

Analisis Tingkat Kepadatan Timbunan Batu Menggunakan Pengujian *Water Replacement* di Ruas Tol Probowangi Paket 3B

Fernanda Rahmasari¹, Satria Apta Mozza Pratama¹, Sayed Ahmad Fauzan¹, Faluth Syifa¹

¹ Afiliasi: Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

Email: [*fernandarahmasari@gmail.com](mailto:fernandarahmasari@gmail.com); satriaapta5@gmail.com; sayed8376@gmail.com
faluthsyifa@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi tingkat kepadatan timbunan batu hasil galian gunung pada *subgrade* Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B (STA 23+925 – STA 25+550) menggunakan metode *Water Replacement*. Analisis dilakukan dengan membandingkan densitas lapangan terhadap densitas maksimum laboratorium untuk menghitung *Compaction Ratio* (CR) sebagai indikator keberhasilan pemadatan. Hasil pengujian pada 22 titik menunjukkan CR berkisar antara 101,1%–103,9% dengan rata-rata 102,52%, menandakan pemadatan lapangan efektif, homogen, dan melampaui spesifikasi minimal *Standard proctor* ($\geq 100\%$). Kadar air material mendekati *Optimum Moisture Content* (OMC = 16,5%), memastikan pemadatan optimal dan peningkatan sifat mekanik tanah seperti kuat geser dan CBR. Deviasi kepadatan relatif kecil (1,11%–3,93%) menunjukkan distribusi material seragam, energi pemadatan merata, dan *void ratio* berkurang, menghasilkan *subgrade* stabil terhadap deformasi lateral. Batu galian gunung dengan ukuran dominan 50–60 cm, angular, dan lebih besar dipecah mendukung *interlocking* yang baik menghasilkan *subgrade* stabil, padat, dan memiliki kapasitas dukung tinggi terhadap beban lalu lintas. Temuan ini menegaskan kelayakan teknis pemanfaatan material batu galian lokal sebagai timbunan *subgrade*, memberikan dasar ilmiah untuk efisiensi material, optimalisasi sumber daya, dan penguatan kualitas konstruksi jalan tol.

Kata Kunci: Timbunan batu; *Subgrade*; Jalan tol; *Water replacement*.

ABSTRACT

This study evaluates the compaction level of mountain rock excavation fill used as *subgrade* material on the Probolinggo–Banyuwangi Toll Road, Package 3B (STA 23+925–STA 25+550), using the *Water Replacement* method. The analysis was conducted by comparing in-situ dry density with the maximum laboratory dry density to determine the *Compaction Ratio* (CR) as an indicator of compaction performance. Test results from 22 locations show that the CR ranges from 101.1% to 103.9%, with an average value of 102.52%, indicating that field compaction is effective, homogeneous, and exceeds the minimum requirement of the *Standard proctor* specification ($\geq 100\%$). The moisture content of the material is close to the *Optimum Moisture Content* (OMC = 16.5%), ensuring optimal compaction conditions and contributing to improved mechanical properties such as shear strength and California Bearing Ratio (CBR). The relatively small density deviation (1.11%–3.93%) indicates uniform material distribution, evenly applied compaction energy, and a reduced void ratio, resulting in a *subgrade* that is stable against lateral deformation. The mountain rock material, characterized by a dominant particle size of 50–60 cm, angular shape, and the crushing of larger fragments, promotes effective *interlocking*, producing a dense and stable *subgrade* with high bearing capacity to withstand traffic loads. These findings confirm the technical feasibility of utilizing local mountain rock excavation material as *subgrade* fill, providing a scientific basis for material efficiency, resource optimization, and enhanced quality in toll road construction.

Key words: Rock fill; *Subgrade*; Toll road; *Water replacement* method.

Submitted:	Reviewed:	Revised	Published:
26 Des 2025	30 Des 2025	30 Des 2025	09 Feb 2026

PENDAHULUAN

Penelitian ini membahas mengenai material timbunan batu hasil galian gunung yang digunakan sebagai *subgrade* (lapisan badan jalan) pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B STA 23+925 – STA 25+550. Kajian difokuskan pada evaluasi kepadatan lapangan menggunakan metode *water replacement* untuk menilai kinerja pemadatan terhadap *standard proctor*. Objek penelitian mencakup karakteristik fisik material

serta efektivitas pemadatan lapangan dalam memenuhi persyaratan geoteknik untuk *subgrade* jalan tol kelas berat.

Masalah yang diidentifikasi adalah apakah material batu galian gunung mampu mencapai kepadatan lapangan sesuai syarat teknis $CR \geq 100\%$. Meskipun penggunaan material lokal menguntungkan secara ekonomis, granulometri berbatu besar menimbulkan risiko distribusi densitas yang tidak merata. Oleh karena itu,

dibutuhkan pengujian objektif untuk memastikan kinerja *subgrade* memenuhi standar perkerasan jalan tol. (Pasaribu & Simanullang, 2021; Pratama et al., 2025)

Pemadatan yang tidak sesuai dapat menimbulkan penurunan diferensial *subgrade*, retak, deformasi permanen, dan penurunan kapasitas dukung. Dampak ini berimplikasi pada peningkatan biaya pemeliharaan dan pengurangan umur layan perkerasan. Kesalahan pada tahap konstruksi berpotensi menimbulkan konsekuensi struktural, ekonomis, dan keselamatan pengguna jalan.

Ketidakteraturan densitas disebabkan oleh variasi ukuran batu, ketidakkonsistenan kadar air, dan intensitas pemadatan yang tidak merata. Selain itu, metode uji densitas yang kurang tepat, seperti *sand cone test* pada material berbatu besar, dapat menghasilkan data tidak representatif. Faktor-faktor ini menghambat tercapainya kepadatan optimal pada lapangan. (Shakhan et al., 2022)

Solusi yang diterapkan adalah penggunaan metode *water replacement*, yang terbukti lebih akurat untuk material granular besar dibanding *sand cone test*. Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi efektivitas *water replacement* dan prosedur pemadatan material lokal agar $CR \geq 100\%$, sehingga dapat digunakan sebagai timbunan *subgrade* layak pada jalan tol. (Pratama et al., 2025)

Jika $CR \geq 100\%$ tercapai secara konsisten, material batu galian gunung dapat menggantikan timbunan konvensional secara teknis dan ekonomis. Hal ini mendukung efisiensi biaya, pengurangan volume pembuangan, dan stabilitas *subgrade*. Temuan ini dapat menjadi dasar rekomendasi teknis dan kebijakan pemanfaatan material lokal pada proyek jalan tol maupun bendungan dan infrastruktur strategis lainnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kepadatan timbunan batu hasil galian gunung pada konstruksi badan jalan di Ruas Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B melalui pengujian *water replacement*, dengan maksud memastikan kesesuaian mutu timbunan terhadap spesifikasi teknis konstruksi jalan tol. Selain itu, penelitian ini membandingkan densitas lapangan dengan densitas maksimum laboratorium untuk menghitung *compaction ratio* sebagai indikator keberhasilan pemadatan. Penelitian juga diarahkan untuk menilai kelayakan teknis penggunaan batu galian gunung sebagai material *subgrade*, khususnya dari aspek stabilitas dan daya dukung terhadap beban lalu lintas. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi penerapan material lokal dalam konstruksi jalan, mendukung efisiensi proyek dan optimalisasi sumber daya.

Penelitian ini bermanfaat untuk menghasilkan alternatif material konstruksi baru yang memiliki

kinerja teknis memadai namun tetap berorientasi pada keberlanjutan. Temuan penelitian diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan inovasi material pada bidang teknik sipil, khususnya terkait optimalisasi pemanfaatan sumber daya dan efisiensi pemeliharaan infrastruktur. Selain itu, penelitian ini berpotensi mendukung pengambilan keputusan pada tahap perencanaan dan desain konstruksi melalui penyediaan data empiris berbasis hasil pengujian laboratorium.

- Penelitian dibatasi pada pekerjaan *subgrade* timbunan batu di Ruas Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B STA 23+925 – STA 25+550.
- Analisis kepadatan lapangan hanya menggunakan metode *water replacement*, tanpa perbandingan dengan metode pengujian lainnya.
- Objek material yang dikaji terbatas pada batu galian gunung sebagai material timbunan badan jalan.
- Acuan pembandingan kepadatan hanya mencakup p_{max} dan OMC hasil uji *standard proctor* laboratorium.
- Penelitian tidak mengevaluasi variabel pemadatan seperti jenis alat, jumlah lintasan, dan metode pemadatan.
- Evaluasi hasil dibatasi pada pemenuhan spesifikasi derajat kepadatan *subgrade*, tanpa menilai kinerja lapisan perkerasan di atasnya.
- Penelitian tidak membahas perilaku deformasi jangka panjang maupun monitoring penurunan pascakonstruksi.

Lapisan *subgrade* adalah fondasi utama perkerasan jalan yang memikul dan mendistribusikan beban vertikal dari lalu lintas ke tanah dasar. Mutu dan kepadatan *subgrade* sangat menentukan daya dukung dan ketahanan struktur jalan terhadap deformasi dan kerusakan. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pemadatan signifikan meningkatkan nilai CBR dan kekakuan *subgrade*, sehingga memperkuat kapasitas dukung dan mengurangi kebutuhan tebal perkerasan (Sakhan et al., 2022). Oleh karena itu, kontrol mutu pemadatan pada *subgrade* adalah aspek krusial dalam desain dan konstruksi jalan.

Dalam kondisi material *native/subgrade* kurang cocok, material granular kasar, seperti batu galian gunung atau agregat kasar, bisa dijadikan alternatif timbunan. Agregat kasar memberikan struktur dengan *interlocking* antar butir yang baik, menghasilkan modulus elastisitas lebih tinggi setelah pemadatan, serta lebih tahan terhadap deformasi permanen dibanding tanah halus. Studi modern menunjukkan bahwa penggunaan timbunan granular kasar, jika dipadatkan dengan

benar, mampu memberikan stabilitas mekanis dan daya dukung yang memadai untuk perkerasan jalan berat (Sari & Suwardo, 2018). Pemanfaatan material lokal seperti batu galian juga mendukung efisiensi biaya, logistik, dan keberlanjutan proyek, terutama di daerah dengan akses material terbatas. Pemadatan material timbunan bertujuan mengurangi rongga udara dan meningkatkan densitas kering (ρ_d), yang secara langsung mempengaruhi kekuatan dan kekakuan *subgrade*. (Bharath et al., 2021; Kraszewski et al., 2022) Evaluasi densitas dan kepadatan kering biasanya menggunakan parameter hasil uji laboratorium (densitas maksimum ρ_{max} dan kadar air optimum OMC) dibandingkan dengan kondisi lapangan menghasilkan derajat kepadatan, atau *Compaction Ratio* (CR). Penelitian terkini menunjukkan bahwa semakin tinggi CR, semakin besar kekakuan dan kapasitas dukung *subgrade*, serta semakin rendah deformasi akibat beban berulang (Taqwa et al., 2019). Penggunaan metode kompaksi dan kontrol kadar air yang sesuai terbukti meningkatkan nilai CBR dan stabilitas *subgrade*, yang berimplikasi pada pengurangan ketebalan lapisan perkerasan dan efisiensi biaya konstruksi (Awarri & Otto, 2023).

Kepadatan tanah adalah parameter geoteknik yang menunjukkan hubungan antara berat isi tanah dan volumenya. Kepadatan kering yang tinggi identik dengan berkurangnya volume pori udara sehingga tanah memiliki kekuatan geser, modulus elastisitas, dan kapasitas dukung yang lebih baik dalam menahan beban lalu lintas. Rumus dasar untuk menentukan densitas kering (*dry density*) ditunjukkan pada persamaan 1 (Azzahra & Latif, n.d.; Hardiyatmo, 2018; SNI, 2008):

$$\rho_d = \frac{\rho_b}{1+w} \quad \dots (1)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} \rho_d &= \text{densitas kering tanah (t/m}^3\text{)} \\ \rho_b &= \text{densitas basah tanah (t/m}^3\text{)} \\ w &= \text{kadar air (\% berat)} \end{aligned}$$

Evaluasi hasil pemadatan lapangan dilakukan dengan membandingkan densitas kering lapangan terhadap densitas maksimum hasil uji *Standard Proctor*. Nilai ini disebut derajat kepadatan (*Compaction Ratio*/CR), yang rumusnya ditunjukkan pada persamaan 2 (Kurniawan et al., 2022):

$$CR(\%) = \frac{\rho_{d, \text{lapangan}}}{\rho_{d, \text{max}}} \times 100\% \quad \dots (2)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} CR &= \text{compaction ratio} \\ \rho_{d, \text{lapangan}} &= \text{densitas kering lapangan (t/m}^3\text{)} \\ \rho_{d, \text{max}} &= \text{densitas kering maksimum laboratorium} \end{aligned}$$

Pada proyek jalan tol CR $\geq 100\%$ merupakan persyaratan minimal untuk memastikan stabilitas struktural *subgrade* (Bina Marga, 2021).

Metode *water replacement* digunakan untuk material timbunan berbatu yang tidak dapat diuji secara akurat menggunakan sand cone karena rongga antar agregat mengganggu pembacaan volume galian. Pendekatan ini menentukan volume lubang (*test hole*) berdasarkan perpindahan volume air. Rumus penghitungan volume galian ditunjukkan pada persamaan 3 (Sanjaya et al., 2020; SNI, 1994).

$$V = \frac{W_w}{\rho_w} \quad \dots (3)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} V &= \text{volume lubang (m}^3\text{)} \\ W_w &= \text{berat air yang mengisi lubang (kg)} \\ \rho_w &= \text{densitas air (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Setelah volume lubang diperoleh, densitas basah lapangan dihitung melalui persamaan 4:

$$\rho_b = \frac{W_s}{V} \quad \dots (4)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} \rho_b &= \text{densitas basah lapangan (t/m}^3\text{)} \\ W_s &= \text{berat sampel basah (ton)} \\ V &= \text{densitas air (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Nilai ρ_b (densitas basah lapangan) pada persamaan (4) selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai ρ_d (densitas kering tanah) pada persamaan 1 dan menghitung nilai CR (*compaction ratio*) pada persamaan 2.

Material batu galian gunung memiliki karakteristik interlocking antar butiran yang baik, sehingga setelah pemadatan mampu membentuk struktur yang stabil dengan deformasi lateral yang rendah dan kekakuan yang lebih tinggi. Mekanisme penguncian agregat besar menjadikan material tersebut ideal untuk timbunan badan jalan dan *subgrade* jalan tol apabila densitas kering memenuhi spesifikasi ($> 100\%$ *Standard proctor*), (Syahputra et al., 2020; Wijaya et al., 2025)

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada pekerjaan *subgrade* Ruas Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B STA 23+925 – STA 25+550, dengan pengujian kepadatan dilakukan langsung di lapangan pada area timbunan batu. Pengumpulan data dilaksanakan selama pekerjaan konstruksi berlangsung



Gambar 1. Peta lokasi penelitian (sumber: analisis penulis, 2025)

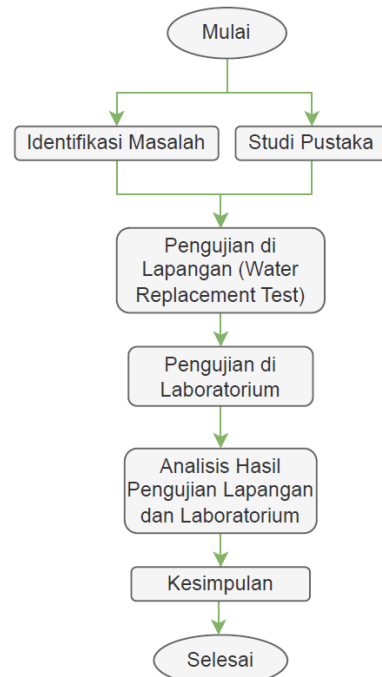
Variabel Penelitian

Jenis-jenis variabel penelitian yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif analitis, yang bertujuan mengevaluasi tingkat kepadatan lapangan pada timbunan batu berdasarkan perbandingan densitas kering lapangan terhadap densitas maksimum hasil uji *Standard proctor*. Analisis dilakukan pada tiap layer pekerjaan untuk memastikan kesesuaian terhadap spesifikasi teknis

subgrade jalan tol ($CR \geq 100\%$). Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Bagan alir penelitian (sumber: analisis penulis, 2025)

Tabel 1. Variabel penelitian

Jenis Variabel	Nama Variabel	Parameter
Variabel utama	Kepadatan lapangan timbunan batu	ρ_d lapangan, CR
Variabel pendukung	Kondisi material	kadar air, ukuran agregat
Acuan pembanding	Parameter uji laboratorium	Pmax, OMC

(sumber: analisis penulis, 2025)

Sumber dan Jenis Data

Berikut merupakan jenis data beserta sumbernya:

1. Data primer: hasil pengujian *water replacement* di lapangan, termasuk berat sampel basah, kadar air, volume lubang, dan posisi pengujian.
2. Data sekunder: data pengujian laboratorium *standard proctor* ($\rho_{max} = 1,627 \text{ g/cm}^3$ dan $OMC = 16,5\%$), gambar desain timbunan, dan spesifikasi teknis pekerjaan tanah.

Peralatan Penelitian

Peralatan utama yang digunakan mengacu pada standar ASTM D5030 antara lain:

1. Timbangan lapangan,
2. Oven,
3. Pelapis plastik,
4. Plat uji logam,
5. Pompa air,
6. Selang,
7. Pipa ukur,
8. Saringan no.4 dan 75 mm,



Gambar 3. Peralatan penelitian (sumber: diolah penulis dari berbagai sumber, 2025)

Prosedur Penelitian

Prosedur pelaksanaan pengujian kepadatan *water replacement* meliputi tahapan berikut:

1. Serta alat bantu penggalian sumur uji Menentukan titik uji dan melakukan leveling permukaan lapisan,
2. Mengebor/menggali sumur uji sesuai diameter plat uji logam,
3. Mengukur dimensi sumur uji dan memasang pelapis plastik,

4. Mengisi sumur dengan air, menimbang massa air untuk menentukan volume lubang,
5. Mengambil sampel material dari area galian untuk menentukan kadar air,
6. Menghitung densitas basah dan densitas kering menggunakan persamaan (4) dan persamaan (1),
7. Menghitung nilai *Compaction Ratio* (CR) menggunakan persamaan (2),
8. Membandingkan nilai CR dengan spesifikasi teknis ($\geq 100\%$).



Gambar 4. Dokumentasi pengujian

(sumber: diambil penulis dari lapangan, 2025)

Kriteria Hasil Pengujian

Hasil pengujian pada masing-masing layer dinyatakan memenuhi spesifikasi apabila nilai $CR \geq 100\%$. Jika tidak memenuhi spesifikasi,

dilakukan perbaikan (*recompaction*) dan uji ulang (*retest*) pada titik berjarak ≤ 200 m dari titik sebelumnya, selaras dengan pedoman pelaksanaan proyek.

Teknik Analisis Data

Data hasil uji lapangan dianalisis melalui langkah sebagai berikut:

1. Validasi data volume, kadar air, dan densitas per titik pengujian,
2. Perhitungan densitas kering dan nilai CR tiap layer,
3. Penyajian hasil dalam bentuk tabel dan grafik tren kepadatan per STA dan per lapis,
4. Interpretasi capaian CR terhadap standar pekerjaan tanah jalan tol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian

Hasil pengujian *water replacement* pada timbunan batu di Ruas Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B STA 23+925 – STA 25+550, ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil pengujian kepadatan lapangan menggunakan metode *water replacement* pada timbunan batu badan jalan di Ruas Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B menunjukkan bahwa mutu pemadatan secara konsisten memenuhi persyaratan teknis *standard proctor*. Seluruh 22 titik pengujian pada rentang STA 23+925 hingga STA 25+525 menghasilkan nilai densitas kering lapangan di atas densitas maksimum laboratorium ($MDD = 1,627 \text{ gr/cm}^3$) dengan kadar air optimum ($OMC = 16,5\%$). Nilai *Compaction Ratio* (CR) tercatat berada pada rentang 101,10% hingga 103,90%, dengan rata-rata 102,52%, menunjukkan bahwa kepadatan aktual lapangan melampaui standar minimal $CR \geq 100\%$ untuk konstruksi *subgrade* jalan tol. Deviasi positif sebesar 2,52% terhadap MDD mengindikasikan bahwa material batu galian gunung yang digunakan memiliki kemampuan interlocking efektif terhadap energi pemadatan, sehingga menghasilkan struktur timbunan yang padat, stabil, dan berpotensi memiliki ketahanan deformasi lateral serta kapasitas dukung *subgrade* yang tinggi terhadap repetisi beban lalu lintas.

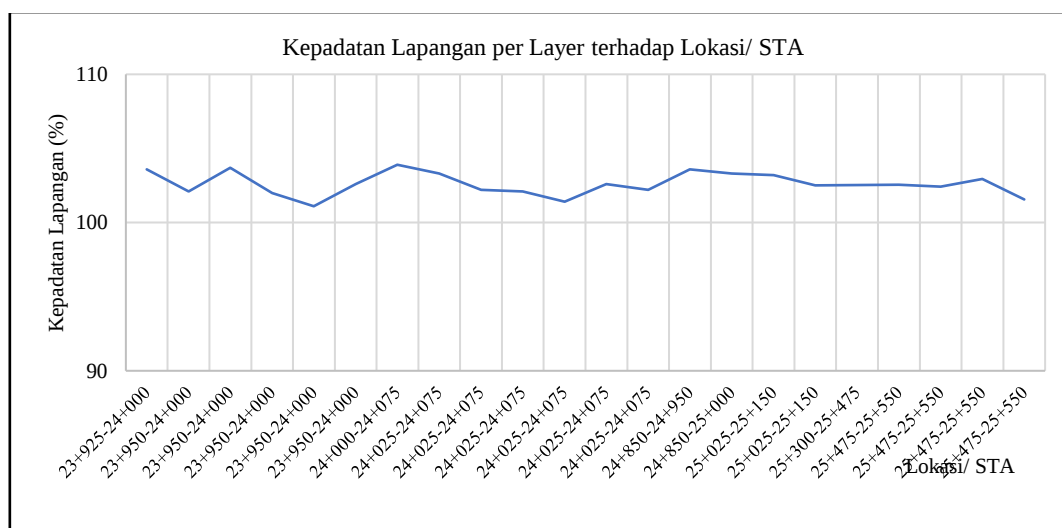
Tabel 2. Tabel *summary water replacement test*

No	Tebal Layer	Sta	R/L	Mdd Lab (Gr/Cc)	Omc (%)	Mdd Field (Gr/Cc)	Kepadatan Lapangan (%)	Deviasi %
1	60	23+972	L	1627	16.5	1686	103.60	3,63
2	60	23+975	L	1627	16.5	1661	102.10	2,09
3	60	23+975	L	1627	16.5	1688	103.70	3,75
4	60	23+925	L	1627	16.5	1659	102.00	1,97
5	60	23+975	L	1627	16.5	1645	101.10	1,11
6	60	23+975	L	1627	16.5	1670	102.60	2,64
7	60	24+065	L	1627	16.5	1691	103.90	3,93
8	60	24+060	L	1627	16.5	1681	103.30	3,32
9	60	24+050	L	1627	16.5	1662	102.20	2,15
10	60	24+050	L	1627	16.5	1661	102.10	2,09
11	60	24+050	L	1627	16.5	1650	101.40	1,41
12	60	24+055	L	1627	16.5	1664	102.60	2,27
13	60	24+050	L	1627	16.5	1663	102.20	2,21
14	60	24+900	L	1627	16.5	1686	103.60	3,63
15	60	24+925	R	1627	16.5	1681	103.30	3,32
16	60	25+100	I	1627	16.5	1680	103.20	3,26
17	60	25+075	R	1627	16.5	1668	102.50	2,52
18	60	25+350	L/R	1627	16.5	1668	102.54	2,52
19	60	25+500	L	1627	16.5	1669	102.56	2,58
20	60	25+500	L2	1627	16.5	1666	102.42	2,40
21	60	25+500	R	1627	16.5	1675	102.94	2,95
22	60	25+525	L/R	1627	16.5	1653	101.57	1,60

(sumber: analisis penulis, 2025)

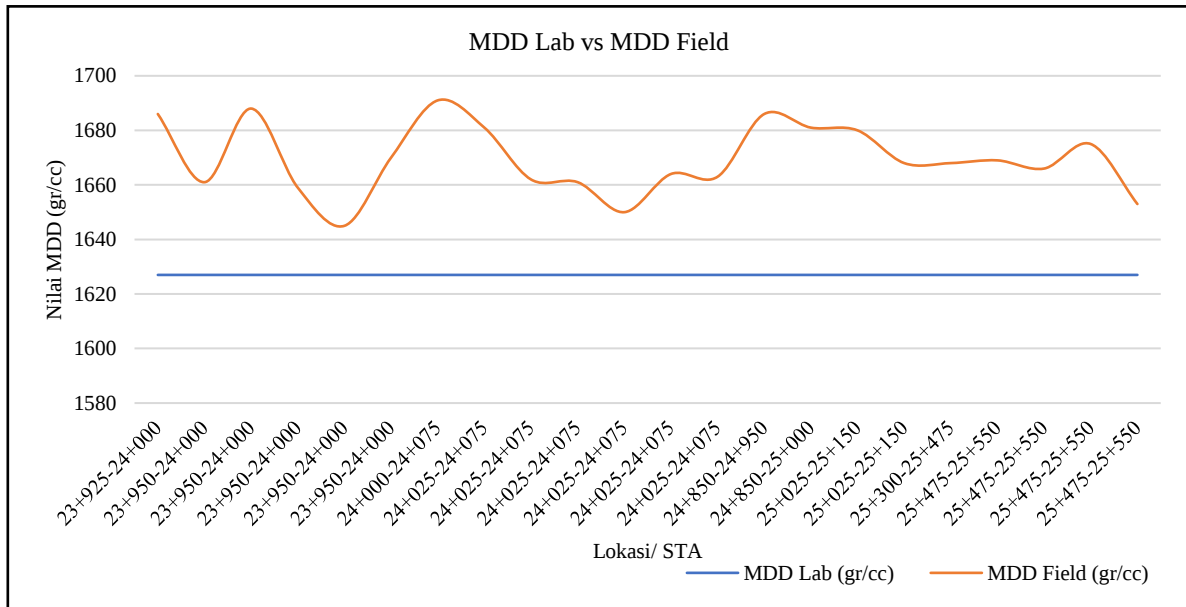
Hasil pengukuran kepadatan lapangan pada segmen proyek STA 23+925 hingga 25+550 disajikan pada Gambar 4. yang menunjukkan bahwa kualitas pemadatan material timbunan berada di atas standar minimum yang ditetapkan. Seluruh titik uji (N = 22) mencatat derajat kepadatan lapangan (*field density*) yang melebihi kepadatan kering maksimum laboratorium, dengan rata-rata sebesar 102,76% (Data Uji Kepadatan Lapangan, 2025). Nilai kepadatan berkisar antara 101,1% hingga 103,9%, menunjukkan variasi yang relatif kecil dan berada

dalam kendali teknis. Pencapaian kepadatan di atas 100% ini memiliki implikasi langsung terhadap peningkatan sifat mekanik tanah, termasuk kuat geser dan *California Bearing Ratio* (CBR), yang menjadi indikator utama kemampuan dukung dan stabilitas *subgrade* (Hardiyatmo, 2014). Konsistensi hasil ini menandakan pengendalian kadar air material mendekati *Optimum Moisture Content* (OMC) selama pemadatan, sehingga struktur timbunan memiliki kerangka yang padat dan mengurangi risiko penurunan diferensial (Sukirman, 2010).

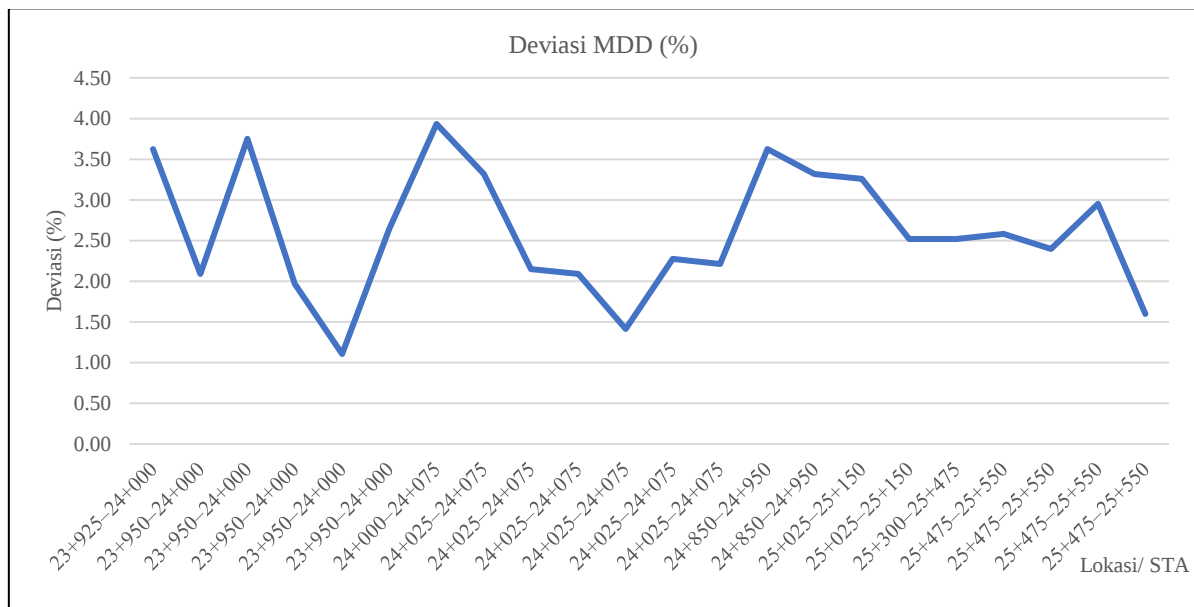
**Gambar 4.** Grafik kepadatan lapangan per layer terhadap lokasi/ STA (Analisis penulis, 2025)

Data lapangan mencatat MDD *field* antara 1,645 hingga 1,691 gr/cc, dengan rata-rata 1,667 gr/cc, sehingga derajat kepadatan lapangan berkisar antara 101,10%–103,90% (Data Uji Kepadatan Lapangan, 2025). Variasi kepadatan antar titik relatif kecil, menunjukkan konsistensi pemadatan yang baik pada seluruh segmen proyek. Pencapaian ini mengindikasikan bahwa

pemadatan lapangan efektif, kadar air material mendekati OMC = 16,5%, serta *subgrade* mampu mendukung beban lalu lintas dan menyalurkan tegangan ke lapisan di bawahnya secara optimal (Hardiyatmo, 2014; Sukirman, 2010). Untuk lebih jelasnya, grafik MDD laboratorium terhadap MDD *field* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik MDD laboratorium terhadap MDD *field* (Analisis penulis, 2025)



Gambar 6. Grafik Deviasi MDD (Analisis penulis, 2025)

Data lapangan mencatat deviasi kepadatan dari densitas maksimum laboratorium berkisar antara 1,11 % hingga 3,93 %, menunjukkan konsistensi pemadatan yang baik dan keseragaman distribusi material (derajat kepadatan lapangan 101,1 %–103,9 %), seperti disajikan pada Gambar 6. Rentang deviasi yang relatif kecil ini menandakan bahwa pemadatan dilakukan dengan kontrol kadar air dan energi pemadatan yang tepat sehingga void

ratio tanah berkurang dan densitas kering meningkat, menghasilkan *subgrade* dengan struktur padat dan stabil. Temuan ini sejalan dengan hasil laboratorium dan studi empiris terbaru yang menunjukkan bahwa kepadatan dan kadar air pada saat pemadatan sangat memengaruhi kekuatan geser dan modulus elastisitas tanah *subgrade* misalnya, kompaksi pada kadar air optimum meningkatkan shear

strength tanah tak jenuh (Waqar & Uchimura, 2023). Selain itu, penelitian terhadap pengaruh *moisture content* terhadap *resilient modulus subgrade* menunjukkan bahwa variasi kelembaban signifikan mempengaruhi kekakuan tanah dan performa perkerasan jangka panjang (Elsharief et al., 2024). Oleh karena itu, capaian densitas dan deviasi kecil pada proyek ini tidak hanya memenuhi spesifikasi teknis tetapi juga memperkuat validitas penggunaan material timbunan batu galian gunung sebagai *subgrade* yang andal untuk jalan tol.

Analisis dan Pembahasan

1. Klasifikasi Batu Timbunan: Batu galian gunung diklasifikasikan sebagai *rockfill coarse granular fill*, dengan distribusi ukuran dominan 50–60 cm dan bentuk angular yang mendukung interlocking. Sesuai standar Bina Marga dan USDA, batu ini memiliki drainase baik, stabilitas tinggi terhadap deformasi lateral, dan kapasitas dukung *subgrade* yang memadai (Elsharief et al., 2024). Batu yang lebih besar dari 60 cm dipecah terlebih dahulu agar energi pemadatan dapat diteruskan merata, memastikan timbunan padat dan stabil, serta mampu menyalurkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya secara efektif.
2. Analisis Hasil Kepadatan dan Implikasi Teknis: Pencapaian *Compaction Ratio* (CR) melebihi 102% dengan deviasi relatif kecil (antara 1,11%–3,93%) pada 22 titik uji di segmen STA 23+925–25+550 menunjukkan bahwa timbunan batu badan jalan telah dipadatkan secara efektif di lapangan. Nilai densitas kering lapangan (MDD *field*) berkisar 1,645–1,691 gr/cm³ dengan rata-rata 1,667 gr/cm³, melampaui densitas maksimum laboratorium (MDD Lab = 1,627 gr/cm³), sehingga CR berkisar 101,1%–103,9%. Temuan ini menandakan bahwa kontrol kelembaban dan energi pemadatan telah dilaksanakan dengan baik, menghasilkan struktur timbunan padat dan homogen kondisi ideal untuk mendukung beban lalu lintas pada jalan tol tanpa risiko penurunan diferensial yang signifikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan bahwa tingkat Kepadatan *Subgrade*: Pemadatan timbunan batu pada segmen STA 23+925–25+550 mencapai *Compaction Ratio* (CR) 101,1%–103,9% dengan rata-rata 102,52%, menunjukkan pemadatan lapangan efektif dan melebihi spesifikasi minimal *standard proctor* ($\geq 100\%$), dengan densitas Lapangan (MDD *Field*) berkisar antara 1,645–1,691 gr/cm³ dengan rata-rata 1,667 gr/cm³,

melampaui densitas maksimum laboratorium (MDD Lab = 1,627 gr/cm³), sehingga *subgrade* memiliki struktur padat dan homogen. Kadar air material mendekati *Optimum Moisture Content* (OMC = 16,5%), memastikan pemadatan optimal dan peningkatan sifat mekanik tanah seperti kuat geser dan CBR. Deviasi kepadatan relatif kecil (1,11%–3,93%) menunjukkan distribusi material seragam, energi pemadatan merata, dan void ratio berkurang, menghasilkan *subgrade* stabil terhadap deformasi lateral. Batu galian gunung dengan ukuran dominan 50–60 cm, angular, dan lebih besar dipecah (>60 cm) mendukung *interlocking* efektif, drainase baik, dan kapasitas dukung *subgrade* memadai.

Sehingga menandakan bahwa kontrol kelembaban dan energi pemadatan telah dilaksanakan dengan baik, menghasilkan struktur timbunan padat dan homogen kondisi ideal untuk mendukung beban lalu lintas pada jalan tol tanpa risiko penurunan diferensial yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Awarri, G., & Otto, H. (2023). Subgrade compaction and its influence on pavement performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(5), 1124–1137. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10462540>
- Azzahra, S. A., & Latif, D. O. (n.d.). *Evaluasi Konstruksi Timbunan Batu Berdasarkan Perilaku, Stabilitas, dan Instrumentasi Geoteknik Timbunan pada Proyek Jalan Tol Probolinggo - Banyuwangi Paket 3* [Universitas Gadjah Mada]. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/242668>
- Bharath, A., Manjunatha, M., Ranjitha B., T., Reshma, T. V., & Preethi, S. (2021). Influence and correlation of maximum dry density on soaked & unsoaked CBR of soil. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3998–4002. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.04.232>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2021). *Petunjuk Pelaksanaan Jalan Tol (Edisi Revisi)*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR.
- Elsharief, A., Dafalla, H., & Awad, M. (2024). Influence of moisture variation on resilient modulus of subgrade soils in an Arid Region. *Geomate Journal*, 27(124), 104–111. <https://doi.org/10.21660/2024.124.4714>
- Hardiyatmo, D. (2014). *Teknik Pemadatan Tanah dan Subgrade Jalan*. Graha Ilmu.
- Hardiyatmo, D. (2018). *Geoteknik Dasar: Tanah dan Pemadatan*. Graha Ilmu.

- Hasil Pengujian Water Replacement di Ruas Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B STA 23+925–STA 25+550.* (2025). Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi.
- Kraszewski, C., Rafalski, L., & Gajewska, B. (2022). Effect of Compaction Ratio on Mechanical Properties of Low-Strength Hydraulically Bound Mixtures for Road Engineering. *Materials*, 15(4), 1561. <https://doi.org/10.3390/MA15041561>
- Kurniawan, F., Harahap, R., & Yusuf, A. (2022). Evaluasi derajat kepadatan timbunan granular menggunakan Standard Proctor. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 45–56.
- Pasaribu, H., & Simanullang, M. T. (2021). Hubungan Kekuatan Tanah Dasar dengan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). *Construct: Jurnal Teknik Sipil*, 1(1), 1–10. <https://ejournal.uhn.ac.id/index.php/construct/article/view/399>
- Pratama, S. A. M., Yudhistira, A. K., & Fauzan, S. A. (2025). Evaluasi Kepadatan Tanah dengan Metode Penggantian Volume Air pada Sumur Uji di Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3. *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, 4(3), 5672–5682. <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i3.2859>
- Sanjaya, A., Sutanto, B., & Pranoto, Y. (2020). Water replacement method untuk pengujian kepadatan timbunan berbatu. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(2), 145–158.
- Sari, S. P., & Suwardo, S. (2018). Metode pelaksanaan, Analisis Produktivitas, dan Durasi Pekerjaan Timbunan Material Tanah pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Batang – Semarang. In *Menara Ilmu Metode dan Teknologi Konstruksi Sipil UGM* (Ed.), *Simposium Forum Studi transportasi antar Perguruan Tinggi ke-21* (pp. 1–10). Universitas Brawijaya. <https://tekonsipil.sv.ugm.ac.id/2019/06/28/metode-pelaksanaan-produktivitas-dan-durasi-pekerjaan-timbunan-tanah-pada-proyek-jalan-tol/>
- Shakhan, M. R., Topal, A., & Sengoz, B. (2022). Impact of Subgrade Strength on Pavement Performance. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 501–508. <https://doi.org/10.21205/DEUFMD.2022247115>
- SNI. (1994). *SNI 03-3640-1994 Metode Pengujian Lapangan Kepadatan Tanah dengan Water Replacement*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI. (2008). *SNI 1743:2008 Kepadatan Kering Tanah dan Parameter Geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sukirman. (2010). *Pemadatan dan Kekuatan Subgrade*. ITB Press.
- Syahputra, A., Wijaya, F., & Firmansyah, R. (2020). Karakteristik batu galian sebagai material timbunan jalan. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(1), 21–34.
- Taqwa, F. M. L., Chayati, N., Alimuddin, A., & Salman, N. (2019). Pemeriksaan Hasil Pelaksanaan Pemadatan Timbunan Tanah di Lokasi Pembangunan Jalan Akses Gardu Induk PLN Kasus Pembangunan Gardu Induk PLN Pd. Indah II Kec. Ciputat Timur, Kota Tangerang Selatan. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 3(2), 15–19. <https://doi.org/10.32832/komposit.v3i2.3280>
- Waqar, A., & Uchimura, T. (2023). Effects of moisture content on shear strength of unsaturated soils. *Sustainability*, 15(6), 15065123. <https://doi.org/10.3390/su15065123>
- Wijaya, M. F., Lau, D., Ridwan, A., & Zikri, N. F. (2025). Analisis Kepadatan Tanah Timbunan untuk Jalan Akses Proyek (Studi Kasus: Kabupaten Siak). *Jurnal Forum Teknik Sipil (J-ForTekS)*, 5(2), 58–65. <https://doi.org/10.35508/forteks.v5i2.24973>