

Analisis Efektivitas Pemadatan Tanah Berdasarkan Uji Laboratorium dan Lapangan pada Pekerjaan Timbunan Tanah di Sulawesi Tenggara

Anafi Minmahddun^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Halu Oleo, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara

*penulis koresponden: anafi.minmahddun@uho.ac.id

Submit : 30/05/2025

Revisi : 05/06/2025

Diterima : 30/06/2025

Abstrak. Pemadatan tanah merupakan salah satu tahapan penting dalam pekerjaan konstruksi, terutama pada proyek-proyek yang memerlukan kestabilan struktur jangka panjang. Proses pemadatan bertujuan untuk meningkatkan densitas tanah, sehingga tanah mampu menahan beban tanpa mengalami penurunan yang berlebihan. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan proses pemadatan tanah sebagai material timbunan pada proyek pengembangan kawasan industri di Sulawesi Tenggara. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui kombinasi antara uji laboratorium Proctor standar dan evaluasi lapangan menggunakan metode sand cone. Sampel tanah diambil langsung dari lokasi proyek, kemudian diuji di laboratorium untuk menentukan berat volume kering maksimum (γ_{dmax}) dan kadar air optimum (w_{opt}). Hasil uji laboratorium menunjukkan γ_{dmax} sebesar $1,69 \text{ gr/cm}^3$ dan w_{opt} sebesar 28,80%. Selanjutnya, pengujian sand cone dilakukan di delapan titik lapangan setelah proses pemadatan selesai. Hasilnya menunjukkan bahwa derajat kepadatan tanah berada antara 77,8% hingga 90,4%, di bawah standar teknis minimum sebesar 95%. Ketidaksesuaian ini disebabkan oleh kadar air yang melebihi kadar optimum serta kurangnya kontrol dalam pelaksanaan teknis lapangan. Penelitian ini menunjukkan pentingnya sinkronisasi antara hasil laboratorium dan implementasi lapangan. Evaluasi ini memberikan rekomendasi penting terkait pengendalian kadar air, pemilihan alat yang sesuai, dan pelatihan operator dalam rangka meningkatkan kualitas pemadatan tanah pada proyek konstruksi serupa di masa depan.

Kata kunci: pemadatan tanah; uji proctor; derajat kepadatan

Abstract. Soil compaction is a critical phase in construction projects, particularly those requiring long-term structural stability. The compaction process aims to increase soil density, enabling the soil to support structural loads without excessive settlement. This study was conducted to evaluate the effectiveness of soil compaction used as fill material in an industrial development project in Southeast Sulawesi. A quantitative approach was employed by combining laboratory testing using the standard Proctor method and field evaluation using the sand cone method. Soil samples were directly taken from the project site and tested in the laboratory to determine the maximum dry density (γ_{dmax}) and the optimum moisture content (w_{opt}). Laboratory results indicated a γ_{dmax} of 1.69 gr/cm^3 and a w_{opt} of 28.80%. Subsequently, sand cone tests were performed at eight field locations after the compaction process was completed. The results showed that the field degree of compaction ranged from 77.8% to 90.4%, which is below the minimum technical standard of 95%. This discrepancy is attributed to excessive moisture content and a lack of control in field execution. The study highlights the importance of synchronizing laboratory data with field implementation. The findings provide valuable recommendations on moisture control, appropriate equipment selection, and operator training to improve soil compaction quality in future construction projects.

Keywords: soil compaction; proctor test; degree of compaction

Pendahuluan

Dalam dunia konstruksi, tanah sering kali berperan sebagai elemen dasar yang menopang berbagai struktur bangunan. Oleh karena itu, kualitas tanah sebagai media penyangga beban sangat menentukan stabilitas dan daya tahan jangka panjang suatu infrastruktur. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan kualitas teknis tanah adalah pemadatan, yakni proses memperkecil ruang antar partikel tanah untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan tanah secara keseluruhan.

Pemadatan tanah memegang peran penting dalam meningkatkan daya dukung tanah, terutama untuk keperluan infrastruktur. Proses ini secara langsung meningkatkan densitas tanah, sehingga kemampuannya dalam menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebih atau kegagalan struktural turut membaik. Peningkatan daya dukung ini berkaitan erat dengan perbaikan sifat mekanik tanah seperti gaya gesek dan kohesi antar partikel [1]. Ortigara dkk. juga menekankan bahwa semakin tinggi tingkat pemadatan, semakin kecil kemungkinan tanah mengalami pemadatan lanjutan, karena kohesi dan gesekan antar butir tanah menjadi lebih optimal. Namun demikian, efektivitas pemadatan tidak bersifat seragam pada semua jenis tanah. Studi oleh Severiano et al. (2011) [2] menunjukkan bahwa respons tanah terhadap tekanan tertentu (*preconsolidation dan critical pressures*) menjadi indikator penting bahwa pemadatan dapat secara langsung meningkatkan stabilitas dan kapasitas dukung tanah.

Lebih lanjut, pentingnya pemadatan tidak hanya terletak pada peningkatan daya dukung, tetapi juga pada peningkatan kekakuan dan kekuatan geser tanah. Lopes dkk. (2022) [3] menegaskan bahwa pemadatan yang dilakukan dengan tepat dapat mengurangi penurunan jangka panjang dan menjamin kestabilan struktur bangunan di atasnya. Tak hanya meningkatkan kekuatan struktural, pemadatan juga berperan penting dalam mengatasi masalah penurunan tanah, terutama pada tanah-tanah rentan seperti lempung. Dias et al. (2007) [4] menyoroti pentingnya menjaga struktur tanah agar tetap stabil selama masa operasional, termasuk dalam kegiatan pertanian seperti panen, dengan menerapkan manajemen lalu lintas yang sistematis. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat pemadatan tanah tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berkaitan dengan pengelolaan tanah secara berkelanjutan.

Dalam pelaksanaannya, keberhasilan pemadatan tanah sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Kualitas pemadatan tanah ditentukan oleh interaksi antara jenis tanah, kadar air, alat pemadat, dan jumlah lintasan. Jenis tanah, khususnya yang bertekstur lempung, cenderung mencapai densitas tinggi namun juga rentan terhadap kegagalan struktur jika tidak dipadatkan pada kadar air yang sesuai [5], [6]. Riwayat pengelolaan tanah, seperti praktik tanpa olah tanah, turut memengaruhi kerentanannya terhadap pemadatan [7]. Kadar air sangat berperan dalam efektivitas pemadatan, di mana kelebihan atau kekurangan air dapat menghambat pencapaian densitas maksimum [8], [9]. Pemadatan paling optimal dicapai saat tanah berada pada kadar air optimum [10].

Selain itu, jenis dan berat alat pemadat juga memengaruhi keberhasilan proses pemadatan. Alat berat cenderung menghasilkan densitas yang lebih tinggi dalam jumlah lintasan yang lebih sedikit, tergantung pada kondisi tanah dan kadar air [11]. Namun, dampaknya sangat bervariasi tergantung jenis tanah, sehingga pemilihan alat harus dilakukan secara cermat [12]. Jumlah lintasan pemadatan pun memiliki batas optimal; terlalu banyak lintasan dapat merusak struktur tanah dan menghasilkan efektivitas yang menurun [13], [14]. Interaksi antara jumlah lintasan dan kadar air menambah kompleksitas proses, menuntut pemantauan yang hati-hati untuk mencapai pemadatan

yang seragam [15]. Keseluruhan faktor ini perlu dipertimbangkan secara terpadu agar pemadatan tanah mendukung keberlanjutan struktur dan penggunaan lahan.

Salah satu metode laboratorium yang paling umum digunakan untuk menilai karakteristik pemadatan tanah adalah uji Proctor standar [16]. Uji ini memberikan informasi penting mengenai kadar air optimum (*optimum moisture content*) dan kepadatan kering maksimum (*maximum dry density*) dari suatu jenis tanah. Kedua parameter ini menjadi acuan utama dalam menetapkan target pemadatan di lapangan. Namun, meskipun uji laboratorium memberikan hasil yang terukur secara ideal, kondisi aktual di lapangan sering kali jauh lebih kompleks dan dinamis, terutama karena pengaruh faktor lingkungan seperti curah hujan, suhu, serta kondisi drainase. Oleh sebab itu, perlu dilakukan evaluasi kepadatan langsung di lapangan untuk menilai sejauh mana hasil pemadatan yang dicapai mendekati kondisi ideal di laboratorium.

Salah satu teknik evaluasi kepadatan lapangan yang banyak digunakan adalah metode sand cone, yang dilakukan dengan mengukur volume tanah yang digali di lapangan dan membandingkannya dengan volume pasir yang menggantikannya. Dengan menggunakan data ini, dapat dihitung berat volume kering tanah di lapangan, yang kemudian dibandingkan dengan hasil uji Proctor laboratorium untuk memperoleh nilai derajat kepadatan (*degree of compaction/DoC*). Standar umum menyatakan bahwa nilai DoC yang baik harus mencapai minimal 95% dari kepadatan maksimum hasil uji Proctor. Apabila nilai ini tidak tercapai, maka pemadatan di lapangan dianggap tidak memenuhi persyaratan dan berpotensi menyebabkan masalah teknis pada struktur bangunan.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan proses pemadatan tanah yang digunakan sebagai material timbunan pada proyek pengembangan kawasan industri di Sulawesi Tenggara. Dengan menggunakan pendekatan kuantitatif, penelitian ini menggabungkan hasil uji Proctor standar di laboratorium dengan evaluasi lapangan menggunakan metode sand cone. Sampel tanah yang digunakan dalam uji laboratorium diambil langsung dari lokasi proyek, untuk memastikan representativitas material yang diuji. Evaluasi lapangan dilakukan setelah proses pemadatan selesai, untuk mendapatkan gambaran nyata tentang hasil akhir dari proses pemadatan yang telah dilakukan oleh pelaksana konstruksi.

Dengan membandingkan hasil laboratorium dan data lapangan, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan atau kegagalan pemadatan, serta memberikan rekomendasi perbaikan jika diperlukan. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya sinkronisasi antara data teknis di laboratorium dengan implementasi di lapangan, agar pekerjaan konstruksi dapat memenuhi standar kualitas dan keselamatan yang diharapkan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi selanjutnya, khususnya dalam aspek pemadatan tanah yang merupakan pondasi dasar dari keberhasilan struktur di atasnya.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium dan evaluasi langsung di lapangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik kepadatan tanah melalui uji laboratorium Proctor standar dan membandingkannya dengan hasil kepadatan aktual di lapangan, guna menilai tingkat keberhasilan proses pemadatan.

Penelitian dilaksanakan di dua lokasi utama. Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Halu Oleo, sedangkan evaluasi kepadatan tanah dilakukan di lokasi proyek penghamparan tanah di salah satu kawasan industri di Sulawesi Tenggara. Pengujian laboratorium berlangsung selama satu minggu dan evaluasi pemadatan lapangan dilakukan 1 bulan setelahnya menunggu proses pemadatan Dilapangan berakhir.

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel tanah yang diambil langsung dari lokasi proyek untuk memanfaatkan hasil galian lereng. Karena jenis tanah galian merupakan tanah yang homogen maka hanya satu sampel yang diambil dengan metode disturbed sample sesuai kebutuhna uji kepadatan standar. Alat utama yang digunakan dalam pengujian Proctor meliputi mold silinder standar (volume 944 cm^3 atau 2.104 cm^3), hammer pemadat (berat 2,5 kg atau 4,5 kg dengan tinggi jatuh 30,5 cm), neraca analitik, dan oven pengering seperti yang terlihat pada Gambar 1, serta alat sand cone untuk pengukuran kepadatan tanah di lapangan seperti yang yang dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 1. Alat uji kepadan dan oven untuk uji kadar air sampel



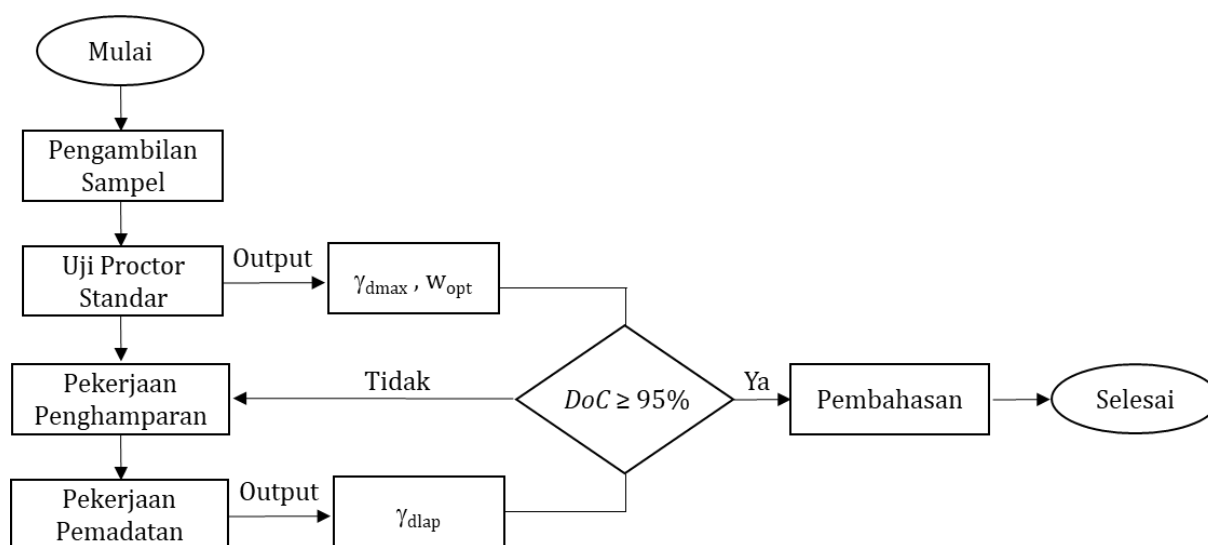
Gambar 2. Alat uji sand cone [17]

Prosedur penelitian diawali dengan pengambilan sampel tanah dari lapangan. Sampel yang telah dikeringkan udara dan disaring dari material kasar kemudian digunakan dalam pengujian Proctor standar di laboratorium. Proses uji Proctor mengikuti SNI 1743:2008 [16], Tahapan penelitian diawali dengan preparasi sampel tanah, dimana sampel diangin-anginkan, dihaluskan, dan diayak menggunakan saringan No. 4. Selanjutnya, dilakukan uji Proctor standar dengan memadatkan tanah dalam mold silinder menggunakan hammer sebanyak 25 pukulan per lapis untuk setiap variasi kadar air (5-6 variasi dengan interval 2%). Setiap sampel kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam untuk menentukan berat volume kering dan kadar airnya. Data hasil pengujian diplot dalam grafik hubungan berat volume kering dan kadar air untuk memperoleh nilai kepadatan maksimum (γ_{dmax}) dan kadar air optimum (w_{opt}).

Selanjutnya, dilakukan evaluasi kepadatan di lapangan. Beberapa titik uji dipilih secara acak pada area tanah yang telah dipadatkan. Pengukuran dilakukan menggunakan metode sand cone merujuk pada SNI 2828:2011 [18], dimana volume lubang galian diukur menggunakan pasir Ottawa, kemudian sampel tanah ditimbang dan dikeringkan untuk menghitung berat volume kering lapangan (γ_{dlap}). Nilai kepadatan lapangan tersebut dibandingkan dengan kepadatan maksimum dari uji Proctor laboratorium untuk menghitung derajat kepadatan (DoC) menggunakan rumus:

$$DoC = \frac{\gamma_{dlap}}{\gamma_{dmax}} \times 100\% \tag{1}$$

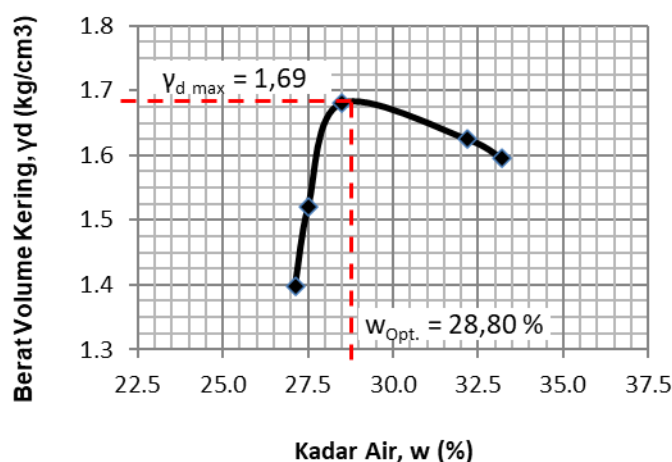
Evaluasi keberhasilan pemadatan dilakukan dengan membandingkan nilai DoC dengan standar teknis yang umum digunakan, yaitu $\geq 95\%$ [19]. Alur Evaluasi kepadatan laboratorium dan lapangan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur penelitian

Hasil dan Pembahasan

Hasil uji kepadatan standar material yang akan digunakan sebagai material timbunan terdapat pada Gambar 4. Hasil uji Proctor pada tanah yang digunakan menunjukkan bahwa berat volume kering maksimum (γ_{dmax}) adalah sebesar 1,69 kg/cm³, dengan kadar air optimum (w_{opt}) sebesar 28,80%. Grafik hubungan antara kadar air dan berat volume kering membentuk kurva lonceng yang khas, di mana nilai γ_d meningkat seiring bertambahnya kadar air hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun jika kadar air terus bertambah. Nilai-nilai ini menjadi acuan penting dalam mengevaluasi apakah kondisi pemadatan di lapangan telah dilakukan secara efektif.



Gambar 4. Hasil uji kepadatan standar sampel tanah timbunan

Setelah proses penghamparan dan pemadatan dilapangan selesai dikerjakan, pengujian kepadatan tanah di lapangan menggunakan sandcone memperoleh hasil seperti yang terlihat pada Tabel 1. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai derajat kepadatan tanah di lapangan bervariasi antara 77,9% hingga 90,4%, dengan nilai rata-rata sekitar 82%.

Tabel 1. Hasil uji kepadatan lapangan menggunakan alat sandcone

Parameter	Titik uji							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Kadar Air, w (%)	34.80	33.00	35.00	36.40	35.40	40.00	31.00	31.20
Kepadatan Lapangan, γ_d Lap. (gr/cm ³)	1.463	1.320	1.316	1.327	1.315	1.348	1.435	1.527
Kepadatan Laboratorium, γ_d Lab. (gr/cm ³)	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690
Derajat Kepadatan, (%)	86.6	78.1	77.9	78.5	77.8	79.7	84.9	90.4

Titik dengan derajat kepadatan tertinggi tercatat pada lokasi 8 sebesar 90,4%, yang masih belum memenuhi kriteria kepadatan minimum berdasarkan spesifikasi teknis. Titik lainnya yang relatif tinggi adalah lokasi Rencana Test Sondir No. 10, dengan nilai sebesar 84,9%, meskipun belum sepenuhnya memenuhi ambang batas teknis.

Sebaliknya, beberapa titik lain seperti titik 2 (78,1%), titik 3 (77,9%), titik 4 (78,5%), dan titik 5 (77,8%) menunjukkan nilai derajat kepadatan yang cukup rendah dan mengindikasikan perlunya tindakan korektif di lapangan. Rendahnya nilai derajat kepadatan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya adalah kadar air tanah yang tidak berada pada kondisi optimum saat proses pemadatan dilakukan.

Menariknya, meskipun jenis material tanah yang digunakan untuk penghamparan di ketujuh titik tersebut berasal dari sumber yang sama dan memiliki karakteristik serupa, hasil pengujian menunjukkan variasi signifikan dalam derajat kepadatan yang dicapai. Hal ini menunjukkan bahwa keseragaman material tanah tidak menjamin keseragaman hasil pemadatan, karena performa pemadatan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor operasional di lapangan, seperti teknik pelaksanaan [20], jumlah lintasan alat berat [21], jenis alat pemadat, ketebalan setiap lapisan hamparan, serta waktu tunggu sebelum pemadatan dilakukan (yang dapat mempengaruhi kadar air alami tanah) [22].

Salah satu temuan penting dalam pengujian ini adalah bahwa sebagian besar titik menunjukkan kadar air lapangan yang melebihi kadar air optimum yang ditentukan dalam uji Proctor laboratorium. Kondisi ini menjadi penyebab utama mengapa kepadatan maksimum tidak dapat dicapai. Tanah yang terlalu basah akan mengalami penurunan kohesi antar partikel dan menyebabkan butiran tanah terdorong menjauh satu sama lain saat dikenai beban pemadatan [23]. Akibatnya, meskipun alat pemadat telah bekerja sesuai prosedur, hasil kepadatan yang diperoleh tetap rendah. Misalnya, pada titik 1, kadar air mencapai 34,8%, jauh di atas kadar air optimum tanah saat uji proctor. Temuan ini menegaskan pentingnya melakukan evaluasi di lapangan untuk melengkapi hasil pengujian laboratorium, guna memastikan bahwa kondisi tanah sesuai dengan parameter yang diharapkan untuk mencapai pemadatan yang optimal [24]. Evaluasi di lapangan sebaiknya mempertimbangkan faktor lingkungan yang dapat memengaruhi kadar air tanah, sehingga strategi pemadatan yang diterapkan selaras dengan kondisi baik di laboratorium maupun di lapangan.

Fakta bahwa beberapa titik dengan kadar air tinggi tetap mampu mencapai derajat kepadatan yang relatif baik, seperti pada titik 1 (86,6%), juga dapat dijelaskan oleh kombinasi antara penanganan lapangan yang lebih tepat, waktu tunggu yang cukup sehingga kelebihan air sebagian menguap, atau pemadatan yang dilakukan berulang dengan intensitas tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh kadar air terhadap kepadatan sangat bergantung pada keseimbangan antara kondisi tanah dan metode kerja di lapangan. Temuan ini menekankan pentingnya pemahaman tentang bagaimana kadar air berinteraksi dengan teknik pemadatan untuk mengoptimalkan kepadatan tanah dalam berbagai skenario konstruksi. Selain itu, variasi perilaku pemadatan akibat perbedaan kadar air menunjukkan perlunya strategi pemadatan yang disesuaikan, terutama di daerah dengan sifat tanah yang heterogeny [25]. Memahami interaksi ini dapat meningkatkan efektivitas praktik konstruksi dan memperbaiki integritas struktur secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil pengujian kepadatan tanah di lapangan diketahui bahwa seluruh titik uji menunjukkan nilai degree of compaction (DoC) yang berada di bawah batas minimum yang dipersyaratkan dalam spesifikasi teknis yakni sebesar 95% dari kepadatan kering maksimum hasil uji Proctor standar. Temuan ini secara jelas menunjukkan bahwa proses

pemadatan yang telah dilaksanakan di lapangan belum mencapai tingkat kepadatan yang memadai untuk mendukung stabilitas struktur bangunan yang direncanakan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan serangkaian tindakan perbaikan yang terarah dan sistematis. Salah satu langkah penting adalah pengendalian kadar air tanah sebelum pemadatan dilakukan. Proses pemadatan tanah sangat sensitif terhadap kadar air, karena kadar air yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi pemadatan. Oleh karena itu, penyiraman atau pengeringan tanah secara terkontrol sebelum pemadatan menjadi langkah penting yang harus diperhatikan. Selanjutnya, peningkatan jumlah lintasan alat pemadat pada setiap lapisan tanah dapat membantu meningkatkan energi pemadatan yang diterima tanah, sehingga kepadatan yang dicapai menjadi lebih tinggi dan merata.

Selain itu, pemilihan jenis alat pemadat harus disesuaikan dengan karakteristik material tanah yang digunakan. Penggunaan alat yang tidak sesuai dapat menyebabkan energi pemadatan tidak tersalurkan secara efektif ke dalam massa tanah, sehingga hasil pemadatan menjadi tidak optimal. Tak kalah penting adalah aspek sumber daya manusia, khususnya operator alat berat, yang harus memahami prinsip dasar pemadatan dan teknik pelaksanaannya di lapangan. Kurangnya pemahaman dan pengalaman operator dapat berkontribusi pada buruknya hasil pemadatan, meskipun peralatan dan material yang digunakan telah sesuai.

Setelah perbaikan-perbaikan tersebut diterapkan, sangat disarankan untuk melakukan evaluasi ulang melalui pengujian kepadatan lanjutan. Pengujian lanjutan ini bertujuan untuk memastikan bahwa perbaikan yang dilakukan telah memberikan dampak nyata terhadap peningkatan mutu hasil pemadatan, serta bahwa seluruh area kerja telah memenuhi standar yang ditetapkan. Kepadatan tanah yang optimal bukan hanya menjamin kestabilan dan daya dukung tanah dasar terhadap beban struktur di atasnya, tetapi juga berperan penting dalam mencegah penurunan diferensial dan kerusakan struktural dalam jangka panjang [26]. Dengan demikian, keberhasilan proses pemadatan merupakan faktor krusial dalam menjamin kualitas, keamanan, dan keberlanjutan proyek konstruksi secara keseluruhan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses pemadatan tanah yang diterapkan pada proyek pengembangan kawasan industri di Sulawesi Tenggara belum mencapai tingkat kepadatan yang disyaratkan, yaitu minimal 95% dari hasil uji Proctor standar. Seluruh titik pengujian di lapangan menghasilkan derajat kepadatan di bawah ambang batas tersebut, dengan nilai tertinggi sebesar 90,4%. Penyebab utama kegagalan pencapaian kepadatan optimal adalah kadar air tanah saat proses pemadatan yang tidak berada dalam rentang optimum, sehingga mengurangi efektivitas pemadatan meskipun telah dilakukan dengan alat berat. Selain itu, ketidakteraturan dalam pelaksanaan lapangan, seperti variasi jumlah lintasan, jenis dan berat alat pemadat, serta ketebalan tiap lapisan timbunan, turut berkontribusi terhadap hasil yang kurang memuaskan.

Implikasi dari hasil ini sangat signifikan, karena ketidakterpenuhannya standar kepadatan dapat berdampak negatif terhadap daya dukung tanah, meningkatkan risiko penurunan diferensial, dan pada akhirnya mengganggu stabilitas struktur bangunan yang dibangun di atasnya. Untuk itu, direkomendasikan adanya evaluasi menyeluruh terhadap teknik

pemadatan di lapangan, termasuk pengendalian kadar air sebelum pemadatan, pelatihan operator alat berat, serta penerapan prosedur standar pemadatan yang konsisten. Evaluasi ulang setelah tindakan korektif menjadi sangat penting untuk memastikan peningkatan kualitas. Hasil penelitian ini menjadi masukan berharga bagi perencana dan pelaksana konstruksi dalam meningkatkan kualitas pekerjaan tanah secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] C. Ortigara, M. T. d. Moraes, H. Debiasi, V. R. d. Silva, J. C. Franchini, and F. B. d. Luz, "Modeling of Soil Load-Bearing Capacity as a Function of Soil Mechanical Resistance to Penetration," *Rev. Bras. Ciência Do Solo*, vol. 39, no. 4, pp. 1036–1047, 2015, doi: 10.1590/01000683rbc20140732.
- [2] E. d. C. Severiano, G. C. d. Oliveira, M. d. S. Júnior, K. A. de P. Costa, V. d. M. Benites, and S. M. F. Filho, "Structural Changes in Latosols of the Cerrado Region: II - Soil Compressive Behavior and Modeling of Additional Compaction," *Rev. Bras. Ciência Do Solo*, vol. 35, no. 3, pp. 783–791, 2011, doi: 10.1590/s0100-06832011000300014.
- [3] B. de C. F. L. Lopes, V. d. O. Kühn, Â. C. G. Queiroz, B. Caicedo, and M. P. C. Neto, "Structure Evaluation of a Tropical Residual Soil Under Wide Range of Compaction Conditions," *Géotechnique Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 106–113, 2022, doi: 10.1680/jgele.21.00101.
- [4] M. d. S. Dias, S. Fonseca, C. F. Araújo-Junior, and A. R. Silva, "Soil Compaction Due to Forest Harvest Operations," *Pesqui. Agropecuária Bras.*, vol. 42, no. 2, pp. 257–264, 2007, doi: 10.1590/s0100-204x2007000200015.
- [5] A. N. Beutler, J. F. Centurion, Á. P. d. Silva, M. A. P. da C. Centurion, C. L. Leonel, and O. d. S. Freddi, "Soil Compaction by Machine Traffic and Least Limiting Water Range Related to Soybean Yield," *Pesqui. Agropecuária Bras.*, vol. 43, no. 11, pp. 1591–1600, 2008, doi: 10.1590/s0100-204x2008001100019.
- [6] E. L. Aksakal, S. Sari, and İ. Angin, "Effects of Vermicompost Application on Soil Aggregation and Certain Physical Properties," *L. Degrad. Dev.*, vol. 27, no. 4, pp. 983–995, 2015, doi: 10.1002/ldr.2350.
- [7] H. Wang, L. Wang, and T. Ren, "Long-Term No Tillage Alleviates Subsoil Compaction and Drought-Induced Mechanical Impedance," *Int. Agrophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 297–308, 2022, doi: 10.31545/intagr/154596.
- [8] A. Solgi and A. Najafi, "The Impacts of Ground-Based Logging Equipment on Forest Soil," *J. For. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 28–34, 2014, doi: 10.17221/76/2013-jfs.
- [9] B. E. Udom and J. Ehilegbu, "Critical Moisture Content, Bulk Density Relationships and Compaction of Cultivated and Uncultivated Soils in the Humid Tropics," *Asian Soil Res. J.*, pp. 1–9, 2018, doi: 10.9734/asrj/2018/v1i2681.
- [10] W. Ahmad and T. Uchimura, "The Effect of Moisture Content at Compaction and Grain Size Distribution on the Shear Strength of Unsaturated Soils," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5123, 2023, doi: 10.3390/su15065123.
- [11] A. Ali, J. M. Bennett, S. D. Robertson, D. Krwanji, Y. Zhu, and D. West, "Selection of a Stress-based Soil Compaction Test to Determine Potential Impact of Machine

- Wheel Loads," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 75, no. 3, 2024, doi: 10.1111/ejss.13501.
- [12] D. Tassinari *et al.*, "Soil Compaction Caused by Harvesting, Skidding and Wood Processing in Eucalyptus Forests on Coarse-textured Tropical Soils," *Soil Use Manag.*, vol. 35, no. 3, pp. 400–411, 2019, doi: 10.1111/sum.12509.
- [13] T. Masoud, H. Alsharie, and A. Qasaimeh, "Energy Analysis for the Compaction of Jerash Cohesive Soil," *Comput. Water Energy Environ. Eng.*, vol. 04, no. 01, pp. 1–4, 2015, doi: 10.4236/cweee.2015.41001.
- [14] X. Zhang, M. Wang, and Y. Han, "Model Test Study on the Effect of Dynamic Compaction Under Low Water Content," *PLoS One*, vol. 16, no. 6, p. e0253981, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0253981.
- [15] G. Shahgholi and M. R. Aboali, "Investigating Soil Compaction Using Strain Transducer," *Res. Agric. Eng.*, vol. 64, no. 1, pp. 8–14, 2018, doi: 10.17221/103/2016-rae.
- [16] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 1743:2008 Cara Uji Kepadatan Berat Untuk Tanah*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional, 2008.
- [17] L. T. Njii, "Pengujian Kepadatan Lapangan Dengan Sand Cone," 2025. <https://lauwtjunnji.weebly.com/pengujian--sand-cone.html> (accessed May 30, 2025).
- [18] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2828:2011 Metode uji densitas tanah di tempat (lapangan) dengan alat konus pasir*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2011.
- [19] Dirjen Bina Marga, *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020.
- [20] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, 6th ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2012.
- [21] W. A. Putri, S. N. Ahmad, and A. Minmahddun, "Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Lintasan Terhadap Tingkat Kepadatan Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)," *MEDIA Konstr.*, vol. 9, no. 2, pp. 141–150, Jul. 2024, doi: 10.33772/medkons.v9i2.24.
- [22] A. T. Rulya, I. Adha, and L. Afriani, "Pengaruh Jumlah Lapisan Tanah terhadap Derajat Kepadatan Tanah Berdasarkan Metode Tekanan," *J. Rekayasa Sipil dan Desain*, vol. 6, no. 1, 2018.
- [23] A. Somavilla, A. C. Batistão, D. Holthusen, R. R. Antunes, and P. I. Gubiani, "Role of compaction and drying-wetting cycles on the capability of precompression stress to indicate load history of heavily disturbed soils," *Geoderma*, vol. 401, p. 115344, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115344.
- [24] L. E. Wagner, N. M. Ambe, and D. Ding, "Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties," *Trans. ASAE*, vol. 37, no. 4, pp. 1121–1125, 1994, doi: 10.13031/2013.28185.
- [25] M. J. Akter, M. Aslam, A. Manan, M. Asif, S. Z. A. Shah, and A. Hassan, "Soil Compaction and Classification Analysis for Enhanced Load-Bearing Capacity in Construction," *Eur. J. Theor. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 83–99, Jan. 2025, doi: 10.59324/ejtas.2025.3(1).07.

- [26] M. Zhang, N. Li, and M. Yang, "THE MULTI-FACTOR CONTROL AND EVALUATION OF HIGHWAY SOFT SOIL SUBGRADE STABILITY," *Stavební Obz. - Civ. Eng. J.*, vol. 31, no. 3, pp. 427–443, Oct. 2022, doi: 10.14311/CEJ.2022.03.0032.