

**ANALISIS TIMBUNAN PERBAIKAN SUBGRADE
DENGAN SUBSTITUSI STONE CRUSHER WASTE
(STUDI KASUS : INDONESIA GROWTH PROJECT BAHODOPI BLOCK 2 & 3)**

Dyah Ainun Syafitri^{1*}, Muhammad Deny Adi Saputra², Juny Andry Sulistyo³

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang

*Corresponding author e-mail: ainunsyafitri3@gmail.com, denyadi76@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

The construction of hauling roads in nickel mining areas requires a strong and stable subgrade to support heavy equipment transportation activities. However, based on the CBR test results on the Main Haul Road 112 Zone 2 of the Indonesia Growth Project (IGP) Bahodopi Block 2 & 3 owned by PT Vale Indonesia, the subgrade CBR values were found to be below the required technical standards. On the other hand, the aggregate crushing process using a Stone Crusher produces a large volume of waste material (Stone Crusher Waste) that remains underutilized. This research aims to evaluate the potential of using Stone Crusher Waste as an alternative material for subgrade improvement in hauling road construction. The research method involves collecting samples of Stone Crusher Waste and native soil from the project site, followed by a series of laboratory tests including sieve analysis, specific gravity, moisture content, fines content, Atterberg limits, Proctor Standard, and CBR testing. The composition of the mixtures was varied at 25%, 50%, 75%, and 100% Stone Crusher Waste to determine the most effective proportion for enhancing the physical and mechanical properties of the subgrade soil. Test results indicated that the mixture containing 75% Stone Crusher Waste and 25% native soil provided the best performance in terms of CBR value and maximum dry density. Therefore, Stone Crusher Waste is considered suitable for use as fill material in subgrade improvement for hauling roads.

Pembangunan jalan angkut di area pertambangan nikel membutuhkan tanah dasar yang kuat dan stabil untuk mendukung kegiatan pengangkutan alat berat. Namun, berdasarkan hasil uji CBR di Jalan Angkut Utama 112 Zona 2 Proyek Pertumbuhan Indonesia (IGP) Bahodopi Blok 2 & 3 milik PT Vale Indonesia, nilai CBR tanah dasar ditemukan di bawah standar teknis yang dipersyaratkan. Di sisi lain, proses penghancuran agregat menggunakan Stone Crusher menghasilkan material limbah (Limbah Stone Crusher) dalam jumlah besar yang belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan Limbah Stone Crusher sebagai material alternatif untuk perbaikan tanah dasar dalam konstruksi jalan angkut. Metode penelitian ini melibatkan pengumpulan sampel Limbah Penghancur Batu dan tanah asli dari lokasi proyek, diikuti dengan serangkaian uji laboratorium yang meliputi analisis saringan, berat jenis, kadar air, kadar butiran halus, batas Atterberg, Standar Proctor, dan uji CBR. Komposisi campuran divariasikan pada 25%, 50%, 75%, dan 100% Limbah Penghancur Batu untuk menentukan proporsi yang paling efektif dalam meningkatkan sifat fisik dan mekanis tanah dasar. Hasil uji menunjukkan bahwa campuran yang mengandung 75% Limbah Penghancur Batu dan 25% tanah asli memberikan kinerja terbaik dalam hal nilai CBR dan kepadatan kering maksimum. Oleh karena itu, Limbah Penghancur Batu dianggap cocok untuk digunakan sebagai material urugan dalam perbaikan tanah dasar untuk jalan angkut.

Keywords :

CBR; hauling road; Indonesia Growth Project; Stone Crusher Waste; subgrade; embankment

1. PENDAHULUAN

Dalam pembangunan infrastruktur jalan tambang, kondisi tanah dasar (*subgrade*) memegang peranan penting terhadap ketahanan dan kenyamanan operasional. Salah satu contoh nyata terdapat pada jalan *hauling* di kawasan *Indonesia Growth Project (IGP)* Bahodopi *Block 2 & 3* milik PT Vale Indonesia yang terletak di Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah. Proyek ini merupakan proyek strategis milik PT Vale Indonesia yang menjadi bagian dari upaya ekspansi sektor pertambangan nikel untuk mendukung kebutuhan industri nasional hingga internasional. Dalam konteks tersebut, jalan *hauling* menjadi elemen vital yang menghubungkan titik-titik penting dalam proses pengangkutan material tambang, sehingga kualitas dan kekuatan tanah dasar di bawah perkerasan jalan menjadi fondasi utama dalam menjamin kelancaran operasional. Apabila *subgrade* tidak memenuhi standar teknis, terutama dalam hal daya dukung tanah (*CBR*), dapat menyebabkan kerusakan dini pada badan jalan dan meningkatkan biaya perawatan.

Berdasarkan pengujian awal di lapangan, segmen jalan *hauling* pada *Main Haul Road (MHR)* 112 Zona 2 menunjukkan nilai *CBR subgrade* yang rendah, yaitu di bawah standar teknis proyek. Kondisi ini menuntut adanya perbaikan *subgrade* agar jalan dapat berfungsi optimal dalam mendukung lalu lintas alat berat. Biasanya, perbaikan *subgrade* dilakukan dengan menggunakan material timbunan pilihan dari *Quarry* setempat.

Di sisi lain, proses produksi agregat menggunakan alat *Stone Crusher* pada proyek ini menghasilkan limbah berupa campuran partikel kasar dan halus yang tidak sesuai dengan standar agregat konstruksi yang ditetapkan. Material sisa ini, dikenal sebagai *Stone Crusher Waste*, selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Namun, berdasarkan pengamatan awal, *Stone Crusher Waste* memiliki potensi signifikan untuk dimanfaatkan kembali, khususnya sebagai material timbunan untuk perbaikan *subgrade* pada konstruksi jalan *hauling*. Potensi ini diperkuat oleh karakteristik materialnya yang mengandung fraksi halus dan kasar yang memungkinkan pemadatan optimal. Selain itu, keberadaan *Stone Crusher Waste* dalam jumlah besar di lokasi proyek menjadikannya sebagai sumber material alternatif yang ekonomis dan mudah diakses. Pemanfaatan limbah ini juga berpeluang mengurangi ketergantungan pada material timbunan konvensional dari

quarry, sekaligus mendukung upaya pengelolaan lingkungan melalui prinsip pemanfaatan kembali (*reuse*) limbah konstruksi.

Pemanfaatan *Stone Crusher Waste* sebagai material pengganti timbunan *subgrade* perlu dikaji secara teknis melalui pengujian laboratorium untuk memastikan kesesuaiannya terhadap spesifikasi teknis. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi perbaikan *subgrade* dengan substitusi *Stone Crusher Waste* pada jalan hauling di IGP Bahodopi Block 2 & 3.

2. METODOLOGI DAN BAHAN

Metode penelitian ini menggunakan menggunakan pendekatan kuantitatif, dimana data diambil dari kondisi nyata lapangan dengan metode eksperimen laboratorium. Pengambilan data dilakukan melalui pengujian langsung terhadap sampel *Stone Crusher Waste* diantaranya dengan pengujian analisis saringan, berat jenis, kadar air, kadar lumpur, batas Atterberg, Proctor Standard, dan nilai CBR laboratorium.

a. Pembuatan Variasi Komposisi Campuran *Stone Crusher Waste* dan Tanah Asli

Untuk mendapatkan hasil analisis campuran terbaik, material *Stone Crusher Waste* akan dicampur dengan tanah asli dengan variasi komposisi sebagai berikut.

Tabel 1. Komposisi Campuran Benda Uji

Komposisi Campuran	Kode	<i>Stone Crusher Waste</i> gram	Tanah Asli gram
25% SCW + 75% TA	S25	15.000,00	45.000,00
50% SCW + 50% TA	S50	30.000,00	30.000,00
75% SCW + 25% TA	S75	45.000,00	15.000,00
100% SCW + 0% TA	S100	60.000,00	0,00

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Keterangan :

SCW = *Stone Crusher Waste*

TA = Tanah Asli

Pada masing-masing komposisi campuran tersebut akan diidentifikasi komposisi campuran optimum yang memenuhi syarat teknis berdasarkan spesifikasi proyek.

b. Gradasi Butiran

Pengujian analisis saringan bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran agregat kasar maupun halus yang terkandung dalam campuran *Stone Crusher Waste* dan tanah asli. Hasil gradasi ini akan digunakan untuk mengklasifikasikan tanah serta menentukan kesesuaian campuran terhadap spesifikasi teknis material timbunan subgrade. Pengujian ini merujuk pada SNI ASTM C136:2012.

c. Berat Jenis

Berat jenis diartikan sebagai perbandingan antara massa tanah kering dengan massa air suling yang volumenya setara dengan volume tanah dalam kondisi jenuh pada suhu tertentu. Pengujian berat jenis digunakan menentukan berat jenis partikel material. Terdapat 2 macam pengujian berat, yaitu pengujian berat jenis agregat halus yang lolos saringan No. 4 (SNI 1970-2016) dan pengujian berat jenis agregat kasar yang tertahan saringan No. 4. (SNI 1969-2016).

d. Kadar Air

Pengujian kadar air bertujuan untuk mengetahui tingkat kelembaban alami dari tanah atau campuran. Metode ini dilakukan dengan cara pengeringan dalam oven dan perbandingan berat basah dan kering. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-1964-1990.

e. Kadar Lumpur

Kadar lumpur merupakan persentase partikel halus berukuran $< 0,075$ mm (lolos saringan No. 200) dalam tanah atau agregat. Kandungan lumpur yang tinggi dapat mempengaruhi sifat fisik tanah, seperti kepadatan, kohesi, dan kemampuan drainase (SNI 03-4142-1996). Menurut SNI S-04-1989-F, batas maksimum kadar lumpur dalam

agregat halus adalah 5% dan agregat kasar adalah 1%.

f. Batas Atterbeg

Batas Atterberg merupakan metode yang digunakan untuk menentukan sifat konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang bervariasi. Pengujian ini bertujuan untuk mencari nilai batas cair (LL), batas plastis (PL), serta indeks plastisitas (PI) yang dihasilkan dari selisih antara batas cair dan batas plastis.

g. Kadar Air Optimum dan Kepadatan Kering Maksimum

Nilai Kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum didapatkan dari hasil pengujian *Proctor Standard*. Pengujian ini dibutuhkan untuk mencapai pemadatan tanah terbaik. Dasar dari tahapan pengujian ini dilakukan berdasarkan SNI 1743:2008.

h. Nilai CBR

California Bearing Ratio (CBR) menurut Bina Marga sendiri adalah rasio dari gaya perlawanan penetrasi (*penetration resistance*) dari tanah pada sebuah piston yang ditekan secara kontinu terhadap gaya perlawanan penetrasi serupa pada contoh tanah standar berupa batu pecah di California. Rasio tersebut diambil pada penetrasi 2.5 dan 5.0 mm (0.1 dan 0.2 inch) dengan ketentuan angka tertinggi yang digunakan. Tujuan pengujian ini adalah untuk menilai kekuatan tanah dasar yang dikompaksi di laboratorium yang akan digunakan dalam perancangan perkerasan. Hasil percobaan dinyatakan sebagai nilai *CBR* (dalam %) yang nantinya digunakan untuk menentukan tebal perkerasan. Dalam penelitian ini, nilai *CBR* untuk tanah dasar (*subgrade*) ditetapkan minimal sebesar 4%. Jika nilai *CBR* yang diperoleh kurang dari batas tersebut, maka tanah harus diperbaiki. Pengujian *CBR* ini dilakukan berdasarkan SNI 1744-2012.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari pengujian-pengujian yang telah dilakukan, selanjutnya akan digunakan untuk menilai apakah material *Stone Crusher Waste* memenuhi persyaratan teknis sebagai material perbaikan *subgrade*, serta menentukan komposisi campuran yang paling optimal berdasarkan parameter teknis yang sudah ditetapkan. Penelitian ini diharapkan memberikan alternatif material timbunan yang sesuai dengan standar teknis jalan *hauling* di proyek *IGP Bahodopi Block 2 & 3*.

a. Sifat Fisik dan Mekanis Material *Stone Crusher Waste*

Analisis karakteristik fisik dan mekanis material bertujuan untuk memahai potensi *Stone Crusher Waste* sebagai bahan substitusi material timbunan perbaikan *subgrade*. Berikut Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan data dari sampel pengujian *Stone Crusher Waste*.

Tabel 2. Data Pengujian Sifat Fisik *Stone Crusher Waste*

Sifat	Nilai	Satuan
Gradasi Butiran (GS)		
Lolos saringan 4"	100,00	%
Lolos saringan No. 40	44,52	%
Lolos saringan No. 200	2,12	%
<i>Specific Gravity</i>	2,18	gram/cm ³
Kadar Air	16,78	%

Sifat	Nilai	Satuan
Kadar Lumpur	3,27	%
Batas Cair (LL)	29,69	%
Batas Plastis (PL)	25,10	%
Indeks Plastis (IP)	4,59	%

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Tabel 3. Data Pengujian Sifat Mekanis *Stone Crusher Waste*

Sifat	Nilai	Satuan
Kadar Air Optimum (Wopt)	13,20	%
Kepadatan Kering Maksimum (yd Max)	1,65	gram/cm ³
Nilai CBR	49,43	%

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan Tabel 2 dan 3, dapat dijelaskan bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki karakteristik gradasi yang tergolong sebagai timbunan berbutir sesuai dengan spesifikasi timbunan pada Spesifikasi Umum 2018. Selain itu, hasil pengujian terhadap kadar air menunjukkan bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki nilai kadar air sebesar 16,78%. Nilai ini masih berada dalam rentang kadar air alami yang dapat diterima untuk material timbunan, serta menunjukkan bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki kemampuan menyerap air akibat sifat fisik butirannya yang bertekstur kasar dan berpori.

Hasil pengujian kadar lumpur untuk komposisi *Stone Crsuher Waste* menunjukkan nilai sebesar 3,27%. Nilai ini tergolong rendah dan mencerminkan kebersihan material yang baik. Kadar lumpur yang rendah seperti ini mengindikasikan bahwa *Stone Crusher Waste* tidak mengandung partikel halus berlebihan yang dapat mengganggu daya dukung, kestabilan, maupun kemampuan pemadatan dari lapisan tanah tersebut.

Nilai *specific gravity* sebesar 2,18 g/cm³ mengindikasikan bahwa partikel *Stone Crusher Waste* cukup padat dan berpotensi memberikan kontribusi positif terhadap daya dukung tanah ketika dicampurkan dengan material asli.

Dari sisi indeks konsistensi tanah, nilai batas cair (LL) sebesar 29,69% dan batas plastis (PL) sebesar 25,10% menunjukkan bahwa tanah hasil pencampuran *Stone Crusher Waste* memiliki perilaku plastis yang tergolong rendah, sebagaimana ditunjukkan oleh

indeks plastisitas (PI) sebesar 4,59%. Menurut klasifikasi tanah, nilai PI tersebut berada dalam kisaran tanah dengan plastisitas rendah (ML-OL) sehingga tidak mudah berubah bentuk akibat perubahan kadar air, suatu kondisi yang sangat ideal untuk lapisan subgrade.

Selanjutnya, hasil pengujian Proctor dan CBR pada Tabel 5 memperlihatkan bahwa kadar air optimum campuran adalah 13,20% dengan kepadatan kering maksimum 1,65 g/cm³. Nilai CBR sebesar 49,43% merupakan angka yang sangat tinggi, bahkan jauh melebihi nilai ambang batas minimum 4% yang disyaratkan dalam spesifikasi teknis proyek. Hal ini membuktikan bahwa *Stone Crusher Waste* murni sangat potensial digunakan sebagai material pengganti tanah asli dalam lapisan perkerasan bawah.

Dengan demikian, data dalam Tabel 4 dan 5 memberikan dasar kuat bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang sesuai untuk aplikasi timbunan subgrade, baik dari segi kepadatan, plastisitas, maupun daya dukung tanah.

b. Evaluasi Kelayakan Teknis *Stone Crusher Waste* sebagai Material Timbunan Perbaikan *Subgrade*

Berdasarkan hasil uji analisa saringan, *Stone Crusher Waste* memenuhi persyaratan sebagai timbunan berbutir sesuai Spesifikasi Umum 2018. Hasil uji batas atterberg, *Stone Crusher Waste* memiliki nilai Indeks Plastisitas di bawah 10% sesuai Spesifikasi Umum 2018. Dari hasil uji proctor, *Stone Crusher Waste* memiliki nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,65 g/cm³ dengan kadar air optimum 13,2%. Sementara itu, hasil pengujian CBR laboratorium menunjukkan nilai sebesar 49,43%, yang jauh melebihi batas minimum 4% yang dipersyaratkan oleh spesifikasi teknis proyek.

Jika dibandingkan dengan tanah asli yang memiliki nilai *CBR* hanya sekitar 2%, maka peningkatan ini cukup signifikan dan mencerminkan keunggulan *Stone Crusher Waste* dalam meningkatkan daya dukung lapisan tanah dasar. Dengan performa tersebut, *Stone Crusher Waste* layak dipertimbangkan sebagai material pengganti *subgrade* konvensional di lapangan.

c. Analisis Campuran *Stone Crusher Waste* dengan Tanah Asli

Setelah didapatkan sifat fisik dan mekanis serta evaluasi kelayakan teknis *Stone Crusher Waste*, maka material ini selanjutnya akan diuji di laboratorium dengan mencampurkan *Stone Crusher Waste* dengan tanah Asli.

- Gradasi butiran

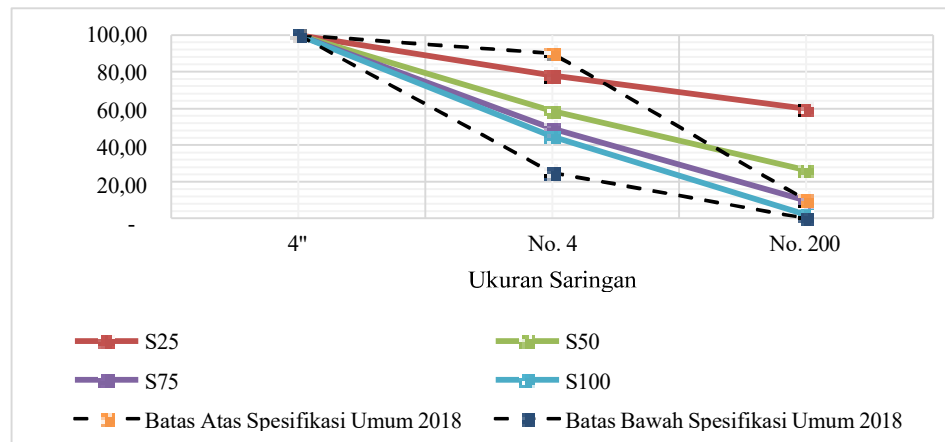
Gradasi butiran pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) yang didapatkan dari pengujian analisis saringan tertera pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Gradasi Butiran

No Saringan	Spesifikasi		Persentase Lolos (Kombinasi)				
	Batas Atas	Batas Bawah	S0	S25	S50	S75	S100
4"	100	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
No. 4	90	25	100,00	77,81	58,48	48,99	44,52
No. 200	10	0	98,36	59,84	26,15	9,79	2,12

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan hasil tabel diatas didapatkan hasil total campuran gradasi kombinasi agregat yang tidak boleh melampaui batas maksimal dan minimal dari spesifikasi yang sudah ditetapkan, hasil grafik kombinasi gradasi agregat dan batas spesifikasi dapat dilihat pada grafik di bawah ini



Gambar 1. Grafik Kombinasi Agregat

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Gradasi butiran dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Berdasarkan spesifikasi tersebut, material timbunan harus memenuhi ketentuan: 100% lolos ayakan 4" (100 mm), 25–90% lolos ayakan No. 4 (4,75 mm), dan 0–10% lolos ayakan No. 200 (0,075 mm). Batas atas dan batas bawah pada Gambar 1 menunjukkan spesifikasi dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

Berdasarkan hasil analisis saringan, seluruh sampel campuran menunjukkan material lolos 100% pada saringan 4" (100 mm). Material murni *Stone Crusher Waste* (100%)

menunjukkan lolos saringan No. 4 sebesar 44,52% dan No. 200 sebesar 2,12%. Semakin tinggi persentase *Stone Crusher Waste*, semakin tinggi agregat kasarnya.

Dari kurva pada Gambar 1 dapat diamati bahwa hanya campuran 100% *Stone Crusher Waste* dan 75% *Stone Crusher Waste* + 25% Tanah Asli yang berada sepenuhnya di dalam batas atas dan batas bawah sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018. Hal ini menunjukkan bahwa kedua campuran tersebut memenuhi persyaratan sebagai material untuk timbunan berbutir.

- Berat Jenis (*Specific Gravity*)

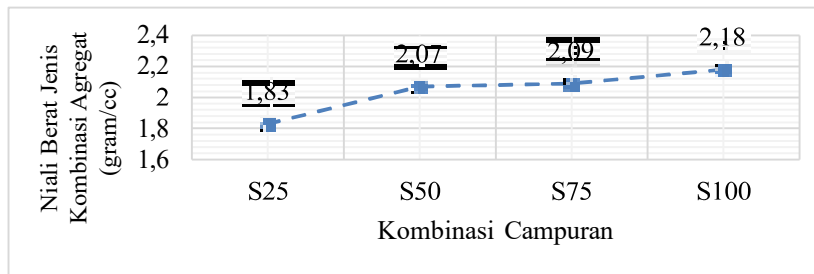
Hasil pengujian berat jenis pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) tertera pada Tabel 5 sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Pengujian Berat Jenis

Komposisi Campuran	Berat Jenis Agregat Kasar (gram/cc)	Berat Jenis Agregat Halus (gram/cc)	Persentase Komposisi Agregat Kasar (%)	Persentase Komposisi Agregat Halus (%)	Berat Jenis Kombinasi Agregat (gram/cc)
S25	2,23	1,72	22,20	77,81	1,83
S50	2,21	1,86	58,49	41,51	2,07
S75	2,24	1,93	51,02	48,99	2,09
S100	2,27	2,07	55,48	44,52	2,18

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Dari hasil berat jenis pada masing-masing sampel di atas diperoleh grafik gradasi butiran sebagai berikut :



Gambar 2. Grafik Berat Jenis Agregat Berdasarkan Komposisi Campuran *Stone Crusher Waste* dan Tanah Asli

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan hasil pengujian, nilai berat jenis meningkat seiring penambahan proporsi *Stone Crusher Waste*, dari 1,83 g/cm³ (25% *Stone Crusher Waste*) menjadi 2,18 g/cm³ (100% *Stone Crusher Waste*). Hal ini mengindikasikan bahwa *Stone Cruher Waste* memiliki densitas partikel yang lebih tinggi daripada tanah asli, dan berkontribusi terhadap peningkatan daya dukung material campuran.

- Kadar Air

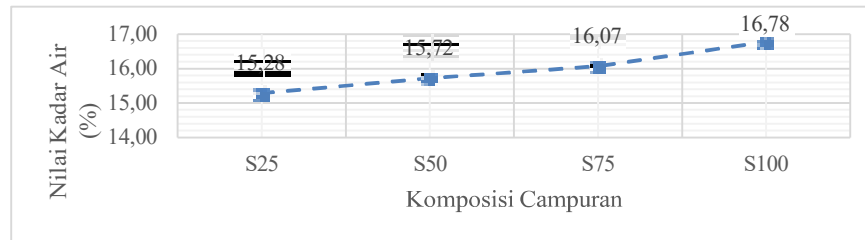
Hasil pengujian kadar air pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) tertera pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kadar Air

Komposisi Campuran	Nilai Kadar Air (%)
S25	15,28
S50	15,72
S75	16,07
S100	16,78

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Dari hasil pengujian kadar air pada masing-masing sampel di atas diperoleh grafik kadar air sebagai berikut :



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Kadar Air

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan Gambar 3, Kadar air pada campuran meningkat secara bertahap dari 15,28% menjadi 16,78% seiring meningkatnya kandungan *Stone Crusher Waste*. Hal ini mengindikasikan bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki kemampuan menyerap dan mempertahankan air lebih tinggi dibandingkan tanah asli. Kadar air yang terlalu tinggi dapat mengganggu proses pemadatan dan menurunkan nilai CBR. Namun, dalam hasil penelitian, peningkatan kadar air ini tidak menurunkan nilai CBR secara signifikan, karena peningkatan *Stone Crusher Waste* justru memberi kontribusi positif terhadap daya dukung.

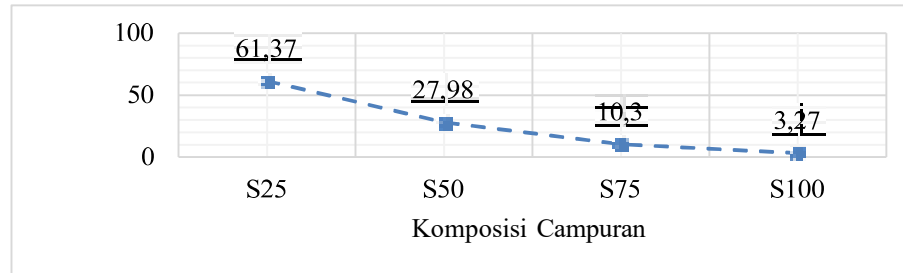
- Kadar Lumpur

Hasil pengujian kadar lumpur pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) tertera pada Tabel 7 dan grafik pada Gambar 4 sebagai berikut.

Tabel 7. Hasil Pengujian Kadar Lumpur

Komposisi Campuran	Kadar Lumpur (%)
S25	61,37
S50	27,98
S75	10,30
S100	3,27

Sumber : Hasil Penelitian, 2025



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Kadar Lumpur

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa kadar lumpur menurun secara signifikan seiring meningkatnya proporsi *Stone Crusher Waste*. Penurunan kadar lumpur terjadi karena proporsi tanah asli yang tinggi menjadi penyumbang utama lumpur, dan penambahan *Stone Crusher Waste* secara progresif menggantikan partikel lumpur dengan agregat kasar yang lebih bersih. Oleh sebab itu, komposisi 100% *Stone Crusher Waste* menghasilkan kadar lumpur paling rendah dan sangat cocok sebagai material timbunan yang stabil dan mudah dipadatkan.

- Batas Atterberg

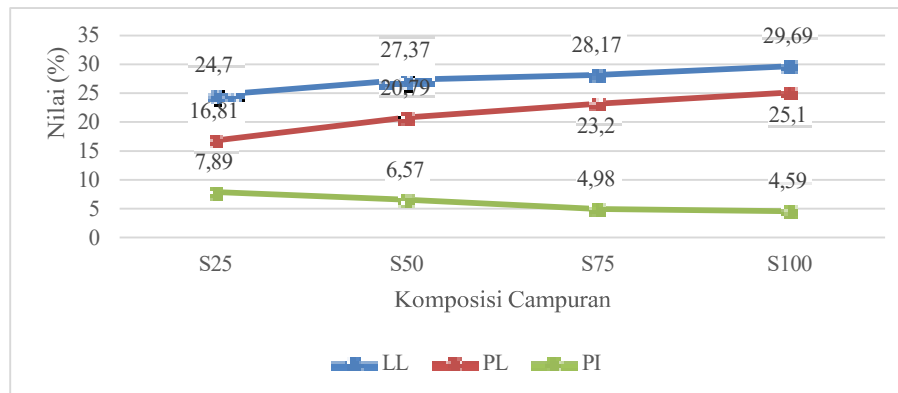
Hasil pengujian batas atterberg pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) tertera pada Tabel 8 sebagai berikut.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Batas Cair, Batas Plastis, dan Plastis Indeks

Komposisi Campuran	LL (%)	PL (%)	PI (%)
25% SCW + 75% TA	24,70	16,81	7,89
50% SCW + 50% TA	27,37	20,79	6,57
75% SCW + 25% TA	28,17	23,20	4,98
100% SCW + 0% TA	29,69	25,10	4,59

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan Tabel 8, maka didapatkan grafik hasil pengujian Batas Cair, Batas Plastis dan Plastis Indeks seperti yang terlihat pada Gambar 5 sebagai berikut.

**Gambar 5. Grafik Nilai Batas Cair, Batas Plastis, dan Plastis Indeks**

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Pada hasil pengujian, nilai LL dan PL mengalami kenaikan seiring bertambahnya proporsi *Stone Crusher Waste*. Peningkatan nilai *Liquid Limit* (LL) dan *Plastic Limit* (PL) pada komposisi campuran dengan kadar *Stone Crusher Waste* yang lebih tinggi disebabkan oleh kandungan fraksi halus reaktif yang masih terdapat dalam *Stone Crusher Waste*. Meskipun gradasi butiran *Stone Crusher Waste* lebih dominan material berbutir kasar, hasil pengujian menunjukkan bahwa partikel halus dari debu batu pada *Stone Crusher Waste* memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi.

Debu batu tersebut memperbesar kapasitas ikatan air pada campuran, sehingga tanah memerlukan lebih banyak air untuk mencapai kondisi plastis maupun cair. Oleh karena itu, nilai LL dan PL meningkat secara berurutan dari komposisi 25% hingga 100% *Stone Crusher Waste*.

Penurunan nilai PI mencerminkan bahwa material campuran menjadi semakin rendah tingkat plastisitasnya. Berdasarkan klasifikasi *Unified Soil Classification*

System (USCS), nilai $PI < 10\%$ termasuk dalam kategori plastisitas rendah. Material dengan plastisitas rendah memiliki kecenderungan lebih stabil terhadap perubahan volume saat kondisi jenuh atau kering, sehingga lebih sesuai digunakan sebagai lapisan *subgrade* yang memerlukan kestabilan bentuk dan kekuatan.

Nilai PI yang rendah juga menunjukkan bahwa pencampuran *Stone Crusher Waste* dapat menurunkan sifat kohesif tanah, menjadikannya lebih granular dan cenderung menunjukkan perilaku seperti agregat. Hal ini menjadi indikator positif dalam perencanaan konstruksi perkerasan jalan di mana deformasi plastis harus dihindari.

- Nilai Kadar Air Optimum dan Kepadatan Kering Maksimum

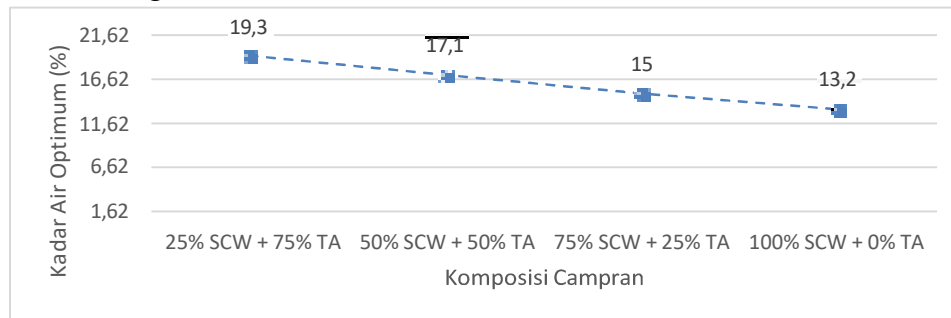
Nilai Nilai Kadar Air Optimum dan Kepadatan Kering Maksimum didapatkan dari hasil pengujian *proctor standar*. Hasil pengujian *proctor standard* pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) tertera pada Tabel 9 sebagai berikut.

Tabel 9. Hasil Pengujian Proctor Standard

Komposisi Campuran	Kepadatan Kering Maksimum (gram/cm ³)	Kadar Air Optimum (%)
25% SCW + 75% TA	1,77	19,30
50% SCW + 50% TA	1,73	17,10
75% SCW + 25% TA	1,68	15,00
100% SCW + 0% TA	1,65	13,20

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Dari tabel tersebut dapat diperoleh grafik kadar air optimum (W_{opt}) seperti pada Gambar 6 sebagai berikut :



Gambar 6. Grafik W_{opt} yang Menunjukkan Komposisi Campuran antara *Stone Crusher Waste* dan Tanah Asli

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Hasil pengujian *Proctor* menunjukkan bahwa kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum mengalami penurunan seiring peningkatan *Stone Crusher Waste*. Hal ini menunjukkan bahwa *Stone Crusher Waste* mampu mengoptimalkan daya dukung *subgrade* karena semakin kecil kadar air maka karakteristik *subgrade* semakin baik. W_{opt} material paling rendah diketahui pada campuran 100% *Stone Crusher Waste* + 0% Tanah Asli yakni 13,20%.

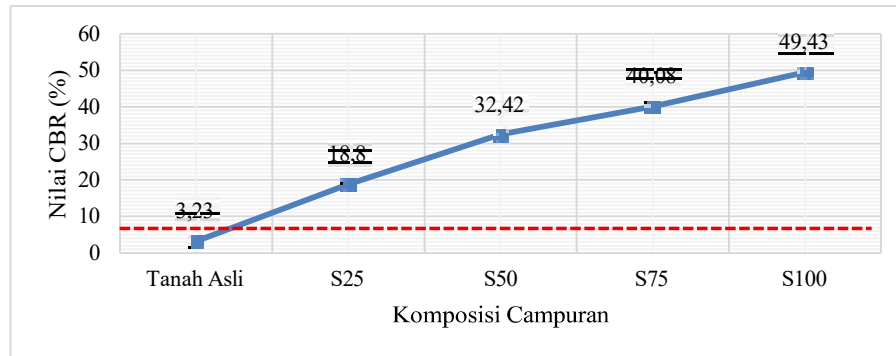
- Nilai *CBR*

Hasil pengujian *CBR* di 100% kepadatan kering maksimum pada sampel S25 (25% *Stone Crusher Waste*), S50 (50% *Stone Crusher Waste*), S75 (75% *Stone Crusher Waste*), & S100 (100% *Stone Crusher Waste*) dan nilai *CBR* tanah asli yang sudah ada sebelumnya tertera pada Tabel 10 dan grafik pada Gambar 7 sebagai berikut.

Tabel 10. Nilai CBR pada 100% Kepadatan Kering Maksimum

Komposisi Campuran	Nilai CBR (%)
Tanah Asli	3,23
S25	18,80
S50	32,42
S75	40,08
S100	49,43

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

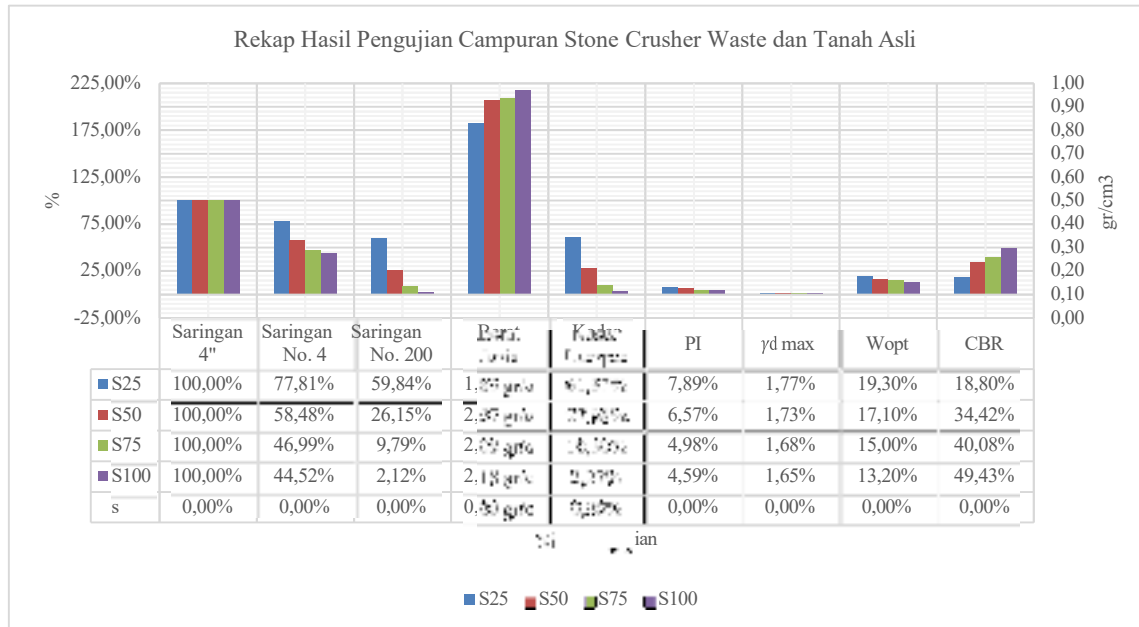
**Gambar 7. Grafik Nilai CBR**

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan Gambar 7, Nilai CBR menunjukkan peningkatan signifikan seiring peningkatan persentase *Stone Crusher Waste*. Seluruh nilai CBR pada komposisi campuran *Stone Crusher Waste* dan tanah asli melebihi ambang batas minimum 4% yang disyaratkan spesifikasi teknis proyek untuk *subgrade*. Hal ini menunjukkan bahwa *Stone Crusher Waste* mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah secara signifikan.

c. Penentuan Komposisi Campuran Optimum

Penentuan komposisi campuran optimum dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan evaluasi menyeluruh terhadap parameter hasil uji laboratorium, yaitu gradasi butiran, kadar air, kadar lumpur, berat jenis, batas Atterberg, kadar air optimum, kepadatan kering maksimum, dan nilai CBR. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi komposisi campuran yang mampu memberikan daya dukung *subgrade* tertinggi dengan tetap mempertahankan kestabilan plastisitas, kemampuan pemadatan, dan kesesuaian terhadap spesifikasi teknis proyek. Berikut hasil rekap pengujian yang sudah dilakukan :



Gambar 8. Rekap Hasil Pengujian Campuran *Stone Crusher Waste* dan Tanah Asli

Dari sisi gradasi, hanya campuran 75% *Stone Crusher Waste* + 25% Tanah Asli dan 100% *Stone Crusher Waste* yang memenuhi rentang batas atas dan bawah berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Hal ini menunjukkan bahwa kedua komposisi tersebut memiliki distribusi butiran yang baik untuk mendukung pemadatan dan stabilitas struktur.

Untuk parameter berat jenis, nilai tertinggi diperoleh pada 100% *Stone Crusher Waste*, yaitu 2,18 g/cm³. Berat jenis yang lebih tinggi umumnya berhubungan dengan potensi peningkatan daya dukung tanah. Namun, dari sisi plastisitas, campuran 75% *Stone Crusher Waste* + 25% Tanah Asli memiliki indeks plastisitas sebesar 4,77%, yang tergolong sangat rendah dan stabil terhadap perubahan kadar air.

Pada hasil uji Proctor, nilai kepadatan kering maksimum menurun dengan meningkatnya kadar *Stone Crusher Waste*. Campuran 75% *Stone Crusher Waste* + 25% Tanah Asli memiliki nilai γ_d sebesar 1,68 g/cm³ dengan kadar air optimum 15%, yang lebih tinggi dari 100% *Stone Crusher Waste* (γ_d = 1,65 g/cm³; Wopt = 13,2%). Artinya, walaupun 100% *Stone Crusher Waste* memberikan nilai CBR tertinggi (49,43%), kepadatan dan kontrol kelembapan dalam campuran 75% *Stone Crusher Waste* lebih mendukung untuk pelaksanaan konstruksi yang stabil dan konsisten.

Nilai CBR campuran 75% *Stone Crusher Waste* + 25% *Tanah Asli* adalah 40,08%, jauh di atas ambang batas minimum 4% dan mendekati nilai maksimum. Ini menunjukkan bahwa komposisi tersebut sudah sangat mencukupi untuk digunakan sebagai timbunan subgrade pada jalan hauling tanpa harus menggunakan 100% *Stone Crusher Waste* yang lebih ekstrem.

Dengan mempertimbangkan seluruh parameter teknis tersebut, terutama stabilitas plastisitas, kepadatan yang layak, dan daya dukung tinggi, maka komposisi 75% *Stone Crusher Waste* + 25% *Tanah Asli* dipilih sebagai komposisi campuran optimum dalam penelitian ini.

Dengan mempertimbangkan aspek teknis dan efisiensi pelaksanaan, maka komposisi **75% *Stone Crusher Waste* + 25% *Tanah Asli*** direkomendasikan sebagai campuran optimal untuk perbaikan subgrade.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis data timbunan perbaikan subgrade dengan substitusi *Stone Crusher Waste* yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. *Stone Crusher Waste* memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang mendukung sebagai bahan timbunan *subgrade*. Berdasarkan hasil analisis saringan, *Stone Crusher Waste* memiliki gradasi yang sesuai dengan spesifikasi timbunan di Spesifikasi Umum 2018. Kadar air *Stone Crusher Waste* sebesar 16,78% menunjukkan bahwa *Stone Crusher Waste* memiliki kemampuan menyerap air dalam jumlah sedang. Kadar lumpur *Stone Crusher Waste* sebesar 3,27% menunjukkan tingkat kebersihan yang baik. Berat jenisnya mencapai 2,18 g/cm³, menunjukkan partikel padat yang mendukung kekuatan struktur. Nilai batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas masing-masing sebesar 29,69%, 25,10%, dan 4,59% mengindikasikan plastisitas rendah. Sementara itu, nilai *CBR* sebesar 49,43% memperlihatkan kapasitas dukung yang sangat baik.
- b. Material *Stone Crusher Waste* memenuhi persyaratan teknis untuk digunakan sebagai material timbunan perbaikan subgrade. Seluruh variasi komposisi campuran *Stone Crusher Waste* dengan tanah asli (25%, 50%, 75%, dan 100% *Stone Crusher Waste*) menghasilkan nilai *CBR* yang jauh di atas ambang batas minimum 4% yang ditetapkan oleh spesifikasi teknis proyek *Indonesia Growth Project (IGP) Bahodopi Block 2 & 3*. Peningkatan nilai *CBR* dari tanah asli sebesar 3,23% menjadi 18,80% (S25); 32,42% (S50); 40,08% (S75); dan 49,43% (S100) secara signifikan menunjukkan peningkatan daya dukung tanah.
- c. Komposisi campuran optimum ditentukan berdasarkan evaluasi parameter gradasi, berat jenis, batas Atterberg, pemadatan, dan *CBR*. Campuran 75% *Stone Crusher Waste* + 25% Tanah Asli merupakan komposisi terbaik karena memberikan keseimbangan antara daya dukung tinggi (*CBR* 40,08%), plastisitas rendah, dan kemudahan dalam pengendalian kadar air.

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa saran untuk membuat hasil yang lebih akurat pada penelitian berikutnya :

- a. Perlu dilakukan pengujian lanjutan terhadap sifat durabilitas dan kinerja jangka panjang *Stone Crusher Waste* dalam kondisi lapangan, terutama terhadap perubahan iklim dan lalu lintas kendaraan berat pada jalan hauling.
- b. Penelitian serupa dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan parameter tambahan seperti permeabilitas dan uji pembebanan berulang untuk menilai ketahanan material terhadap deformasi dan erosi.
- c. Disarankan agar penerapan *Stone Crusher Waste* dalam skala proyek mempertimbangkan sistem kontrol kualitas yang ketat, terutama dalam hal homogenitas pencampuran dan pengendalian kadar air selama proses pemadatan.
- d. Perlu adanya integrasi antara hasil penelitian ini dengan pedoman teknis, agar pemanfaatan *Stone Crusher Waste* sebagai material timbunan dapat dilakukan secara sistematis dan sesuai standar.
- e. Untuk proyek serupa di masa mendatang, pemanfaatan limbah lokal seperti *Stone Crusher Waste* hendaknya menjadi pertimbangan utama sebagai solusi teknik yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas untuk melaksanakan penelitian ini. Terima kasih juga kepada Dr. Ir. Juny Andry Suilstyo, S.T., M.T. yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan selama proses penelitian, serta memberikan saran yang berharga dalam setiap tahap penelitian ini.

Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta bagi kemajuan pembangunan infrastruktur di Indonesia.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, H., dkk. (2020). Fungsi Jalan Tambang dalam Pengembangan Infrastruktur Pertambangan. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 12(3), 215–223.
- Budi. (2011). *Pengujian CBR di Laboratorium*. Jakarta: Penerbit Teknik Sipil Nusantara.
- Daniel, D. E. (1994). *Geotechnical practice for waste disposal*. Chapman & Hall.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Darwis, H. D. (2017). *Rekayasa Perbaikan Tanah*. Surabaya: CV Mitra Cendekia Press.
- Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*. *Highway Research Record*, 139, 61–72.
- Giroud, J. P., & Noiray, L. (1981). Geotextile-reinforced unpaved road design. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(GT9), 1233–1254.
- Hardiyatmo, H. C. (1992). *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hidayat, R., dkk. (2021). Pengaruh Gradasi Agregat terhadap Stabilitas Campuran Aspal. *Jurnal Teknologi Sipil*, 10(2), 91–99.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

- Kumar, A., & Singh, M. (2018). Use of fly ash in soil stabilization: Review. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 7(3), 67–73.
- Lesama, M., dkk. (2013). Evaluasi Nilai CBR Tanah Dasar Jalan dengan Pengujian Laboratorium. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 101–109.
- Mardhatillah, J. (2022). *Pemanfaatan limbah abu batu sebagai material timbunan subgrade ditinjau dari nilai CBR (California Bearing Ratio)* (Tesis Magister, Universitas Islam Sultan Agung). <http://repository.unissula.ac.id/26313/>
- Mulyono, T. (2017). *Teknologi Bahan Konstruksi*. Yogyakarta: Andi Publisher.
- Musper, D. S. (2015). Analisa karakteristik agregat halus (limbah *stone crusher*) sebagai bahan campuran beton. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Pattimura*, 3(2), 45–54.
- Purwanti, D. I., dkk. (2023). Efisiensi Jalan Hauling dalam Mendukung Produktivitas Tambang. *Jurnal Teknik Transportasi Tambang*, 5(1), 30–38.
- SNI 03-1744-2002. (2002). *Spesifikasi umum untuk bahan timbunan perkerasan jalan*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-1965-1990. (1990). *Metode Pengujian Kadar Air Tanah*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-1966-1990.(1990). *Metode Pengujian Batas Plastis Tanah*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-1967-1990. (1990). *Metode Pengujian Batas Cair Tanah*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-6802-2002. (2002). *Metode pengambilan contoh uji tanah*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1743:2008. (2008). *Metode uji pemadatan tanah*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1744:2012. (2012). *Metode pengujian CBR laboratorium*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1969-2016. (2016). *Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1970-2016. (2016). *Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Badan Standardisasi Nasional.

- SNI ASTM C136. (2012). *Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sulistyo, J. A., Majid, K., Azrul, M., & Permata, B. (2024). Komposit aspal beton (AC-WC) dengan penambahan fly ash dan rubber waste untuk perkerasan jalan. *Jurnal Teknik SILITEK*, 4(2), 125–137.
- Sukirman, S. (1999). *Teknologi Perkerasan Jalan Lentur*. Bandung: Nova.