rekapitulasi Kepadatan Maksimum Setiap Sampel Tanah Dasar dan Subtitusi Limbah Marmer

Berdasarkan Gambar 3, kepadatan kering maksimum pada seluruh sampel dengan substitusi variasi limbah marmer (LM) meningkat sampai kadar air tertentu (*optimum*) dan menurun setelah melampaui kadar air *optimum*-nya. Kepadatan kering maksimum sampel 4 (LM15%) paling tinggi dibanding pada sampel lainnya, yaitu sebesar 1,587 gr/cm³. Sedangkan kepadatan terendah terjadi pada sampel 7 (LM30%), yaitu sebesar 1,425 gr/cm³. Masing- masing sampel juga menunjukkan penurunan kepadatan saat kadar LM melebihi kadar tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan, penambahan limbah marmer memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan kepadatan tanah, tetapi dibatasi pada kadar tertentu.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Sampel Variasi Limbah Marmer Terhadap Perubahan Kadar Air Optimum ($\omega_{optimum}$) Sampel

Berdasarkan Gambar 4, terjadi perubahan kadar air optimum setiap sampel, dimana secara garis besar terjadi penurunan kadar air sepanjang bertambah kadar limbah marmer (LM). Pada sampel LM0% ke LM20%, terjadi penurunan kadar air dengan selisih sebesar 7,78%. Penurunan tersebut jauh lebih besar dibanding penurunan pada sampel LM20% ke 30%, sebesar 0,91%. Kondisi seperti ini disebabkan oleh adanya ikatan antar butiran tanah yang lebih kuat akibat penambahan abu marmer, sehingga mengurangi pori-pori tanah dan berakibat mengurangi kadar air. Hal ini ditunjukkan dengan kepadatan maksimum yang tercapai pada sampel dengan limbah marmer 15% (LM15%) menandakan pori-pori tanah semakin kecil.

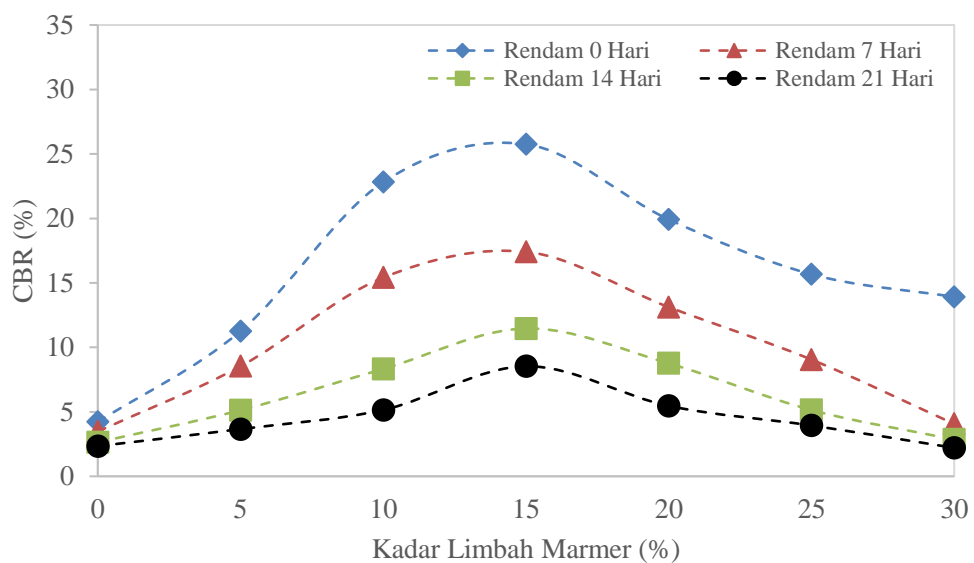
Hasil Uji CBR Tanah Dasar (Subgrade) dengan Variasi Waktu Perendaman

Variasi waktu perendaman yang diterapkan pada seluruh sampel tanah dasar (subgrade) kemudian diuji CBR. Tabel 3 menunjukkan hasil uji CBR tiap sampel tanah dasar (subgrade) yang disubstitusi dengan limbah marmer dengan variasi waktu perendaman selama 0 hari, 7 hari, 14 hari, dan 21 hari.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Fisis dan Mekanis Tanah *Subgrade*

Limbah Marmer (%)	Nilai CBR (%)			
	0 Hari	7 Hari	14 Hari	21 Hari
LM0%	4,216	3,475	2,639	2,340
LM5%	11,260	8,530	5,126	3,662
LM10%	22,814	15,412	8,325	5,148
LM15%	25,751	17,410	11,457	8,530
LM20%	19,921	13,120	8,755	5,458
LM25%	15,664	9,051	5,139	3,940
LM30%	13,910	4,061	2,851	2,205

Selanjutnya, infografis hasil uji CBR tanah dasar (subgrade) dengan variasi waktu perendaman ditunjukkan pada Tabel 2 ditampilkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Hasil Uji CBR Tanah Dasar dengan Substitusi Limbah Marmer Terhadap Variasi Lama Waktu Perendaman

Berdasarkan Gambar 5, hasil uji CBR menunjukkan peningkatan hingga pada kadar LM15% (maksimum) pada setiap variasi waktu rendaman. Di sisi lain, hasil uji CBR tanah dasar (subgrade) dengan substitusi limbah marmer (LM) menurun seiring bertambah lama waktu perendaman. Pada sampel rendaman 0 hari masih menunjukkan hasil CBR yang paling tinggi. Jika ditinjau dari sampel LM15% tiap variasi rendaman, terjadi penurunan nilai CBR sebesar 8,341% di awal perendaman selama 7 hari. Dibandingkan dengan nilai CBR pada perendaman 7 hari ke 14 hari dan 14 hari ke 21 hari secara berturut-turut turun sejauh 5,953% dan 2,927%. Selisih sejauh ini menunjukkan bahwa limbah marmer dari Kab. Maros ini belum mampu memperbaiki kinerja campuran jika direndam lama, tanah dasar yang merupakan tanah lempung masih sangat sensitif terhadap lama waktu perendaman sehingga menyebabkan tanah dasar (subgrade) tersebut menjadi lebih lunak dan ditandai dengan CBR yang terus menurun.

Pembahasan

1. Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai CBR dan Kepadatan Tanah Subgrade

Substitusi limbah marmer memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kepadatan tanah subgrade. Hal ini terlihat dari data pada Gambar 3, yang menunjukkan adanya peningkatan kepadatan tanah subgrade sebesar 8,922%. Nilai kepadatan kering maksimum tertinggi tercapai pada campuran dengan 15% limbah marmer (LM15%), yakni sebesar 1,587 gr/cm³. Pada kadar ini, limbah marmer memberikan kontribusi optimal dalam memperkuat ikatan antar butiran tanah. Namun, jika kadar limbah marmer melebihi 15%, pengaruh positif tersebut mulai berkurang, yang ditandai dengan penurunan nilai kepadatan kering maksimum, misalnya pada LM30%, dengan nilai 1,425 gr/cm³. Selain itu, nilai CBR tanah subgrade juga menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan peningkatan kepadatan. Pada substitusi limbah marmer 15% (LM15%), nilai CBR meningkat sebesar 21,535%, dari 4,216% (tanpa limbah marmer/LM0%) menjadi 25,751%. Namun, sama seperti pada kepadatan, nilai CBR juga menurun ketika kadar limbah marmer melampaui 15%. Secara teknis, peningkatan kepadatan tanah subgrade yang disubstitusi dengan limbah marmer terjadi karena beberapa mekanisme dalam struktur tanah. Limbah marmer, yang berbentuk material halus seperti abu, mampu mengisi ruang kosong atau pori-pori di antara butiran tanah. Proses ini mengurangi porositas tanah, sehingga tanah menjadi lebih padat. Akibatnya, berat volume tanah meningkat, yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan nilai kepadatan kering maksimum (γ_{dmax}). Penambahan limbah marmer juga berdampak pada kadar air optimum tanah. Penurunan kadar air optimum terjadi seiring bertambahnya kadar limbah marmer, yang mencerminkan bahwa pori-pori tanah yang lebih kecil menyulitkan air untuk terserap atau tertahan di dalam tanah. Dengan kata lain, penambahan limbah marmer tidak hanya mengurangi ruang kosong dalam tanah, tetapi juga meningkatkan kepadatannya secara keseluruhan, sehingga menghasilkan tanah subgrade yang lebih stabil hingga batas optimal pada kadar 15%.

2. Pengaruh Lama Waktu Perendaman Terhadap Perubahan Nilai California Bearing Ratio (CBR) dan Kepadatan Pada Subgrade Yang Telah Disubstitusi Limbah Marmer

Penggunaan limbah marmer sebagai bahan stabilisasi tanah dasar (subgrade) telah menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan karakteristik teknis tanah, terutama nilai California Bearing Ratio (CBR) dan kepadatan. Pada kondisi awal (0 hari perendaman), substitusi limbah marmer hingga kadar 15% menghasilkan nilai CBR

tertinggi sebesar 25,751%, yang mencerminkan peningkatan daya dukung tanah. Peningkatan ini disebabkan oleh pengisian pori-pori tanah oleh partikel halus limbah marmer, yang memperkuat ikatan antar butiran tanah. Selain itu, kepadatan kering maksimum (γ_{dmax}) juga meningkat hingga kadar limbah marmer 15% (LM15%), mencapai 1,587 gr/cm³ dibandingkan tanah tanpa stabilisasi (1,457 gr/cm³). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan limbah marmer dalam kadar optimum mampu meningkatkan kerapatan dan kekuatan tanah. Namun, kinerja tanah hasil stabilisasi ini menurun seiring bertambahnya waktu perendaman. Nilai CBR menurun secara bertahap, dengan penurunan terbesar terjadi pada 7 hari pertama perendaman, khususnya pada kadar LM15%, yang turun sebesar 8,341%. Pada perendaman 14 hari dan 21 hari, penurunan nilai CBR terus terjadi dengan persentase masing-masing sebesar 5,953% dan 2,927%. Penurunan ini disebabkan oleh sifat tanah lempung sebagai material dasar, yang rentan terhadap kelembapan tinggi. Perendaman menyebabkan tanah menjadi lebih lunak akibat melemahnya ikatan antar partikel, yang mengurangi daya dukung tanah. Di sisi lain, pada kadar limbah marmer di atas 15%, baik nilai γ_{dmax} maupun CBR menunjukkan tren menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kelebihan partikel halus, yang mengurangi efisiensi pemadatan dan memperbesar volume pori tanah. Secara keseluruhan, limbah marmer memberikan pengaruh positif terhadap stabilisasi tanah pada kondisi kering hingga semi-jenuh, tetapi efektivitasnya menurun pada kondisi perendaman jangka panjang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dipaparkan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Substitusi limbah marmer memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan nilai CBR dan kepadatan tanah subgrade hingga kadar optimal 15% (LM15%). Pada kadar ini, kepadatan kering maksimum mencapai 1,587 gr/cm³ atau meningkat sebesar 8,922%, dan nilai CBR mencapai 25,751% atau meningkat sebesar 21,535%.
2. Penggunaan limbah marmer sebagai bahan stabilisasi tanah subgrade setelah direndam selama 0, 7, 14, dan 28 hari menunjukkan penurunan nilai CBR dan kepadatan, terutama pada kadar limbah marmer optimum 15% (LM15%). Pada kondisi 0 hari perendaman, nilai CBR mencapai maksimum 25,751%, dan kepadatan kering maksimum (γ_{dmax}) meningkat hingga 1,587 gr/cm³. Namun, kinerja tanah menurun secara bertahap seiring bertambahnya waktu perendaman, dengan penurunan nilai CBR terbesar terjadi pada 7 hari pertama.

SARAN

1. Penelitian mengenai pemanfaatan bahan limbah, seperti limbah marmer, diharapkan dapat ditingkatkan lebih lanjut, terutama mengenai dampaknya terhadap peningkatan sifat mekanis tanah.
2. Penting untuk melakukan pemetaan terhadap lokasi-lokasi tempat keberadaan limbah marmer lokal di Sulawesi Selatan.
3. Perlu dikaji lebih lanjut terkait efek siklus basah dan kering terhadap tanah lempung dengan substitusi limbah marmer
4. Perlu dilakukan uji mikroskopis untuk mengetahui potensi tanah lebih jauh

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak terkait yang telah membantu dan bekerjasama demi kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amakye, S. Y., Abbey, S. J., Booth, C. A., & Mahamadu, A.-M. (2021). Enhancing the Engineering Properties of Subgrade Materials Using Processed Waste: A Review. *Geotechnics*, 1(2), 307–329.
- Annisa, H., Ibrahim, Z., & Yunus, I. (2024). Analisis Karakteristik Pengembangan (Swelling) Pada Tanah Lempung Dengan Stabilitas Hasil Olahan (Limbah) Marmer Kabupaten Maros. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Lamappapoleonro*, 2(2), 58–69.
- Badaron, S. F., & Maricar, M. H. (2024). Degradasi Daya Dukung Lapisan Subgrade Akibat Lama Perendaman. *STABILITA// Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 12(2), 149–155.
- Borlon, D. S., & Bhoi, M. K. (2023). A Review on the Stabilization of Soft Soil Using Industrial Waste. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(3), 888–894. <https://doi.org/https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS34210>
- Dhatrak, A. I., & Kolhe, P. V. (2022). Application of Eco-friendly and Smart Materials in Geotechnical Engineering for Subgrade Stabilization: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084(1), 12035.
- Ferriyall. (2005). *Pemanfaatan Bubuk Marmer Hasil Olahan Industri Batu Marmer Untuk Bahan Campuran Pembuatan Paving Block Sebagai Upaya Minimisasi Limbah (Studi Kasus Di Kabupaten Maros Sulawesi Selatan)*. Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro.
- Hariato, T., & Ahmad Masri. (2016). Karakteristik Mekanis Tanah Kembang Susut Yang Distabilisasi Dengan Limbah Marmer. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2016*, 293–300.
- Indriyanti, I., & Kasmawati, K. (2018). Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer. *TEKNIK HIDRO*, 11(2), 14–25.
- Jamal, Susilawati N., Andi Aladin, and S. Y. (2021). Konservasi Lingkungan dengan Pemanfaatan Serbuk Limbah Hasil Pengolahan Marmer Daerah Kabupaten Maros Provinsi Sulawesi Selatan. *Journal of Technology Process (JTP)*, 1(1), 21–30.
- Saputra, D. D., Sandi, D. M. N., & Erwanto, Z. (2022). Identifikasi Karakteristik Tanah Untuk Perencanaan Subgrade Pada Kecamatan Siliragung. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 81–89.
- Setyono, E., & Sunarto, A. M. G. (2018). Pengaruh Penggunaan Bahan Serbuk Marmer Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif. *Media Teknik Sipil*, 16, 99–107.
- Siregar, D. R., & Andajani, N. (2017). Pengaruh Penambahan Limbah Marmer terhadap Potensial Swelling pada Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Driyorejo. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 3(3), 131–137.
- Soehardi, F., & Putri, L. D. (2024). Pengaruh Waktu Perendaman Dengan penambahan Kapur Sebagai Bahan Stabilisasi Pada Tanah Lempung Terhadap Nilai CBR. *Journal of Infrastructure and Civil Engineering*, 4(2), 68–72.
- Utama, L. A., Candra, A. I., & Ridwan, A. (2020). Pengujian Kuat Tekan Pada Beton Dengan Penambahan Limbah Marmer Dan Serat Batang Pisang. *J. Manaj. Teknol. Tek. Sipil*, 3(2), 304.
- Waruwu, A., Gea, F., Hia, J. Y. A., Waruwu, E. M., & Zega, M. (2022). Pengaruh Model Perkuatan Bambu Terhadap Nilai Cbr Tanah Lempung Lunak. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 131–138.
- Yoder, E. J., & Witzack, M. W. (1991). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.