

Evaluasi Pemadatan Tanah pada Proyek Pembangunan Gedung

*Willis Diana, Edi Hartono, Agus Setyo Muntohar, Kartika Wulandary
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
*) willis.diana@umy.ac.id

Received: 6 September 2020 Revised: 2 November 2021 Accepted: 3 November 2021

Abstract

Soil compaction is one of the robust methods to improve the strength and compressibility of earthwork since the method is more efficient and practical. However, the compaction work must be evaluated to meet the maximum dry density (MDD) required from the standard laboratory compaction test. The common method used for the evaluation of field density is the sand-cone test. The main objective of this study was to investigate the relative compaction of the borrow-fill at the building construction using the sand-cone test. The test procedure followed the ASTM D1556/D1556M-15e1 and ASTM D698-12e2 for sand-cone test and Proctor standard compaction test. Statistical analysis was performed to evaluate the density and moisture obtained from the field test at Dorm and Research and Innovation Center (RIC) project construction. The probability (p) of the compaction work exceeded the 0,9 MDD or $R_c=90\%$ was calculated $p=13\%$ and $p=18\%$. The results corresponded to average relative compaction (R_c) of 80% and 82% at the Dorm and RIC project, respectively, with the deviation standard of 8.69 dan 8.81.

Keywords: *Compaction, sand-cone method, density, relative compaction, probability*

Abstrak

Pemadatan tanah merupakan salah satu metode yang efisien dan praktis untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi kompresibilitas pekerjaan tanah. Namun, pekerjaan pemadatan harus dievaluasi untuk memenuhi persyaratan relatif terhadap berat volume kering maksimum (MDD) yang diperoleh dari uji pemadatan standar laboratorium. Umumnya metode yang digunakan untuk evaluasi kepadatan lapangan adalah uji kerucut pasir. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kepadatan relatif tanah timbunan pada konstruksi bangunan dengan menggunakan uji kerucut pasir. Prosedur pengujian mengikuti ASTM D1556 / D1556M-15e1 dan ASTM D698-12e2 untuk uji kerucut pasir dan uji pemadatan standar Proctor. Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi kepadatan dan kadar air yang diperoleh dari uji lapangan pada proyek Dorm dan Research and Inovation Centre (RIC). Probabilitas (p) pekerjaan pemadatan yang melebihi 0,9MDD atau $R_c=90\%$ adalah $p=13\%$ dan $p=18\%$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pemadatan relatif rata-rata (R_c) adalah 80% dan 82% pada proyek Dorm dan RIC dengan standar deviasi 8,69 dan 8,81.

Kata kunci: *Pemadatan, metode kerucut pasir, kepadatan, kepadatan relatif, probabilitas*

Pendahuluan

Dalam bidang teknik sipil, kepadatan lapisan tanah di lapangan sering kali menjadi permasalahan. Tidak sedikit dari proyek konstruksi yang melakukan pemadatan menggunakan tanah timbunan untuk menaikkan elevasi tanah dasar. Tanah yang digunakan untuk bahan timbunan harus dipadatkan agar dapat meningkatkan daya dukung, mengurangi penurunan (Ardakani & Kordnaeij, 2019) dan infiltrasi (Yergeau & Obropta, 2013). Pemadatan merupakan salah satu teknik perbaikan tanah yang paling efisien dan praktis digunakan

pada pekerjaan tanah (Altun *et al.*, 2008; Park, 2010). Kepadatan tanah di lapangan memerlukan evaluasi sebagai suatu jaminan kualitas pekerjaannya (Altun *et al.*, 2008; Houston *et al.*, 2016; Walsh *et al.*, 1997).

Metode yang mudah dan sering digunakan untuk mengevaluasi pemadatan tanah lapangan adalah dengan nilai kepadatan relatif tanah (*relative compaction*) (Khalid & Rehman, 2018; Noorany, 1990). Kepadatan relatif didefinisikan sebagai perbandingan antara berat unit kering di lapangan (γ_{df}) dan berat unit kering maksimum (γ_{dmax}) yang

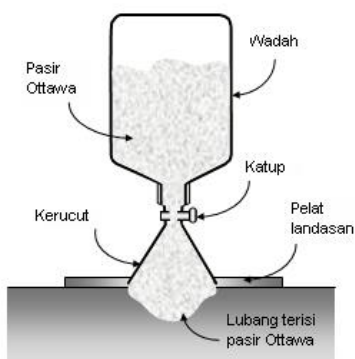
diperoleh di laboratorium untuk suatu tanah dengan mengikuti prosedur pemadatan yang ditentukan, dan secara matematis diberikan oleh Persamaan 1 (Mujtaba *et al.*, 2020). Alam *et al.* (2014) menyebutkan bahwa kepadatan relatif merupakan indeks yang paling tepat digunakan untuk mengontrol kepadatan tanah timbunan.

$$R_c = \frac{\gamma_{df}}{\gamma_{dmax}} \quad (1)$$

Terdapat tiga kategori metode pengujian kepadatan tanah lapangan yaitu; metode pengukuran volume, metode pengukuran kekakuan/modulus dan metode pengukur elektrik massa jenis, kadar air tanah (McLain & Gransberg, 2019), dan parameter visual dengan menggunakan *machine learning* (Bondi *et al.*, 2018).

Salah satu pengujian kepadatan tanah lapangan yang sering digunakan adalah metode kerucut pasir (*sand-cone*) yang merupakan salah satu metode pengukuran volume (Kim *et al.*, 2001) dengan prosedur pengujiannya ditetapkan oleh ASTM D1556/D1556M-15e1 (ASTM International, 2015).

Pengujian kerucut pasir merupakan pengujian yang menggunakan alat berbentuk kerucut dan pasir sebagai media pengisi lubang yang digali pada permukaan yang telah dipadatkan (Gambar 1). Pengujian mengharuskan lubang uji digali di lapangan dan mengukur massa tanah yang dikeluarkan dari lubang uji. Lubang uji kemudian diisi dengan pasir. Pengujian kerucut pasir menghasilkan nilai kepadatan tanah beserta kadar airnya (Park, 2010). Sebaaly *et al.* (2019) menjelaskan bahwa pasir yang digunakan harus bersih, kering, dan bergradasi seragam. Pasir yang sering digunakan adalah pasir Ottawa. Kalibrasi pasir harus dilakukan sebelum melakukan pengujian di lapangan, yaitu menggunakan kerapatan pasir Ottawa 20-30 yang jatuh dari ketinggian 102 mm (4 inch) hingga 254 mm (10 inch) pada bidang datar (Kenarsari *et al.*, 2017).



Gambar 1. Sketsa pengujian metode kerucut pasir

Penelitian-penelitian terdahulu yang telah dilakukan untuk evaluasi pekerjaan pemadatan antara lain menggunakan metode nuklir (McLain & Gransberg, 2019), kerucut pasir (Park, 2010), dan penetrasi kerucut dinamik (Alam *et al.*, 2014). Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi kepadatan tanah lapangan pada proyek pembangunan gedung dengan metode kerucut pasir. Analisis probabilitas terhadap sebaran berat volume kering dan kadar air tanah di lapangan disajikan pada penelitian ini, serta kepadatan relatif tanah dianalisis secara spasial menggunakan kontur.

Metode

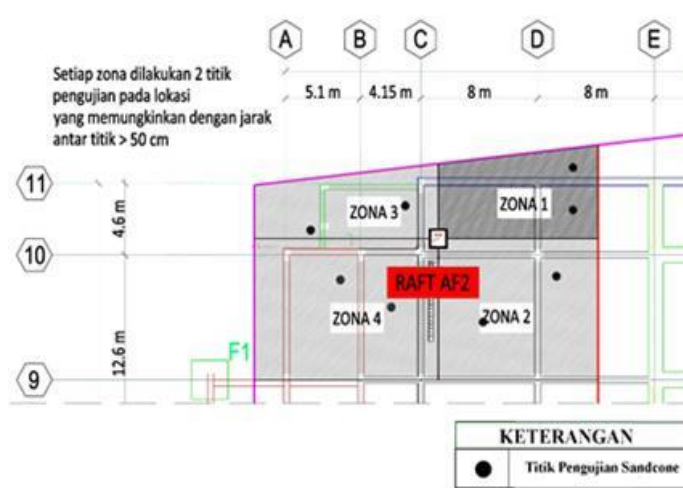
Pengujian kepadatan tanah lapangan dilakukan di lokasi proyek pembangunan gedung Asrama Mahasiswa (Dorm) dan gedung Pusat Riset dan Inovasi (RIC) Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY). Denah dan jumlah titik pengujian ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3 masing-masing untuk Dorm dan RIC. Jumlah titik uji di Dorm sebanyak 24 titik uji dengan dua titik uji per zona yang terbagi seperti diperlihatkan pada denah. Sedangkan di RIC dilakukan 18 titik uji. Prosedur pengujian mengikuti standar ASTM D1556/D1556M-15e1 (ASTM International, 2015).

Kepadatan tanah di laboratorium digunakan untuk menentukan kepadatan tanah maksimum sebagai nilai rujukan kepadatan. Prosedur pengujian proctor standar juga diatur dalam ASTM D698-12e2 (ASTM International, 2012). Pada uji proctor standar, contoh tanah kering dicampur dengan air dan dipadatkan dalam cetakan silinder dengan volume $9,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (cetakan proctor standar) dengan pukulan berulang dari massa alat penumbuk, 2,5 kg, jatuh bebas dari ketinggian 305 mm. Tanah dipadatkan menjadi tiga lapisan, yang masing-masing diberi 25 pukulan. Kepadatan tersebut dinyatakan dengan berat volume kering.

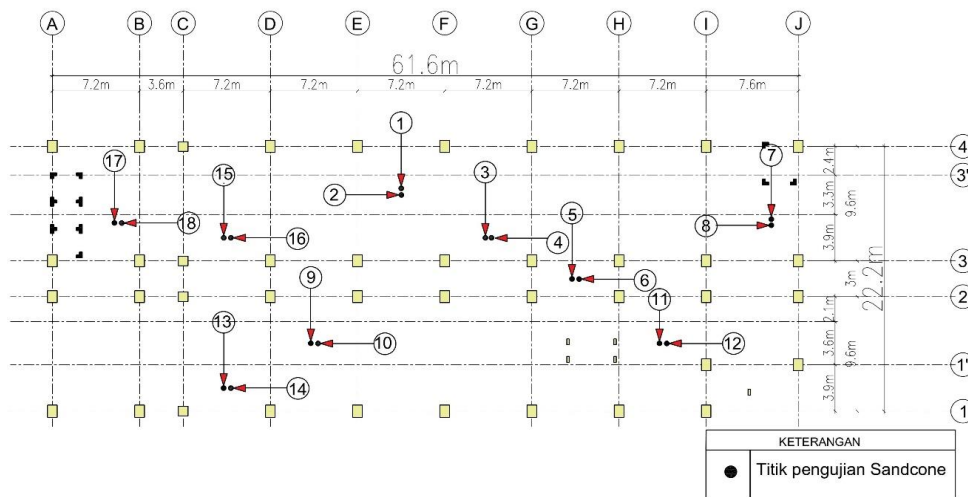
Hasil pengujian pemadatan proctor standar memberikan kurva hubungan kadar air dengan berat volume kering. Berat volume kering maksimum yang diperoleh dari pengujian kepadatan Proctor disebut berat volume kering maksimum (γ_{dmax}). Kadar air yang dicapai saat berat volume kering maksimum disebut kadar air optimum (w_{opt}).

Hasil Penelitian

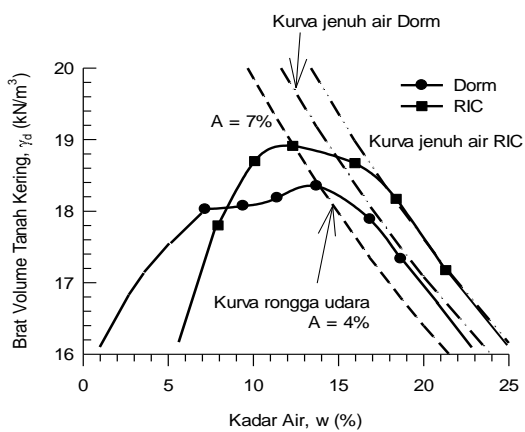
Hasil uji pemadatan Proctor standar contoh tanah timbunan dari proyek Dorm dan RIC disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan kurva pemadatan tersebut diperoleh nilai γ_{dmax} sebesar $18,3 \text{ kN/m}^3$ dan w_{opt} sebesar 14% untuk contoh tanah timbunan di gedung Dorm.



Gambar 2. Denah lokasi titik pengujian sand-cone proyek pembangunan gedung Dorm UMY



Gambar 3. Denah lokasi titik pengujian sand-cone proyek pembangunan gedung RIC UMY



Gambar 4. Kurva pemadatan proctor standar tanah di laboratorium

Hasil pemadatan laboratorium untuk contoh tanah timbunan gedung RIC memiliki nilai γ_{dmax} sebesar 18,9 kN/m³ dan w_{opt} sebesar 12%. Grafik hubungan kadar air dengan berat volume kering masih berada

di bawah kurva jenuh air atau zero air void (ZAV). Kondisi ini menunjukkan bahwa usaha pemadatan masih menyisakan rongga udara pada kondisi γ_{dmax} dan w_{opt} , yaitu 4% dan 7% masing-masing untuk contoh tanah gedung Dorm dan RIC.

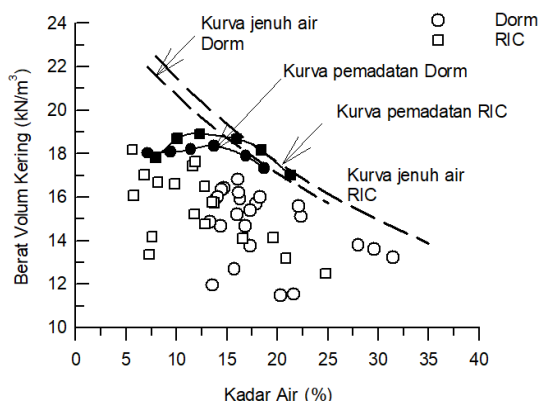
Secara teoritis, kadar air pada kondisi $0,9\gamma_{dmax}$ akan menghasilkan rentang nilai yaitu kering-optimum (w_{dopt}) dan basah-optimum (w_{wopt}). Sehingga pemadatan di lapangan memiliki rentang kadar air $w_{dopt} \leq w \leq w_{wopt}$. Untuk lokasi Dorm, rentang kadar air pada $0,9\gamma_{dmax}$ (16,5 kN/m³) adalah $1,5\% \leq w \leq 21,6\%$, dan kadar air di lokasi RIC memiliki yaitu $5,2\% \leq w \leq 22,7\%$ dengan $0,9\gamma_{dmax} = 17$ kN/m³.

Nilai kepadatan dan kadar air tanah di lapangan

Pengujian kerucut pasir menghasilkan nilai kepadatan dan kadar air tanah hasil pemadatan di lapangan. Hasil pengujian kerucut pasir menunjukkan bahwa kepadatan kering dan kadar air

tanah masih berada di bawah kurva pematatan dan kurva jenuh air seperti disajikan pada Gambar 5.

Nilai kepadatan lapangan pada proyek Dorm berkisar dari 13,2 kN/m³ sampai 16,4 kN/m³ dengan kadar air antara 15% hingga 31%. Sedangkan di lokasi RIC, kepadatan lapangan berkisar dari 13,4 kN/m³ sampai 18,2 kN/m³ dan kadar air berkisar 6 % sampai 25%.

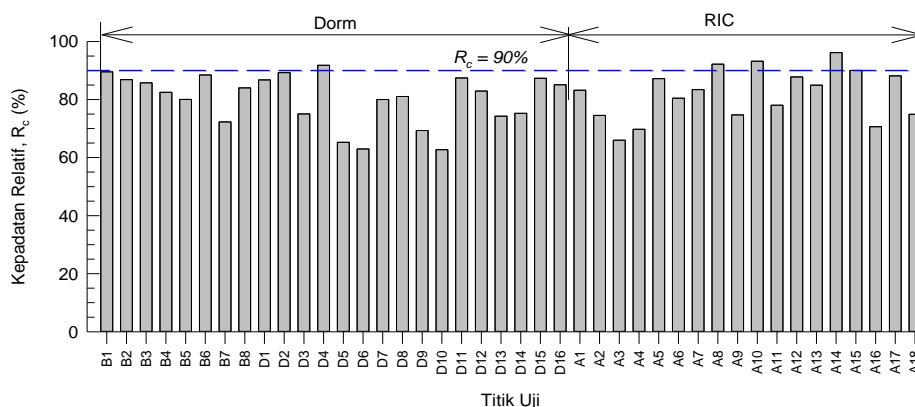


Gambar 5. Sebaran data hubungan kepadatan dan kadar air lapangan

Evaluasi kepadatan relatif

Kepadatan relatif dihitung dengan Persamaan 1 dan hasilnya disajikan pada Gambar 6. Nilai kepadatan relatif rata-rata di lokasi Dorm dan RIC adalah 80% dan 82% dengan standar deviasi sebesar 8,69 dan 8,81. Persyaratan dalam spesifikasi teknik adalah pematatan tanah lapangan harus memiliki nilai kepadatan relatif minimal 90% (BSN, 2017).

Terdapat lima titik uji yang memenuhi persyaratan $R_c \geq 90\%$ yaitu titik B1 dan D4 untuk lokasi Dorm, dan titik A8, A11, A14, dan A15 di lokasi RIC. Secara spasial, pola sebaran kepadatan relatif tanah di lapangan dapat digambarkan sebagai kontur kepadatan relatif seperti dalam Gambar 7 dan 8.



Gambar 6. Hasil kepadatan relatif tanah lapangan

Untuk lokasi *Dorm*, kepadatan relatif terendah terjadi di Zona 3 dan Zona 1 (Gambar 7) yang mencapai 70%. Sedangkan, kepadatan relatif tertinggi mencapai 95% berada di Zona 4. Pekerjaan pematatan di lokasi RIC menghasilkan nilai kepadatan relatif terendah sebesar 68% di area as F–G dan as 4–5. Sedangkan nilai tertinggi mencapai 92% di area as A–B dan as 1–2.

Pembahasan

Kurva pematatan laboratorium pada Gambar 4 relatif datar. Untuk hal ini, Khalid and Rehman (2018) menjelaskan bahwa upaya pematatan tertentu, kurva pematatan relatif lebih datar untuk tanah berbutir halus plastisitas tinggi daripada tanah berbutir halus plastisitas rendah, karena kapasitas penahan airnya yang relatif lebih tinggi, yang menahan penurunan kadar air secara tiba-tiba setelah melewati titik optimum kadar air, dibandingkan dengan tanah berbutir halus plastisitas rendah. Pada Gambar 5 diketahui bahwa berat volume kering tanah lapangan berada di bawah kurva pematatan tanah laboratorium.

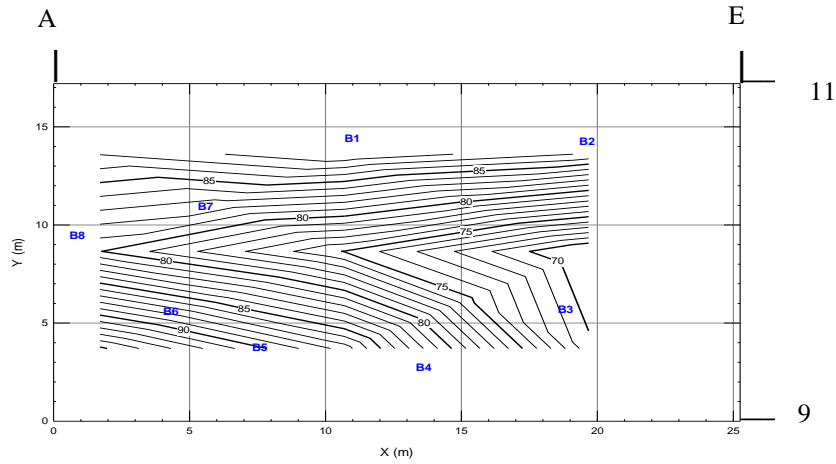
Gambar 9 dan 10 menyajikan distribusi berat volume kering dan kadar air tanah di lapangan. Fungsi distribusi probabilitas berat volume kering tanah didekati dengan fungsi distribusi *normal* (Persamaan 2), dan fungsi distribusi *log-normal* (Persamaan 3) untuk kadar air tanah. Deskripsi statistika berupa nilai rata-rata (μ_x) dan standar deviasi (σ_x) disajikan pada Tabel 1.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2} \quad (2)$$

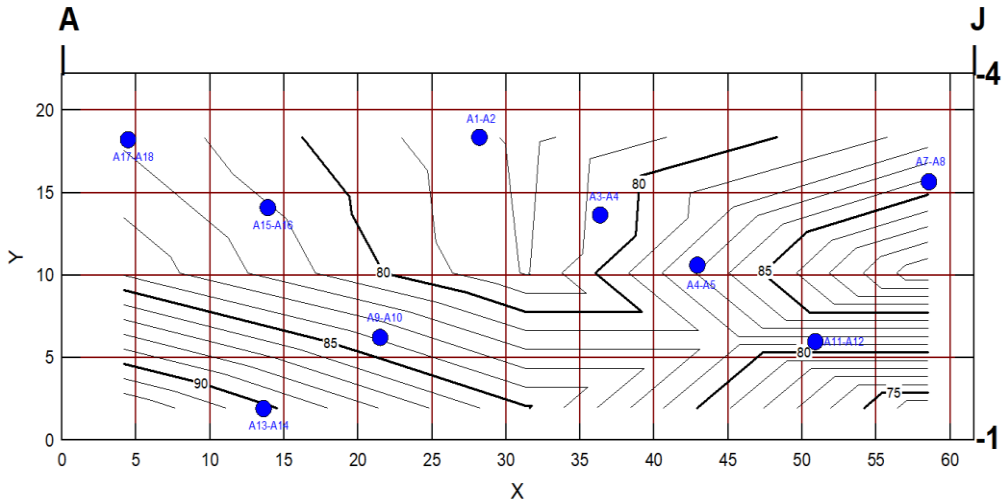
$$f(x) = \frac{1}{x\xi_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2} \quad (3)$$

$$\text{dengan } \lambda_x = \ln\mu_x - \frac{1}{2}\xi_x^2$$

$$\xi_x = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right)}$$



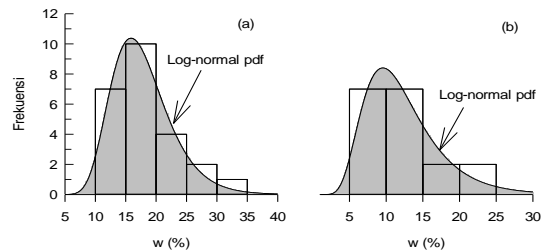
Gambar 7. Kontur kepadatan relatif tanah timbunan Proyek Dorm



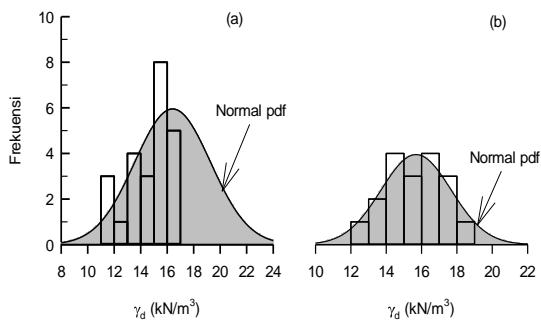
Gambar 8. Kontur kepadatan relative tanah timbunan Proyek RIC UMY

Tabel 1. Deskripsi statistika berat volume kering dan kadar air tanah lapangan

Variabel (X)	Parameter	Dorm	RIC
γ_d (kN/m ³)	μ_X	14,7	15,5
	σ_X	1,59	1,67
w (%)	μ_X	18,4	12,3
	σ_X	5,10	5,39



Gambar 10. Distribusi dan fungsi probabilitas log-normal kadar air tanah lapangan (a) lokasi Dorm (b) lokasi RIC



Gambar 9. Distribusi dan fungsi probabilitas normal berat volume kering tanah lapangan (a) lokasi Dorm (b) lokasi RIC

Dilain pihak Altun *et al.* (2008) yang menggunakan fungsi distribusi *log-normal* untuk berat volume kering dan fungsi distribusi *normal* untuk kadar air tanah setelah melakukan uji Anderson-Darling. Namun, pada prinsipnya distribusi yang paling cocok untuk masing-masing parameter sesuai dengan metode estimasi kemungkinan maksimum (*maximum likelihood*). Untuk *central limit theorem*, fungsi distribusi normal standar $N(\mu_X, \sigma_X^2) = N(0,1)$, dapat dituliskan menjadi Persamaan 4.

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} \quad (4)$$

dengan $Z = \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)$ dan untuk fungsi distribusi log-normal dengan $\ln(x)$ terdistribusi normal,

$$\Theta(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{\zeta^2}{2}\right]} \quad (5)$$

dengan $\zeta = \left[\frac{\ln x - \lambda_x}{\zeta_x}\right]$.

Probabilitas (p) tanah yang dipadatkan dapat mencapai $x = 0,9\gamma_{dmax}$, $P(X > x)$ dinyatakan dengan Persamaan 6.

$$p = P(X > x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{\left(-\frac{r^2}{2}\right)} dt$$

$$p = 1 - \Phi(Z) \quad (6)$$

dengan $\Phi(Z)$ adalah fungsi probabilitas *normal*, yaitu 0,867 untuk lokasi *Dorm* dan 0,817 untuk lokasi *RIC*. Maka probabilitas tanah yang dipadatkan mencapai $0,9\gamma_{dmax}$ atau $R_c = 90\%$ adalah $P(X > 16,5) = 0,13$ (13%) dan $P(X > 17,0) = 0,18$ (18%) masing-masing untuk lokasi *Dorm* dan *RIC*. Mengacu pada fungsi probabilitas *log-normal* pada Gambar 10, probabilitas bahwa tanah dipadatkan pada rentang kadar air antara w_{dopt} dan w_{wopt} dapat dinyatakan sebagai

$$p = P(a \leq b) = P(X = b) - P(X = a)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\zeta e^{\left(\frac{t^2}{2}\right)} dt \Big|_b - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\zeta e^{\left(\frac{t^2}{2}\right)} dt \Big|_a$$

$$p = \Theta(\zeta) \quad (7)$$

dengan $\Theta(\zeta)$ adalah fungsi kumulatif probabilitas log-normal, yaitu 0,766 untuk lokasi *Dorm*, dan 0,920 untuk lokasi *RIC*. Maka, probabilitas tanah dipadatkan pada rentang kadar air yang disyaratkan yaitu 77% di lokasi *Dorm* dan 92% di lokasi *RIC*.

Memperhatikan nilai probabilitas pekerjaan pemadatan di atas, walaupun kadar air tanah di lapangan telah mencapai rentang yang disyaratkan, namun nilai berat volume kering tanah yang dapat mencapai $0,9\gamma_{dmax}$ masih sangat rendah ($p = 0,13$ dan $p = 0,18$). Stark (2020) mendapatkan seringkali berat volume kering tanah dan kadar air diukur menggunakan sampel tanah yang diperoleh dengan baik pasca konstruksi untuk menilai apakah bahan timbunan telah dipadatkan dengan benar dalam kasus kegagalan konstruksi. Selain keterusikan, sampel ini diperoleh setelah terjadi infiltrasi air, pemuaihan, resapan, pembasahan-pengeringan, erosi, suhu tinggi, dan/atau hidrokompresi tanah telah terjadi dan tidak mencerminkan kondisi padat. Berbagai mekanisme ini biasanya menghasilkan

peningkatan kadar air dan penurunan berat unit kering dari timbunan yang dipadatkan dan tidak mencerminkan kondisi awal pemadatan.

Kepadatan relatif tanah lapangan biasanya digunakan untuk mengevaluasi hasil pekerjaan pemadatan di lapangan (Noorany, 1990). Nilai R_c di kedua lokasi yang diuji memiliki standar deviasi yang relatif besar dibandingkan dengan kajian terdahulu. Noorany (1990) menyebutkan bahwa nilai deviasi standar untuk kepadatan relatif tidak pernah kurang dari $\pm 1,4$, dan mencapai setinggi $\pm 6,5$. Pada proyek yang dibangun dengan baik, derajat kontrol pemadatan dapat dicapai berdasarkan deviasi standar sekitar ± 3 . Muntohar (2014) menyatakan bahwa nilai kepadatan relatif yang dianjurkan berkisar antara 90 – 100%.

Nilai R_c yang kurang dari 90% menandakan pemadatan lapangan kurang baik. Atemimi (2016) menjelaskan bahwa uji kepadatan lapangan dengan metode kerucut pasir dilakukan pada kedalaman maksimal 10 cm, sehingga sulit dilakukan pada lapisan yang lebih dalam (Alam *et al.*, 2014). Hasil kepadatan tidak menjangkau seluruh lapisan dan hasilnya tidak nyata. Oleh karena itu, hasil tersebut tidak mewakili fakta kepadatan dalam ketebalan tertentu karena energi berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Park (2010) menjelaskan bahwa kesalahan antara kepadatan yang diasumsikan dan dihitung sangat tergantung pada jenis pasir yang digunakan dalam metode kerucut pasir. Rendahnya kepadatan di lapangan juga dikarenakan banyaknya fraksi ukuran tanah yang lebih besar dari 20 mm ($\frac{3}{4}$ in.).

Untuk tanah yang mengandung lebih dari 10% tertahan saringan No. $\frac{3}{4}$ inch, maka tidak boleh digunakan pada 15cm lapisan teratas timbunan. Mujtaba *et al.* (2020) merekomendasikan bahwa tanah timbunan hendaknya berupa tanah granuler yang mengandung tidak lebih dari 20% fraksi kerikil dan 15% fraksi halus (lanau/lempung). Untuk meningkatkan kepadatan tanah, sebaiknya tanah timbunan diambilkan dari sumber (*quarry*) yang memenuhi persyaratan sesuai spesifikasi pekerjaan tanah dalam SNI 8460-2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik (BSN, 2017).

Nilai kepadatan relatif tanah masih banyak yang kurang dari 90% dapat diartikan bahwa pemadatan lapangan kurang baik. Bila didapatkan nilai-nilai R_c kurang dari yang disyaratkan, sebaiknya dilakukan pemadatan dengan kontrol kadar air. Kadar air dikontrol pada $(w_{opt} - 3)$ atau $(w_{opt} + 3)$ pada saat pemadatan. Timbunan pada lokasi yang tidak dapat dicapai dengan peralatan pemadat mesin gilas, harus dihampar dalam lapisan horizontal dengan tebal gembur tidak lebih dari 15 cm dan dipadatkan

dengan penumbuk mekanis atau timbris (*tamper*) manual dengan berat minimum 10 kg.

Hasil kajian yang dilakukan oleh Atemimi (2016) menyebutkan bahwa kepadatan tanah lapangan cenderung berkurang dengan bertambahnya ketebalan lapisan timbunan. Ketebalan maksimum yang disarankan adalah 20cm. Ketebalan lebih dari 20cm menyebabkan energi pemadatan hanya mencapai lapisan permukaan dan menyisakan kepadatan yang rendah di titik-titik yang lebih dalam, sehingga kepadatan lapangan menurun karena bertambahnya ketebalan lapisan. Kesimpulannya, penurunan R_c tergantung pada penurunan kepadatan lapangan meskipun upaya pemadatannya konstan. Lapisan tanah pada kedalaman 30cm atau kurang dari elevasi tanah dasar harus dipadatkan sampai dengan 100% dari kepadatan kering maksimum yang ditentukan sesuai SNI 1742-2008 (BSN, 2008) atau ASTM D698 (ASTM International, 2012).

Noorany (1990) menyebutkan bahwa nilai berat volume kering maksimum tanah hendaknya ditentukan dari contoh tanah yang diambil dari setiap 25 titik uji lapangan. Kekurangan pengambilan contoh tanah ini dapat mempengaruhi akurasi nilai kepadatan relatif. Tatsuoka and Correia (2018) memberikan alternatif untuk memperoleh kepadatan tanah lapangan sesuai desain, bahwa kontrol kepadatan tanah dapat juga dilakukan dengan menjaga derajat kejenuhan di atas nilai tertentu (atau angka pori di bawah nilai tertentu) tanpa melakukan kontrol pada kepadatan, sehingga metodenya menjadi lebih sederhana, jika derajat kejenuhan dikontrol menjadi derajat kejenuhan optimum dan mempertahankan energi pemadatan (*compaction energy level*) yang tinggi untuk memperoleh *properties* tanah sesuai dengan desain.

Hasil penelitian dan analisis statistik menunjukkan sebaran kepadatan tanah menunjukkan bahwa kepadatan minimal 90% belum diperoleh secara merata pada kedua lokasi baik Dorm maupun RIC. Kedepannya diperlukan penggunaan teknologi pemadatan berbasis kontrol GPS dan penginderaan untuk memudahkan pengontrolan dan peningkatan kualitas secara *real time* (Kaufmann & Andereg, 2008).

Pemadatan cerdas, *IC*, adalah teknologi yang terus berkembang. Alat ini menggunakan akselerometer presisi tinggi dan perangkat pemosisian yang dipasang ke *roller* getaran untuk memantau perilaku gerak drum dan memperkirakan kualitas pemadatan selama konstruksi. *IC* telah dianggap sebagai alat yang potensial karena memberikan ide baru dan metode mutakhir untuk penilaian kekakuan dan

keseragaman material yang dipadatkan secara *real time* sambil mencapai cakupan 100% dari area yang dipadatkan (Han *et al.*, 2022)

Kesimpulan

Persyaratan yang ditentukan dalam spesifikasi teknik bahwa pemadatan tanah lapangan harus memiliki nilai kepadatan relatif minimal 90%. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa kepadatan relatif rata-rata di lokasi *Dorm* dan *RIC* masing-masing adalah 80% dan 82% dengan standar deviasi sebesar 8,69 dan 8,81. Nilai berat volume kering tanah di lokasi *Dorm* berkisar dari 13,2 - 16,4 kN/m^3 , sedangkan di lokasi *RIC* berkisar 13,4 - 18,2 kN/m^3 . Distribusi berat volume kering dan kadar air tanah di lapangan didekati sebagai fungsi distribusi probabilitas normal, dimana probabilitas pemadatan tanah dilakukan melebihi kepadatan relatif yang disyaratkan adalah 13% ($p = 0,13$) dan 18% ($p = 0,18$) masing-masing di lokasi *Dorm* dan *RIC*. Kadar air tanah lapangan berkisar 15% sampai 31% di lokasi *Dorm*, dan 6 - 25% di lokasi *RIC*. Mengacu pada fungsi distribusi probabilitas *log-normal*, probabilitas bahwa tanah dipadatkan pada rentang kadar air antara w_{dopt} dan w_{wopt} yaitu 77% ($p = 0,77$) dan 92% ($p = 0,92$) masing-masing di lokasi *Dorm* dan *RIC*.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT. Umat Mandiri Berkemajuan (UMB) yang telah memberikan izin untuk mempublikasikan hasil pengujian. Terima kasih kepada Afif Labib Wicaksono dan Desi Prasiska selaku asisten di Laboratorium Geoteknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang telah membantu pengujian di lapangan dan di laboratorium.

Daftar Pustaka

- Alam, M. J., Hossain, M. S., & Azad, A. (2014). Development of correlation between dynamic cone resistance and relative density of sand. *Journal of Civil Engineering, Institute of Engineers, Bangladesh (IEB)*, 42(1), 63-76.
- Altun, S., Goktepe, A. B., & Sezer, A. (2008). Investigation of parameters of compaction testing. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 32(4), 201-209.
- Ardakani, A., & Kordnaeij, A. (2019). Soil compaction parameters prediction using GMDH-type neural network and genetic algorithm. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(4), 449-462.

- ASTM International. (2012). D698-12e2: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). In. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2015). D1556/D1556M-15e1: Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method. West Conshohocken, PA
- Atemimi, Y. K. (2016). Relationship between Compaction Ratio (RC) and Compacted Layer Thickness. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 1(4), 122-126.
doi:10.21276/sjeat.2016.1.4.2
- Bondi, G., Creamer, R., Ferrari, A., Fenton, O., & Wall, D. (2018). Using machine learning to predict soil bulk density on the basis of visual parameters: Tools for in-field and post-field evaluation. *Geoderma*, 318, 137-147.
- BSN. (2008). SNI 1742-2008: Cara uji kepadatan ringan untuk tanah. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta
- BSN. (2017). SNI 8460-2017: Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Han, T., Ma, T., Fang, Z., Zhang, Y. and Han, C., 2022. A BIM-IoT and intelligent compaction integrated framework for advanced road compaction quality monitoring and management. *Computers and Electrical Engineering*, 100, p.107981.
- Houston, S. L., Bharadwaj, A., Welfert, B., Houston, W. N., & Walsh, K. D. (2016). Unsaturated Soil Mechanics Principles to Remove and Replace Mitigation for Expansive Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(4), 04015102.
doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001429.
- Kaufmann, K., & Anderegg, R. (2008, June). 3D-construction applications III: GPS-based compaction technology. In *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control & Guidance* (pp. 1-10).
- Kenarsari, A. E., Vitton, S. J., & Beard, J. E. (2017). Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*, 74, 1-11.
- Khalid, U., & Rehman, Z. u. (2018). Evaluation of compaction parameters of fine-grained soils using standard and modified efforts. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1), 1-17.
doi:10.1186/s40703-018-0083-1
- Kim, D.-S., Shin, M.-K., & Park, H.-C. (2001). Evaluation of density in layer compaction using SASW method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(1), 39-46.
- McLain, K. W., & Gransberg, D. D. (2019). Nuclear density gauge compaction testing alternatives: synthesis and critical analysis. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 4(2), 86-96.
doi:10.1080/24705314.2019.1603192
- Mujtaba, H., Farooq, K., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2020). Laboratory and field investigations in granular soils to correlate relative density, relative compaction and grain size. *Journal of the South african institution of civil engineering*, 62(2), 12-21. doi:10.17159/2309-8775/2020/v62n2a2
- Muntohar, A. (2014). *Mekanika Tanah (3 ed.)*. Yogyakarta: LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Noorany, I. (1990). Variability in Compaction Control. *Journal of geotechnical engineering*, 116(7), 1132-1136.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1132)
- Park, S. S. (2010). Evaluation of the sand-cone method for determination of the in-situ density of soil. *Geotechnique*, 60(9), 701-707.
doi:10.1680/geot.9.T.004
- Sebaaly, P. E., Ortiz, J. A., Hand, A. J., & Hajj, E. Y. (2019). Practical method for in-place density measurement of cold in-place recycling mixtures. *Construction and Building Materials*, 227, 116731.
- Stark, T. D. (2020). Postconstruction Evaluation of Fill Compaction. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 12(3), 04520030.
- Tatsuoka, F., & Correia, A. G. (2018). Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design. *Transportation Geotechnics*, 17, 3-23.
- Walsh, K. D., Houston, W. N., & Houston, S. L. (1997). Field implications of current compaction specification design practices. *Journal of construction engineering and management*, 123(4), 363-370.
- Yergeau, S. E., & Obropta, C. C. (2013). Preliminary field evaluation of soil compaction in rain gardens. *Journal of Environmental Engineering*, 139(9), 1233-1236.