



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 5672-5682

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Evaluasi Kepadatan Tanah dengan Metode Penggantian Volume Air pada Sumur Uji di Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3

Satria Apta Mozza Pratama¹, Arya Kellyn Yudhistira², Sayed Ahmad Fauzan³

Departemen Teknik, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia, Indonesia

satriaapta5@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas analisis kepadatan tanah pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3 dengan menggunakan metode Water Replacement (ASTM D5030) sebagai alternatif dari metode konvensional sand cone test. Permasalahan utama dalam proyek ini adalah penggunaan material timbunan berbatu hasil galian dengan gradasi kasar yang menyulitkan pencapaian kepadatan merata serta akurasi pengukuran volume lubang uji. Pengujian dilakukan di lima titik lapangan pada berbagai layer timbunan, dengan prosedur penggalian lubang uji, pengukuran volume melalui penggantian air, dan perhitungan kadar air serta berat isi kering dibandingkan dengan hasil uji laboratorium (Proctor test). Hasil pengujian menunjukkan kadar air (w) lapangan berkisar antara 15,05–16,83%, mendekati Optimum Moisture Content (OMC) laboratorium sebesar 16,5%. Nilai berat isi kering (pd) berkisar 1,641–1,686 t/m^3 dengan rata-rata 1,662 t/m^3 , lebih tinggi dari Maximum Dry Density (MDD) laboratorium sebesar 1,627 t/m^3 . Persentase kepadatan seluruh titik uji $\geq 100\%$ dari MDD, dengan capaian tertinggi 103,6% pada titik 237+972 (L). Kondisi ini menunjukkan adanya over-compaction ringan akibat energi pemadatan lapangan yang tinggi, tetapi masih dalam batas yang dapat diterima. Secara keseluruhan, hasil penelitian membuktikan bahwa metode Water Replacement efektif diterapkan pada kondisi timbunan berbatu, serta mutu kepadatan lapangan telah memenuhi bahkan melampaui persyaratan SNI 6872:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018).

Kata kunci: Kepadatan Tanah, Water Replacement, Timbunan Berbatu, Over-Compaction, Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi, SNI 6872:2015, Bina Marga 2018

1. Latar Belakang

Pekerjaan timbunan dan pemadatan tanah merupakan aspek penting dalam pembangunan infrastruktur transportasi, khususnya jalan tol, karena kualitas pemadatan tanah dasar sangat memengaruhi kinerja struktur perkerasan dari segi kekuatan, stabilitas, dan umur layan (Sadek et al., 2022). Kegagalan perkerasan umumnya berkaitan dengan rendahnya kualitas tanah dasar akibat pemadatan yang tidak sesuai standar teknis. Di Indonesia, standar mutu pemadatan tanah diatur dalam Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) dan SNI 6872:2015, yang mensyaratkan pencapaian kepadatan minimal 95% dari hasil uji Modified Proctor. Namun, pada kondisi tanah bergradasi kasar atau dengan fraksi butiran besar, metode sand cone (ASTM D1556) sering mengalami keterbatasan akurasi dalam menentukan volume lubang uji (Peters et al., 2025). Untuk mengatasi hal ini, metode Water Replacement (ASTM D5030) menjadi alternatif yang lebih tepat karena air mampu mengisi rongga antar butiran sehingga memberikan hasil yang lebih presisi.

Penelitian terkini juga menegaskan keunggulan metode pengujian berbasis replacement method. Purwana et al. (2025) menunjukkan bahwa pengendalian mutu kepadatan dengan metode alternatif lapangan memberikan hasil yang lebih stabil pada material kasar, sementara studi lain menekankan bahwa perbedaan energi pemadatan lapangan dan laboratorium dapat menyebabkan nilai MDD aktual lebih tinggi dari hasil uji standar (Sadek et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan metode pengujian harus disesuaikan dengan karakter material di lapangan agar mutu konstruksi tetap terjamin.

Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi, yang ditetapkan sebagai salah satu Proyek Strategis Nasional (Perpres No. 109 Tahun 2020), menuntut penerapan metode uji kepadatan yang akurat karena ruas ini merupakan penghubung akhir jaringan Jalan Tol Trans-Jawa dengan fungsi strategis dalam konektivitas logistik

dan pengembangan ekonomi kawasan Jawa Timur (Kementerian PUPR, 2023). Meskipun kajian terkait Water Replacement sudah dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada material granular halus hingga sedang, sedangkan pada timbunan berbatu hasil galian jalan tol skala besar masih terbatas dilaporkan.

Dengan demikian, penelitian ini memiliki pembaruan pada penerapan metode Water Replacement (ASTM D5030) di lapangan timbunan berbatu Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, serta evaluasi efektivitasnya dalam memastikan pencapaian standar mutu kepadatan sesuai SNI 6872:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018). Hasilnya diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam penyusunan pedoman teknis pengujian kepadatan lapangan untuk kondisi material bergradasi kasar pada proyek infrastruktur strategis.

Identifikasi masalah

Pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, pemanfaatan hasil galian batu sebagai material timbunan memang memberikan keuntungan dari sisi ketersediaan material dan efisiensi biaya, namun juga menimbulkan tantangan teknis karena sifat material berbatu dengan gradasi kasar yang menyulitkan tercapainya kepadatan yang merata. Metode uji kepadatan konvensional, seperti sand cone test, terbukti kurang efektif digunakan karena rongga antar butiran kasar tidak dapat terisi sempurna oleh pasir, sehingga pengukuran volume lubang uji sering kali menghasilkan nilai yang kurang akurat (Peters et al., 2025; Sadek et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih sesuai, salah satunya Water Replacement Method (ASTM D5030), yang bekerja dengan prinsip penggantian volume air pada sumur uji. Metode ini dinilai lebih presisi untuk mengukur kepadatan lapangan pada material bergradasi kasar karena air mampu mengisi rongga dengan baik (Purwana et al., 2025). Dengan demikian, penerapan metode ini menjadi solusi untuk memastikan mutu pemadatan timbunan tetap memenuhi standar teknis sesuai SNI 6872:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) (Kementerian PUPR, 2023).

Water Replacement

Uji Water Replacement (ASTM D5030) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menentukan kepadatan tanah di lapangan, khususnya pada material timbunan dengan fraksi kasar yang signifikan. Prinsip dasar metode ini adalah mengukur volume lubang uji dengan cara mengisinya menggunakan air, kemudian menghitung berat tanah asli untuk memperoleh nilai densitas basah (γ_{wet}) dan densitas kering (γ_{dry}). Dibandingkan dengan Sand Cone Test (ASTM D1556), metode ini dinilai lebih presisi karena air mampu mengisi rongga antar butiran kasar dengan lebih baik, sehingga volume yang terukur lebih akurat (Peters et al., 2025; Sadek et al., 2022). Hasil penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan Water Replacement Method pada material timbunan berbatu menghasilkan nilai densitas kering yang lebih konsisten dibandingkan metode konvensional, terutama pada butiran dengan ukuran > 75 mm (Purwana et al., 2025). Hal ini sejalan dengan temuan Taufiq et al. (2021) yang menegaskan bahwa akurasi pengukuran volume merupakan faktor kunci dalam evaluasi keberhasilan pemadatan tanah di lapangan. Oleh karena itu, pemilihan metode Water Replacement pada pengujian di Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3 menjadi tepat, mengingat kondisi material timbunan yang dominan berbatu dan bergradasi kasar.

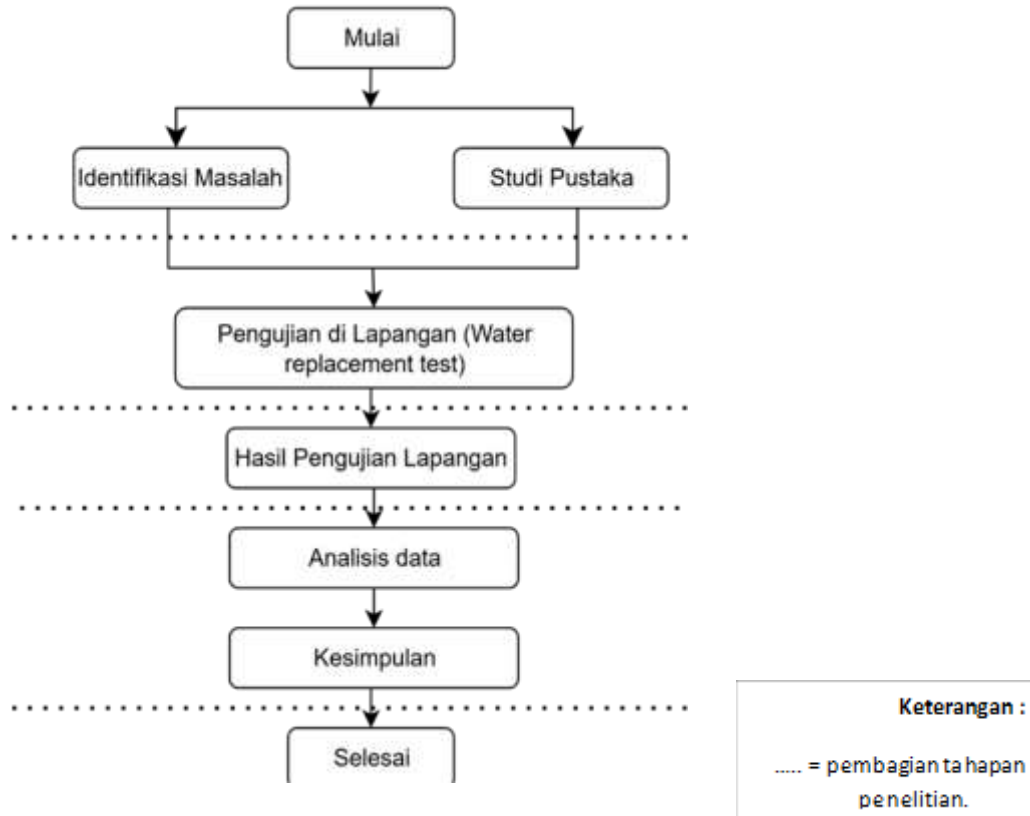
Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kepadatan tanah dan batuan di lapangan dengan menghitung berat isi material melalui metode Water Replacement. Prinsip metode ini adalah menghitung volume lubang uji dengan mengisinya menggunakan air, sehingga diperoleh nilai densitas basah maupun densitas kering material (Peters et al., 2025). Tujuan utama dari pengujian ini adalah sebagai bentuk kontrol mutu konstruksi, untuk memastikan bahwa material timbunan telah dipadatkan hingga mencapai berat isi tertentu atau persentase dari berat isi maksimum yang ditentukan melalui pengujian laboratorium (Sadek et al., 2022; Taufiq et al., 2021). Dengan demikian, hasil pengujian dapat menjadi dasar penilaian kualitas pemadatan pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, serta memastikan kesesuaian dengan standar teknis nasional yang berlaku (SNI 6872:2015; Bina Marga, 2018).

2. Metode Penelitian

Lokasi dan Kondisi Uji

Pengujian kepadatan tanah dengan metode Water Replacement dilaksanakan pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, berikut adalah flowchart alur penelitian pada gambar 1



Gambar 1

Alur penelitian

Penjelasan Alur Penelitian

Berdasarkan bagan alur di atas, penelitian diawali dengan tahap identifikasi masalah dan studi pustaka. Identifikasi masalah dilakukan untuk mengetahui kendala utama di lapangan, khususnya kesulitan dalam menentukan kepadatan tanah berbatu menggunakan metode konvensional. Studi pustaka kemudian dilakukan dengan mengumpulkan literatur, standar teknis, serta penelitian terdahulu yang relevan, guna memperkuat dasar teori mengenai metode uji kepadatan tanah, termasuk metode *Water Replacement* (ASTM D5030) yang dianggap lebih sesuai untuk kondisi tanah bergradasi kasar. Tahapan awal ini menjadi dasar penting agar penelitian terarah dan sesuai dengan kebutuhan proyek.

Selanjutnya, penelitian dilanjutkan dengan pelaksanaan pengujian lapangan menggunakan metode *Water Replacement* untuk memperoleh data primer berupa volume lubang uji, berat tanah asli, serta kadar air. Data yang diperoleh kemudian diolah melalui tahap analisis untuk menghitung densitas basah, densitas kering, serta membandingkannya dengan standar kepadatan menurut SNI 6872:2015 dan Spesifikasi Bina Marga (2018). Hasil perhitungan ini menjadi acuan dalam penarikan kesimpulan, yaitu apakah kepadatan tanah di lokasi penelitian sudah memenuhi standar teknis. Pada tahap akhir, penelitian menyajikan kesimpulan dan rekomendasi

teknis terkait efektivitas metode *Water Replacement* dalam pengendalian mutu pemadatan tanah untuk proyek jalan tol.

Standart acuan

- a) ASTM D5030 – *Water Replacement Method*
- b) SNI 1742:2008 – Uji kepadatan tanah di lapangan
- c) SNI 6872:2015 – Persyaratan kepadatan timbunan jalan

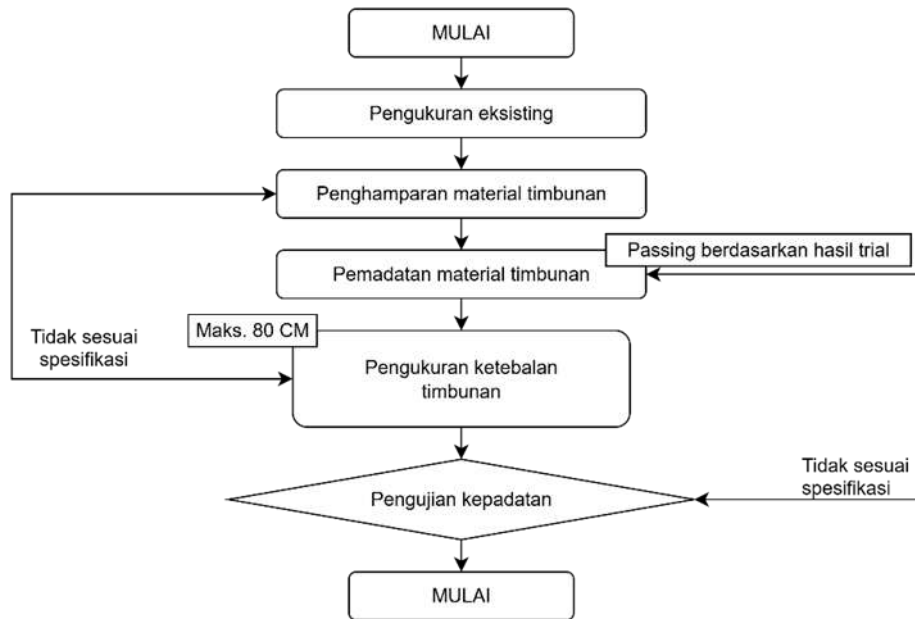
Alat Berat yang Digunakan untuk Penghamparan dan Pemadatan

Alat berat yang berperan dalam proses penghamparan dan pemadatan, serta berkaitan langsung dengan pelaksanaan uji kepadatan tanah ini, antara lain:

- a) *Dozer*, digunakan untuk menghampar material timbunan sekaligus membentuk lapisan dengan ketebalan sesuai spesifikasi, yaitu maksimum 80 cm per layer.
- b) *Sheepfoot Roller*, berfungsi sebagai alat pemadat dengan mekanisme penekanan dan peremasan tanah, sehingga dapat meningkatkan kepadatan pada bagian lapisan yang lebih dalam.
- c) *Vibratory Roller*, dipakai untuk memadatkan lapisan bagian atas atau permukaan akhir dengan getaran mekanis, sehingga diperoleh kepadatan merata sesuai standar.
- d) *Water Tank Truck*, digunakan untuk menyediakan dan menyemprotkan air sesuai kebutuhan, baik dalam proses pemadatan maupun dalam pelaksanaan pengujian kepadatan lapangan.

Prosedur pemadatan untuk timbunan batu

Pemadatan timbunan batu harus dilaksanakan dengan menggunakan penggilas berkisi (*grid roller*), pemadat bervibrasi, atau peralatan lain yang setara. Setiap lapis timbunan harus terdiri dari batu dengan gradasi menerus sehingga seluruh rongga dapat terisi secara merata. Batu tidak diperkenankan digunakan pada lapisan teratas setebal 10 cm, dan batu berdimensi lebih besar dari 45 cm tidak boleh disertakan pada lapisan ini. Tebal lapisan timbunan ditetapkan maksimal 60 cm dengan persyaratan pemadatan minimal 6 lintasan (*passing*) SD/SF menggunakan alat pemadat dengan berat minimum 10 ton. Pengujian kepadatan dilakukan pada setiap lapis timbunan yang dipadatkan sesuai dengan SNI 6872:2015, di mana metode yang dipakai untuk penerimaan kepadatan lapangan adalah Prosedur A (*dry density control*) dengan target kepadatan kering lebih dari 1,68 t/m³. Untuk setiap volume timbunan 5.000 m³, harus dilakukan pengujian kepadatan, atau dapat pula didasarkan pada hasil *trial compaction* yang terlebih dahulu dilakukan di lapangan terhadap material yang telah ditentukan dengan variasi jumlah lintasan peralatan pemadat di bawah pengawasan pengawas pekerjaan.



Gambar 2

Flowchart Pemadatan

Penjelasan flowchart pemadatan

Diagram alur tersebut menggambarkan prosedur pelaksanaan pekerjaan timbunan yang harus dilakukan secara sistematis untuk menjamin kualitas konstruksi. Tahap pertama dimulai dengan pengukuran eksisting, yang bertujuan untuk mengetahui kondisi lapangan aktual sebelum dilakukan penimbunan. Pengukuran ini mencakup elevasi, kontur, dan kesesuaian dengan desain perencanaan sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan volume material yang dibutuhkan. Tahap ini sangat penting karena kesalahan pada pengukuran awal akan berdampak pada akurasi volume pekerjaan serta kestabilan struktur timbunan.

Tahap selanjutnya adalah penghamparan material timbunan yang harus dilakukan secara merata sesuai ketebalan desain. Proses ini dilanjutkan dengan pemadatan menggunakan alat berat, di mana metode pemadatan serta jumlah lintasan ditentukan berdasarkan hasil *trial compaction* yang dilakukan sebelumnya. *Trial compaction* berfungsi untuk mencari kombinasi terbaik antara jenis tanah, kadar air, serta alat pemadat agar diperoleh kepadatan yang optimal. Apabila proses pemadatan tidak dilakukan sesuai standar, maka timbunan berpotensi mengalami penurunan (*settlement*) atau kegagalan struktural di kemudian hari, yang dapat memengaruhi umur layan perkerasan jalan.

Setelah pemadatan selesai, dilakukan pengukuran ketebalan timbunan untuk memastikan bahwa setiap lapisan tidak melebihi batas maksimal 60 cm sebagaimana dipersyaratkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga. Apabila ketebalan timbunan melampaui batas, maka kepadatan yang dicapai tidak akan seragam dan dapat mengurangi daya dukung tanah dasar. Tahap akhir berupa pengujian kepadatan lapangan dengan metode yang sesuai, seperti *sand cone test* atau *water replacement test*, untuk membandingkan hasil dengan standar SNI 6872:2015. Jika nilai densitas kering (γ_{dry}) telah memenuhi persyaratan minimal, maka lapisan dianggap lolos uji dan pekerjaan dapat dilanjutkan ke lapisan berikutnya. Dengan alur ini, kualitas pekerjaan timbunan dapat dikendalikan secara konsisten sehingga memenuhi standar konstruksi jalan yang berlaku.

Alat-Alat Pengetesan

Dalam pelaksanaan metode *Water Replacement* (ASTM D5030) digunakan beberapa peralatan utama dan pendukung, yaitu:

- a) Timbangan Kapasitas Besar
Digunakan untuk menimbang material hasil galian sesuai dengan dimensi lubang uji dalam rentang volume 0,08 – 2,83 m³.
- b) Timbangan Laboratorium
Untuk menentukan kadar air material yang berukuran lebih kecil dari ayakan No. 4, dengan kapasitas minimum 1.000 g dan ketelitian 0,1 g.
- c) Oven Pengereng
Dipakai untuk pengujian kadar air material di laboratorium.
- d) Saringan
Terdiri dari saringan No. 4 (4,75 mm) dan saringan 75 mm sesuai dengan persyaratan SNI 03-2423-1994.
- e) Plat Uji Logam
Berbentuk bundar dengan diameter $\pm 1,2$ m sebagai pola penggalian. Plat harus memiliki toleransi kedataran maksimum $\pm 15\%$ pada bagian atas silinder. Untuk diameter lebih besar, toleransi kedataran < 5% agar tidak terjadi kehilangan air akibat riak.
- f) Pelapis Plastik Kedap Air
Plastik dengan ketebalan 0,10 – 0,15 mm, terdiri dari dua lembar berukuran cukup besar untuk melapisi lubang uji dan dilebihkan ± 1 m di luar plat uji logam.
- g) Alat Ukur Volume Air
Meliputi bak penyimpanan, pipa penghubung, meteran air, timbangan, atau alat ukur lain yang digunakan untuk menentukan volume air dalam lubang uji.
- h) Alat Penunjuk Muka Air
Befungsi untuk memastikan tinggi muka air sesuai dengan kapasitas lubang uji.
- i) Peralatan Perpindahan Air
Seperti pipa, pompa, ember, dan selang yang digunakan untuk mengisi dan menguras air dari lubang uji.
- j) Peralatan Pendukung Lain
Antara lain karung pasir, sekop, beliung, pahat, jeruji, pisau, sendok, ember atau kaleng bertutup, drum, dan tong sebagai perlengkapan tambahan untuk kegiatan penggalian, pengangkutan, serta penanganan material hasil galian.



Gambar 3

Alat dan bahan

Langkah-langkah Pengujian

Pengujian kepadatan tanah dengan metode sumur uji (*water replacement test*) dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis agar hasil yang diperoleh akurat dan sesuai standar. Tahap pertama adalah pemilihan titik uji pada area yang rata dan representatif terhadap kondisi lapangan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh benar-benar menggambarkan kondisi timbunan di lokasi tersebut.

Tahap berikutnya adalah pekerjaan *leveling* atau perataan permukaan tanah pada titik uji. Perataan dilakukan agar posisi plat uji dapat terpasang dengan stabil dan tidak ada kebocoran saat proses pengisian air berlangsung. Setelah itu, dilakukan penggalian sumur uji dengan dimensi kedalaman tertentu (misalnya 50–60 cm), kemudian tanah hasil galian ditimbang dan dipisahkan antara fraksi halus dan material batuan *oversize*. Pada saat bersamaan, pengukuran kadar air tanah lapangan dilakukan dengan menggunakan alat *speedy tester* atau pengambilan sampel untuk pengujian oven di laboratorium.

Selanjutnya dilakukan pengukuran kedalaman lubang untuk memastikan dimensi sumur sesuai dengan desain pengujian. Setelah lubang siap, air dimasukkan ke dalam sumur uji secara bertahap hingga penuh, dan volume air yang digunakan dicatat sebagai dasar perhitungan volume tanah asli. Tahap terakhir adalah penimbangan air dan material batu yang telah dipisahkan, kemudian dilakukan perhitungan volume *oversize*, volume fraksi kontrol, berat isi basah, serta berat isi kering. Data-data tersebut diproses untuk mendapatkan nilai densitas tanah lapangan yang selanjutnya dibandingkan dengan standar SNI 6872:2015 maupun spesifikasi teknis proyek. Berikut Adalah gambar alur pengujian dari kepadatan tanah dengan metode sumur uji (*water replacement test*) bisa di lihat pada gambar 4



Gambar 4

Alur pengujian

3. Hasil dan Diskusi

Rumus Perhitungan Uji *Water Replacement*

Untuk mendapatkan parameter kepadatan tanah di lapangan melalui metode *Water Replacement* (ASTM D5030), diperlukan serangkaian perhitungan yang sistematis. Perhitungan ini mencakup penentuan volume air pengganti, volume butiran *oversize*, serta volume fraksi kontrol yang merupakan dasar untuk menghitung berat isi basah (γ_{wet}) dan berat isi kering (γ_{dry}). Selanjutnya, nilai kepadatan relatif lapangan diperoleh dengan membandingkan berat isi kering hasil uji dengan nilai *Maximum Dry Density* (MDD). Rumus-rumus perhitungan yang digunakan dalam analisis ini disajikan sebagai berikut:

1. Volume Air Total (V_t)

$$V_t = \frac{W_{lubang} - W_{titik}}{1000}$$

2. Volume *Oversize* (V_o)

$$V_o = \frac{W_{oversize}}{SPGR \times 1000}$$

3. Volume Fraksi Kontrol (V_f)

$$V_f = V_t - V_o$$

4. Berat Isi Basah (γ_{wet})

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{fraksi}}{V_f \times 1000}$$

5. Berat Isi Kering (γ_{dry})

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + \frac{W}{100}}$$

6. Kepadatan (%)

$$\text{Kepadatan} = \frac{\gamma_{dry}}{MMD} \times 100\%$$

Data Uji Lapangan

Berdasarkan hasil pengujian kepadatan lapangandengan menggunakan uji *water replacement*, maka didapatkan data-data pada salah satu sampel pada tabel 1 di bawah ini

Tanggal	03/08/2024	MDD (t/m³)	1,627	OMC (%)	16,5
STA	20+200 s/d 20+260	Tebal Lapisan	60 cm	SPGR	2,256
Titik Test Layer	20+225 (R1) 4	Kedalaman	50 cm		
Berat Tong	4,3 kg	Speedy Test (%)	15,10%		
Berat Karung	0,04 kg	Kadar Air (%)	15,00%		
			15,00%		
		Rata-rata Kadar Air	15,05%		
No	Berat air di atas titik test (Kg)	Berat air dalam lubang (Kg)	Berat kontrol fraksi (Kg)	Berat oversize (Kg)	
1	70,23	42,00	35,12	54,21	

2	30,41	41,54	45,87	57,31
3	–	45,22	71,54	50,98
4	–	52,32	46,48	38,89
5	–	49,25	64,87	–
6	–	50,71	65,87	–
7	–	50,74	50,72	–
8	–	50,24	42,71	–
9	–	48,62	38,22	–
10	–	49,78	15,01	–
11	–	–	–	–
12	–	–	–	–
13	–	–	–	–
14	–	–	–	–
15	–	–	–	–
16	–	–	–	–
17	–	–	–	–
Jumlah (Netto)	100,64	480,44	476,36	210,39
Total Bersih	92,04	437,44	426,61	210,89
Volume Air (Vt) =		0,345 m ³	(Wlubang – Wtitik) / 1000	
Volume Oversize (Vo) =		0,093 m ³	Woversize / (SPGR × 1000)	
Volume Fraksi Kontrol (Vf) =		0,252 m ³	Va – Vo	
Berat Isi Basah (γwet) =		1,888 t/m ³	Wfraksi / (Vf × 1000)	
Berat Isi Kering (γdry) =		1,642 t/m ³	γwet / (1 + w/100)	
Kepadatan (%) =		100,29%		

Tabel 1
Hasil pengujian sumur uji (*water replacement test*)

Berdasarkan data yang telah di dapatkan dari hasil uji *water replacement test*, maka didapatkan rekapitulasi data pengujian sebanyak 5 sampel dapat di lihat pada tabel 2 di bawah ini

Titik Test	Layer	Kadar Air (%)	ρd (t/m ³)	MDD (t/m ³)	Kepadatan (%)
20+225 (R1)	4	15,05	1,642	1,627	100,91
20+375 (R)	4	15,8	1,66	1,627	102,01
20+225 (CL)	6	16,83	1,641	1,627	100,86
20+300 (CL)	6	16,8	1,682	1,627	103,38
237+972 (L)	3	16	1,686	1,627	103,6

Tabel 2
Repitulasi data

Analisis Hasil Uji Kepadatan Timbunan batu dengan metode sumur uji (*water replacement test*)

A). Kadar Air (%)

Nilai kadar air lapangan (w) pada titik pengujian berada dalam rentang 15,05–16,83 %, sedangkan *Optimum Moisture Content* (OMC) hasil uji laboratorium terukur sebesar 16,5 %. Titik 20+225 (R1) dengan kadar air 15,05 % berada di *dry side of optimum*, yaitu sedikit di bawah OMC. Pada kondisi ini, tanah cenderung lebih kaku sehingga memerlukan energi pemadatan yang lebih besar untuk mencapai densitas maksimum. Meski demikian, pengujian menunjukkan bahwa kepadatan lapangan tetap baik, yang mengindikasikan bahwa energi pemadatan yang diberikan oleh alat berat sudah mencukupi untuk mencapai densitas kering ideal.

Sebaliknya, titik 20+225 (CL) memiliki kadar air 16,83 %, sehingga berada pada *wet side of optimum*, dimana keberadaan air berlebih dapat menopang kohesi antar partikel tanah. Kondisi ini cenderung mempermudah pemadatan awal, tetapi jika kadar air terlalu tinggi, kepadatan bisa menurun akibat adanya film air yang mengurangi kontak antar butir. Titik-titik lainnya (misalnya 20+375 R, 20+300 CL, 237+972 L) menunjukkan kadar air sekitar ± 16 %, yang sangat mendekati OMC laboratorium dan umumnya dianggap kondisi terbaik untuk mencapai Maximum Dry Density (MDD). Dengan deviasi yang hanya sekitar ± 1 % dari OMC, ini menunjukkan pengendalian kadar air lapangan yang cukup baik dan sesuai dengan praktik optimal, sebagaimana dijelaskan teori *moisture-density curve* terbaru (Jay Wu *et al.*, 2023)

b). Berat Isi Kering (ρ_d)

Berdasarkan data dari Tabel 2, nilai berat isi kering (ρ_d) lapangan berkisar antara 1,641–1,686 t/m³. Nilai terendah diperoleh pada titik 20+225 (CL), layer 6 (1,641 t/m³), sedangkan tertinggi pada titik 237+972 (L), layer 3 (1,686 t/m³). Nilai rata-rata sebesar 1,662 t/m³ menunjukkan bahwa densitas lapangan melebihi Maximum Dry Density (MDD) laboratorium sebesar 1,627 t/m³, yang mencerminkan fenomena *over-compaction* ringan.

Fenomena *over-compaction* tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa faktor. Pertama, energi pemadatan di lapangan yang lebih tinggi daripada energi Proctor laboratorium—terutama akibat penggunaan vibratory roller dengan beban dinamis besar—sering menghasilkan densitas lapangan lebih tinggi dibandingkan laboratorium (Vahedifard & Miller, 2023). Kedua, variasi tekstur tanah dan distribusi butir antar lapisan di lapangan terkadang lebih baik (*well-graded*), sehingga memungkinkan kepadatan lebih tinggi saat dipadatkan, meskipun menggunakan energi yang sama (Spagnoli *et al.*, 2020). Ketiga, perbedaan kadar air aktual versus nilai OMC laboratorium dapat menyebabkan pemadatan lebih efisien saat kadar air sedikit di *dry-side* atau *wet-side*, sesuai dengan teori *moisture-density* terbaru (Guo *et al.*, 2023). Menurut praktik teknik sipil modern, *over-compaction* ringan—di mana % kepadatan lapangan sedikit melebihi 100% dari MDD laboratorium—masih dapat diterima asalkan tidak menyebabkan segregasi butir, retakan, atau kerusakan struktur tanah (Spagnoli *et al.*, 2020; Vahedifard & Miller, 2023). Dalam konteks proyek ini, peningkatan ringan ρ_d lapangan di atas MDD laboratorium menunjukkan pemadatan yang efisien dan terkendali, tanpa ditemukan indikasi negatif seperti keretakan lapisan atau distribusi butir yang tidak merata.

c.) Kepadatan Relatif (%)

Berdasarkan perhitungan pada Tabel 2, nilai kepadatan tanah hasil pengujian lapangan dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Kepadatan (\%)} = \frac{\rho_d}{MDD} \times 100$$

dengan ρ_d = berat isi kering lapangan dan MDD = *maximum dry density* hasil laboratorium. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh titik pengujian memiliki nilai kepadatan $\geq 100\%$. Titik 20+225 (R1) mencapai 100,91%, titik 20+375 (R) sebesar 102,01%, titik 20+225 (CL) sebesar 100,86%, sedangkan titik 20+300 (CL) dan 23+972 (L) bahkan melampaui 103% masing-masing dengan nilai 103,38% dan 103,60%.

Hasil ini menunjukkan bahwa pemadatan lapangan berada pada kondisi sangat baik, karena seluruh titik telah memenuhi bahkan melampaui spesifikasi proyek. Berdasarkan SNI 1742:2008 dan standar internasional AASHTO T-99, pemadatan tanah untuk konstruksi jalan tol umumnya mensyaratkan minimal 100% dari MDD laboratorium. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kualitas pemadatan pada lokasi uji telah sesuai standar teknis yang berlaku. Nilai kepadatan yang melebihi 103% menandakan adanya

energi pemadatan yang tinggi di lapangan, sehingga menghasilkan fenomena *over-compaction* ringan. Kondisi ini masih dapat diterima sepanjang tidak menimbulkan segregasi material atau kerusakan struktur tanah, sebagaimana ditegaskan oleh penelitian terbaru mengenai evaluasi kualitas pemadatan jalan tol (Chen *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kepadatan tanah dengan metode *Water Replacement* (ASTM D5030) pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3 STA 31+000, diperoleh beberapa poin teknis sebagai berikut: Kondisi Kadar Air Lapangan, Nilai kadar air berada pada kisaran 15,05–16,83%, dengan deviasi hanya $\pm 1\%$ dari *Optimum Moisture Content* (OMC = 16,5%). Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian kadar air lapangan telah dilakukan dengan baik sehingga mendukung pencapaian kepadatan optimum. Nilai Berat Isi Kering (ρ_d) Hasil uji menunjukkan nilai $\rho_d = 1,641\text{--}1,686\text{ t/m}^3$, dengan rata-rata $1,662\text{ t/m}^3$, yang lebih tinggi dari *Maximum Dry Density* (MDD) laboratorium = $1,627\text{ t/m}^3$. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya *over-compaction* ringan, yang disebabkan oleh penggunaan energi pemadatan lapangan lebih besar daripada uji laboratorium, namun masih dalam batas yang dapat diterima. Tingkat Kepadatan Relatif Seluruh titik uji menunjukkan nilai kepadatan $\geq 100\%$ dari MDD, dengan capaian tertinggi 103,6% pada titik 237+972 (L). Hal ini menegaskan bahwa kualitas pemadatan lapangan telah memenuhi bahkan melampaui spesifikasi Bina Marga (2018) dan SNI 6872:2015 yang mensyaratkan minimal 95–100% dari MDD. Efektivitas Metode *Water Replacement*. Metode *Water Replacement* terbukti efektif digunakan pada material timbunan bergradasi kasar dengan kandungan butiran *oversize*, karena mampu mengukur volume lubang uji secara akurat. Hasil pengujian yang stabil pada seluruh titik memperlihatkan keunggulan metode ini dibandingkan *sand cone test* untuk kondisi material serupa. Implikasi Terhadap Kinerja Jalan Tol. Dengan nilai kepadatan rata-rata lapangan di atas 100% MDD, dapat disimpulkan bahwa lapisan tanah dasar telah memenuhi syarat teknis untuk mendukung beban lalu lintas jalan tol. Kondisi ini berimplikasi positif terhadap peningkatan daya dukung tanah dasar (CBR), reduksi penurunan diferensial (*settlement*), serta menjamin stabilitas jangka panjang konstruksi perkerasan.

Referensi

1. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2010). ASTM D1556 – Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method. West Conshohocken, PA: ASTM International.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM). (2010). ASTM D5030 – Standard test method for density of soil and rock in place by water replacement method in a test pit. West Conshohocken, PA: ASTM International.
3. Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1742:2008 – Cara uji kepadatan tanah di lapangan dengan sand cone. Jakarta: BSN.
4. Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 6872:2015 – Spesifikasi kepadatan tanah untuk timbunan jalan. Jakarta: BSN.
5. Chen, Y., Zhang, J., & Liu, H. (2022). Field evaluation of compaction quality and mechanical properties of highway embankment soils. *Construction and Building Materials*, 345, 128352. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128352>
6. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). Spesifikasi umum Bina Marga 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
7. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2023). Proyek strategis nasional jalan tol Probolinggo–Banyuwangi. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
8. Pemerintah Republik Indonesia. (2020). Peraturan Presiden No. 109 Tahun 2020 tentang Percepatan pelaksanaan proyek strategis nasional. Jakarta: Sekretariat Negara.
9. Peters, J., Brown, R., & Ahmed, S. (2025). Advances in field density testing methods for coarse-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 151(4), 04025015. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-25-040>
10. Purwana, D., Santoso, A., & Wibowo, T. (2025). Evaluation of alternative field compaction testing methods on coarse fill materials. *Indonesian Journal of Civil Engineering Research*, 12(1), 45–56. <https://doi.org/10.12962/ijcer.v12i1.2025>
11. Sadek, M., Hassan, A., & Elsharief, A. (2022). Comparative study of Proctor compaction energy and field compaction performance. *Transportation Geotechnics*, 35, 100750. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100750>
12. Taufiq, R., Gunawan, A., & Nurhayati, L. (2021). Accuracy of water replacement and sand cone methods for field density measurement in road embankments. *Journal of Infrastructure and Facility Asset Management*, 3(2), 67–76. <https://doi.org/10.21009/JIFAM.2021.0302>
13. Vahedifard, F., & Miller, G. A. (2023). Energy effects in compaction and implications for soil performance. *International Journal of Geomechanics*, 23(2), 04022191. <https://doi.org/10.1061/IJGNAL.GMENG-23-040>
14. Wang, X., Zhou, Q., & Lin, J. (2023). Quality assessment of soil compaction in highway engineering using improved testing standards. *Soils and Foundations*, 63(1), 101209. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101209>
15. Wu, J., Li, C., & Zhao, Y. (2023). Effects of moisture content and compaction method on soil compaction characteristics. *Geotechnical Testing Journal*, 46(3), 879–895. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220025>