

Uji Pengaruh Energi *Rapid Impact Compaction* terhadap Tingkat Kepadatan Tanah Timbunan

Rokhman*, Lawalenna Samang, Tri Harianto

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Jl. Poros Malino km.6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

*Email: rokhmansoq@yahoo.co.id

DOI: 10.25042/jpe.052019.12

Abstrak

Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisis pengaruh energi pemadatan metode *Rapid Impact Compaction* (RIC) terhadap karakteristik pemadatan pada tanah timbunan. Metode yang digunakan adalah model alat RIC hasil pengembangan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Hasanuddin dimana alat ini di kendalikan secara elektro-mekanis. Proses pemadatan dilakukan dengan memvariasikan jumlah tumbukan untuk variasi energi pemadatan. Dimana berat beban penumbuk 70 kg dan tinggi jatuh 15 cm. Untuk uji elemen menggunakan mould berdiameter 15 cm dan tinggi 25 cm sedangkan uji model menggunakan bak uji berdiameter 80 cm dan tinggi 120 cm. Untuk menguji tingkat kepadatan menggunakan DCP Test, CBR Test dan Sandcone Test. Hasil pengujian mendapatkan adanya pengaruh energi pemadatan terhadap nilai CBR dan berat isi kering tanah. Hubungan antara perbandingan energi pemadatan RIC terhadap energi pemadatan *standard proctor* memenuhi persamaan $\gamma_{d\text{ RIC}} = 0,0915 (\text{ESP}) + 1,046$. Dari grafik didapatkan titik perpotongan yang merupakan titik optimum energi RIC untuk mendapatkan kepadatan sesuai energi pemadatan proctor. Dalam pengujian ini didapatkan titik optimum energinya sebesar 2.01 ESP terhadap pemadatan *standard proctor* dan 3.32 ESP terhadap *modified proctor*. Pada pengujian pemadatan RIC model pada kumulatif jumlah tumbukan sebanyak 90 kali tanah tidak mengalami penurunan. Evaluasi kinerja hasil pemadatan RIC didapat nilai *Relatif Compaction* (Rc) sebesar 95 %.

Abstract

Influence Rapid Impact Compaction to the Level of Soil Density. This research is intended to analyze the effect of compaction energy method of Rapid Impact Compaction (RIC) on the compaction characteristics of embankment soil. The method used is the RIC tool model developed from the Hasanuddin University Soil Mechanics Laboratory where this tool is controlled electro-mechanically. The compaction process is carried out by varying the number of collisions for the variation of compaction energy. Where the pounder weight is 70 kg and the height falls 15 cm. To test the elements using molds with a diameter of 15 cm and a height of 25 cm, to test the density level using the DCP Test, CBR Test and Sandcone Test. The test results get the effect of compaction energy on the CBR value and the dry weight content of the soil. The relationship between the comparison of RIC compaction energy with proctor standard compaction energy meets the equation $\gamma_{d\text{ RIC}} = 0.0915 (\text{ESP}) + 1.046$. From the graph, the point of intersection which is the optimum point of RIC energy to get the density according to the proctor compaction energy. In this test, the optimum energy point of 2.01 ESP was obtained against compaction of the standard proctor and 3.32 ESP of the modified proctor. In the compaction testing of the RIC model, the cumulative number of collisions is 90 times that the soil does not decrease. Evaluation of the performance of the RIC compaction results obtained Relative Compaction (Rc) of 95%.

Kata Kunci: Berat isi kering, kepadatan tanah, Rapid impact compaction

1. Pendahuluan

Salah satu metode pemadatan dinamis lapisan timbunan tebal yang dikenal saat ini diantaranya adalah *Rapid Impact Compaction*. Metode ini adalah pemadatan tanah secara dinamis dengan konsep *Low Energi Dynamic Compaction*. Peralatan utama *Rapid Impact Compaction* berupa massa penumbuk yang di jatuhkan dari ketinggian

tertentu. Hal yang membedakan metode ini dengan *Dynamic Compaction* adalah penggunaan massa penumbuk yang lebih ringan, tinggi jatuh yang lebih rendah namun dengan frekuensi tumbukan yang lebih tinggi, sehingga total kumulatif energi yang dihasilkan pada metode RIC lebih besar daripada metode *Dynamic Compaction* (DC) dalam satuan waktu yang sama [1, 2].



Dilaboratorium pengaruh usaha pemadatan umumnya di uji menggunakan *standard proctor* maupun *modified proctor* dengan mengacu pada kurva hasil pemadatan. Telah umum di ketahui bahwa jika energi usaha pemadatan persatuan volume tanah berubah maka kecenderungannya adalah kurva pemadatan juga akan berubah dengan meningkatnya usaha pemadatan dengan parameter utamanya adalah berat volume kering dan kadar air [3].

Menurut *Proctor*, ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering yang dipadatkan sebagaimana persamaan (1) dalam hal ini w (%) persentase kadar air; γ = berat volume tanah. Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya terdapat suatu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya, kepadatan kering pada kadar air optimum didefinisikan sebagai kepadatan kering maksimum. Berdasarkan Persamaan (1) setiap peningkatan kadar air yang melebihi kadar air optimum cenderung mengurangi kepadatan kering [3].

$$\gamma d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (1)$$

Selain kadar air dan jenis tanah, faktor penting lainnya yang mempengaruhi pemadatan adalah energi per satuan volume. Energi pemadatan per satuan volume yang digunakan untuk uji Proctor ditentukan oleh jumlah tumbukan per lapisan (N); jumlah lapisan per mould (l); berat penumbuk (W) dan tinggi jatuh penumbuk (h) persatuan volume mould (V) yang dapat dinyatakan dengan Persamaan (2) [3].

$$E = \frac{N \cdot l \cdot W \cdot h}{V} \quad (2)$$

Meningkatkan usaha pemadatan akan meningkatkan kepadatan maksimum namun akan mengurangi kadar air optimum. Kurva pemadatan secara umum memperlihatkan bahwa rasio void udara tetap sama pada kepadatan maksimum, sehingga pada kadar air yang tinggi, hanya ada sedikit pertambahan kepadatan yang diperoleh

dengan meningkatkan usaha pemadatan. Tanah lempung memiliki kandungan air optimum yang jauh lebih tinggi, akibatnya menurunkan kepadatan kering maksimum. Efek meningkatkan upaya pemadatan juga jauh lebih besar dalam kasus tanah lempung [4].

Peralatan *Rapid Impact Compaction*, RIC terdiri atas tiga komponen utama yaitu alas penumbuk; alur penumbuk, dan penumbuk [5]. Pada metode pemadatan *rapid impact compaction*, penumbuk dijatuhkan secara tetap pada alas penumbuk yang ditempatkan diatas permukaan tanah dengan frekuensi tumbukan antara 30-60/menit sebagai ciri metode *rapid compaction*, [6]. Parameter energi pemadatan metode, RIC ditentukan oleh berat penumbuk (*compactor*); berat dan luas geometri landasan penumbuk (*anvil*); frekuensi tumbukan dan kumulatif total tumbukan dalam satu siklus pemadatan pada titik tumbukan yang sama.

Peralatan *Rapid Impact Compaction*, RIC terdiri atas tiga komponen utama yaitu alas penumbuk; alur penumbuk dan penumbuk. Peralatan penumbuk ditautkan ke hydraulic excavator sebagai perangkat penopang mekanik yang dapat mengatur frekuensi tumbukan antara 40-60/menit sebagai ciri metode *rapid compaction*, [7]. Pada metode *dynamic compaction*, maka total energi E tumbukan per luas bidang kontak alas penumbuk (kJ/m^2), dihitung dengan Persamaan (3), dalam hal ini E adalah kumulatif total energi yang dikenakan kN.m (kJ), A adalah luas bidang tumbuk dari alas penumbuk (m^2), dan N adalah jumlah tumbukan [6].

$$E = \frac{1}{2} (W_H + W_F) \cdot V_F^2 \left(\frac{N}{A} \right) \quad (3)$$

2. Metode Penelitian

2.1. Material

Contoh tanah yang digunakan masuk klasifikasi sebagai tanah lanau plastisitas tinggi (MH) sesuai dengan sistem klasifikasi tanah USCS. Adapun sifat fisik contoh tanah yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum dalam Tabel 1.

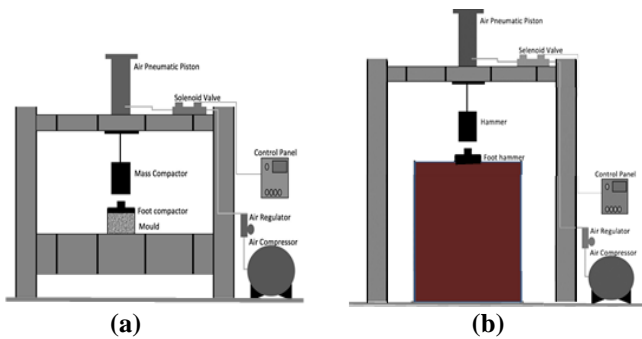


Tabel 1. Sifat fisik material tanah pengujian

Sifat fisik	Nilai
Berat Volume Basah, γ	1,03 gr/cm ³
Kadar air rata-rata, ω	38,36 %
Spesific gravity, G	2,73
Berat isi	1.03 gr/cm ³
Batas Cair, LL	55,89 %
Batas Plastis, PL	47,48 %
Indeks Plastisitas, IP	8,41 %

2.2. Peralatan Pengujian

Dalam penelitian ini digunakan peralatan pengujian *repetead load* dampak berbasis air pneumatik pressure sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 1. Adapun komponen utama peralatan tersebut terdiri dari kompresor udara; *piston double acting*; *valve selenoid*, panel kendali controller, massa penumbuk dan landasan tumbukan, alat ini sebagaimana di uraikan secara rinci dalam [7].



Gambar 1. Set-up peralatan: a. uji RIC elemen; b. Uji RIC Model

Digunakan massa penumbuk yang terbuat dari material baja seberat 70 kg yang ditautkan pada ujung batang piston yang berfungsi sebagai kait beban. Beban tersebut dapat di jatuhkan pada ketinggian sesuai dengan setting ketinggian pada panel kontrol. Untuk pengujian di gunakan mould dengan ukuran diameter dalam 15cm, tigggi 25 cm, volume cetakan 0,0044 m. Untuk proses pemadatan, mold di lengkapi dengan alas pematat yang ukurannya disesuaikan dengan diameter cetakan. Alas tumbukan terbuat dari pelat baja diameter 15 cm.

2.3. Rancangan Pengujian

- **Persiapan Sampel Tanah.**
Tanah dalam tabung silinder untuk kompaksi diperoleh dari sampel yang dibentuk kembali. Untuk menyiapkan sampel ini, sejumlah berat tanah yang sebelumnya telah kering oven dicampur dengan sejumlah air mendapatkan kadar air yang sesuai dengan target kadar air rencana pengujian yaitu 15%-35%, dimana rentang kadar air ini sebelumnya telah di uji menggunakan pemadatan proctor. Tanah yang telah di atur kadar air diambil seberat 4,6 kg dan di isikan dalam tabung silinder tanpa dilakukan pemadatan dengan mengontrol kepadatan gemburnya sebesar 1,03 gr/cm³.
- **Proses Pemadatan RIC elemen**
Upaya pemadatan dengan *Rapid Impact Compaction* dilakukan pada mould berukuran diameter 15 cm dan tinggi 25 cm. Untuk mengetahui pencapaian nilai kepadatan dilakukan uji DCP dan CBR. Pemadatan dilakukan menggunakan berbagai tingkat energi dengan menerapkan berbagai usaha dampak yang digunakan. Penumbuk yang berbentuk persegi dengan berat 70 kg dijatuhkan dari ketinggian 15 cm dengan variasi jumlah pukulan 5, 15, 25 dan 35 m lihat Gambar 1(a).
- **Proses Pemadatan RIC Uji Model**
Upaya pemadatan dengan *Rapid Impact Compaction* pada bak uji silinder dengan ukuran diameter 80 cm dan tinggi 120 cm. yang diisi tanah sampai penuh sebanyak 621 kg. Pemadatan dilakukan menggunakan peralatan RIC dengan berat penumbuk 70 kg, tinggi jatuh 15 cm dna geometri alas tumbukan berdiameter 30 cm. Proses pemadatan dilakukan sampai dengan tanah tidak mengalami penurunan lagi. Untuk mengetahui pencapaian nilai kepadatan dilakukan uji CBR, uji DCP dan uji Sandcone lihat Gambar 1(b).



3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Energy Proctor Compaction dan Rapid Impact Compaction

Hasil perhitungan *Energy Proctor Compaction* dan *Rapid Impact Compaction* serta rasio perbandingannya dapat dilihat pada Tabel berikut ini:

Tabel 2. Energy Proctor Compaction dan Rapid Impact Compaction serta rasio perbandingannya

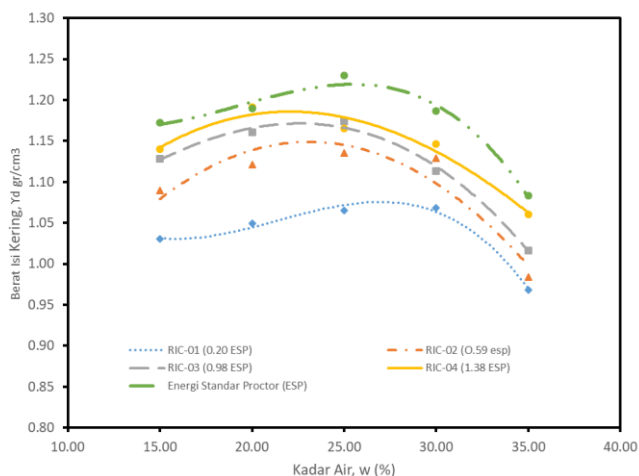
Type Pemadatan	Berat Penumbuk (kg)	Jumlah Tumbukan Per Lapis	Energi Pemadatan (kJ/m ³)	Rasio Energi Standar
Standard Proctor	2,5	25	592	1,00
Modified Proctor	4,54	25	2695	4,54
RIC-01	70	5	117	0,20
RIC-02	70	15	351	0,59
RIC-03	70	25	585	0,98
RIC-04	70	35	819	1,38

Energy pemadatan baik metode *standard proctor* maupun *modified* di dasarkan pada usaha pemadatan yang dilakukan dalam sebuah mould pemadatan berdiamater 101.6 mm dan tinggi 116,43 mm yang memiliki volume 944 cm³. Pada pengujian *standard proctor* besarnya energi pemadatan adalah 592 kJ/m³, sementara untuk *modified proctor* adalah 2.695 kJ/m³. Sementara untuk model *Rapid Impact Compaction* besarnya didapatkan dengan memvariasikan jumlah tumbukan 5 kali, 15 kali, 25 kali dan 35 kali dengan berat beban penumbuk yang digunakan sebesar 70 kg, tinggi jatuh 15 cm dan 1 lapis tanah.

Semua proses pemadatan dilakukan hanya menggunakan 1 lapisan pada mould berdiameter 15 cm dan tinggi 25 cm dengan volume 0.0044 m³. Sehingga dari proses pemadatan RIC ini besarnya energi usaha pemadatan bervariasi antara 111 kJ/m³ untuk yang terkecil dan 1.365 kJ/m³ untuk energi yang terbesar atau jika dibandingkan terhadap energi *standard proctor* bervariasi antara 0,20-1.38 kali.

3.2. Kepadatan Kering dan Kadar Air Optimum pada Tingkat Energi Berbeda

Untuk menjelaskan hubungan variabel kepadatan kering, kadar air optimum pemadatan dan tingkat energi dari usaha pemadatan, maka dilakukan pengamatan dengan hubungan ketiga variabel tersebut, dalam hal ini hubungan tersebut dinyatakan sebagai perbandingan terhadap energi metode *standard proctor* yaitu 592 kJ/m³ terhadap perubahan kadar air setiap mould pemadatan sesuai besarnya energi *Rapid Impact Compaction* yang diberikan lihat Gambar 2.



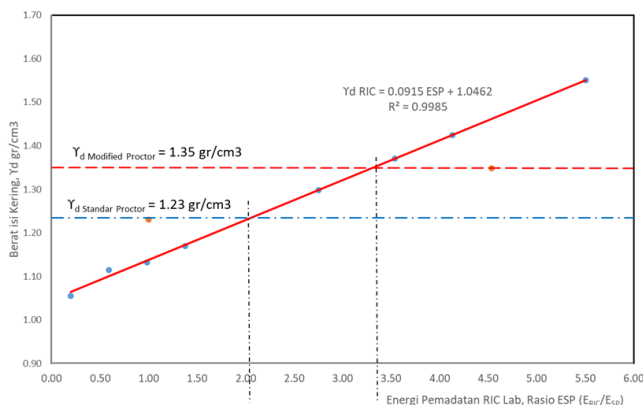
Gambar 2. Hubungan antara energi RIC dan kadar air terhadap berat isi kering (Yd)

Kecenderungan berat isi kering dipengaruhi oleh tingkat energi usaha pemadatan dan kadar air seperti yang terlihat pada Gambar 2. Terlihat bahwa setiap tingkat energi yang diberikan akan menghasilkan kadar air optimum untuk menghasilkan berat isi kering tanah maksimum. Dimana hasilnya memperlihatkan bahwa penambahan energi cenderung mengurangi besarnya nilai kadar air optimum. Untuk energi terbesar pada RIC ini kadar air optimum didapat 20 %. Bila di dibandingkan hasil pemadatan *standard proctor* maka berat isi kering yang dihasilkan masih dibawah *standard proctor*. Untuk mencapainya tentunya harus menaikkan energi RIC menyamai bahkan lebih dari energi *standard proctor*.



3.3. Hubungan Energi Pemadatan RIC dan Energi Pemadatan Proctor terhadap Berat Isi Kering

Untuk energi yang sama dengan *standard proctor* (1.00 ESP = 592 kJ/m³) dihasilkan berat isi kering sebesar 1.14 gr/cm³ atau sebesar 92.68% terhadap berat isi kering hasil pemadatan *standard proctor* (1.23 gr/cm³). Agar berat isi kering hasil pemadatan RIC sama dengan berat isi kering tanah *standard proctor* maka energi RIC harus ditingkatkan sampai dengan 2.01 ESP atau sebesar 1 190 kJ/m³ lihat Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antara energi pemadatan RIC, standard proctor dan modified proctor terhadap berat kering

Dari Gambar 3 diperoleh persamaan berat isi kering tanah hasil pemadatan RIC yaitu :

$$Yd_{RIC} = 0.0915 \text{ ESP} + 1.0462 \quad (4)$$

dimana :

Yd_{RIC} = berat isi kering tanah hasil pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC)

ESP = rasio perbandingan antara Energi RIC terhadap Energi *Standard Proctor* (E_{RIC}/E_{SP})

Kadar air optimum untuk mendapatkan berat isi kering maksimum untuk energi pemadatan *standard proctor* adalah sebesar 25% Sedangkan kadar air optimum untuk mendapatkan berat isi kering maksimum pada pemadatan RIC adalah sebesar 20% sesuai hasil pengujian pada sejumlah tingkat energi yang berbeda.

Hubungan antara garis berat isi kering hasil pemadatan RIC (Yd_{RIC}) dan berat isi kering hasil pemadatan *standard proctor* ($Yd_{Standard Proctor}$) terjadi perpotongan di titik 2.01 ESP, artinya dengan energi RIC dinaikan sampai dengan 2.01 kali energi *Standard Proctor* ($2.01 \times 592 \text{ kJ/m}^3 = 1190 \text{ kJ/m}^3$) maka berat isi kering yang dihasilkan bisa mencapai 1.23 gr/cm³ sama dengan berat isi kering hasil pemadatan *standard proctor* lihat Gambar 3. Untuk menghasilkan energi sebesar 1190 kJ/m³ bila menggunakan alat RIC dengan berat penumbuk 70 kg, tinggi jatuh 15 cm dan diameter alas tumbukan 15 cm maka dibutuhkan jumlah tumbukan sebanyak 51 kali.

Hubungan antara garis berat isi kering hasil pemadatan RIC (Yd_{RIC}) dan berat isi kering hasil pemadatan *Modified Proctor* ($Yd_{Modified Proctor}$) terjadi perpotongan di titik 3.32 ESP, artinya dengan energi RIC dinaikan sampai dengan 3.32 kali energi *Standard Proctor* ($3.32 \times 592 \text{ kJ/m}^3 = 1965 \text{ kJ/m}^3$) maka berat isi kering yang dihasilkan bisa mencapai 1.35 gr/cm³ sama dengan berat isi kering hasil pemadatan *Modified Proctor* lihat Gambar 3. Untuk menghasilkan energi sebesar 1965 kJ/m³ bila menggunakan alat RIC dengan berat penumbuk 70 kg, tinggi jatuh 15 cm dan diameter alas tumbukan 15 cm maka dibutuhkan jumlah tumbukan sebanyak 85 kali.

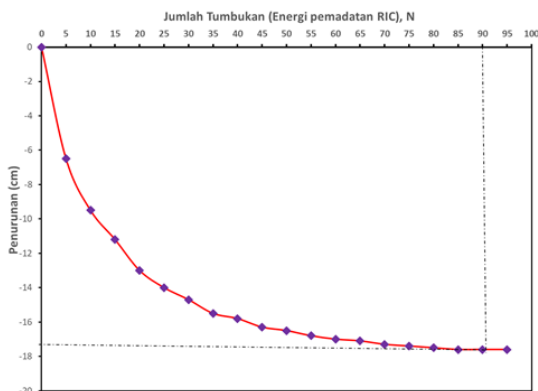
Titik perpotongan garis hubungan antara berat isi kering hasil pemadatan RIC dan *Standard Proctor* maupun *Modified Proctor* adalah sebagai acuan untuk mendapatkan energi optimum agar hasil pemadatannya (berat isi kering tanah) yang diperoleh sama dengan kepadatan tanah hasil pemadatan *Standard Proctor* maupun *Modified Proctor*.

3.4. Hubungan antara Jumlah Tumbukan (Energi Pemadatan RIC Uji Model) terhadap Penurunan

Hasil pemadatan RIC uji model dapat diketahui bahwa pada awal penumbukan terjadi penurunan yang cukup dalam. Namun pada penumbukan selanjutnya penurunannya berkurang dan akhirnya pada kumulatif jumlah pukulan 90 kali tanah tidak mengalami penurunan lagi. Hal ini sejalan dengan



teori yang mengatakan bahwa salah satu syarat dihentikan penumbukan pada pemadatan RIC salah satunya adalah bila kumulatif jumlah tumbukkan sudah mencapai 90 kali.



Gambar 4. Hubungan antara Nilai CBR dan kedalaman tanah

3.5. Evaluasi kinerja pemadatan RIC dengan Analisa *Relatif Compaction*, R_c

Untuk mengevaluasi hasil pemadatan RIC di lapangan maka dilakukan uji model. Pengujian ini dilakukan pada bak uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 80 cm dan tinggi 120 cm. Sehingga volume drum tersebut adalah $0,603 \text{ m}^3$ kemudian diisi tanah dengan berat isi $1,03 \text{ gr/cm}^3$ sampai penuh atau sebanyak 621 kg. Berat penumbuk *Rapid Impact Compaction* yang digunakan adalah 70 kg dengan tinggi jatuh 15 cm dan diameter alas 30 cm serta jumlah tumbukan sebanyak 90 kali. Setelah proses pemadatan selesai maka dilakukan pengujian tingkat kepadatan menggunakan Sandcone test untuk mendapatkan berat isi kering tanah (γ_d) dan juga dilakukan pengujian Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Test untuk mendapatkan nilai CBR lapangan.

Untuk kriteria kinerja hasil pemadatan tersebut diukur dengan nilai *Relatif Compaction* (R_c) yaitu membandingkan hasil pencapaian kepadatan kering hasil pemadatan RIC terhadap kepadatan kering hasil pemadatan *standard proctor*, sesuai Persamaan (5) yang dinyatakan dalam prosentase. Nilai ini menyatakan pencapaian kepadatan tanah hasil pemadatan RIC terhadap kepadatan tanah hasil pemadatan *standard proctor*. Dari hasil pengujian pemadatan RIC pada uji model dengan sandcone

test maka diperoleh berat isi kering (γ_d) = $1,174 \text{ gr/cm}^3$. Sehingga nilai *Relatif Compaction* (R_c) dapat diperoleh sebesar 95.46%.

$$R_c = \frac{\gamma_d \text{ RIC Model}}{\gamma_d \text{ Standar Proctor}} \quad (5)$$

Dengan demikian dari hasil pengujian ini dapat diketahui bahwa pemadatan RIC dapat menghasilkan kinerja pemadatan yang baik, sehingga pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC) dapat diterapkan di lapangan.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Adanya hubungan antara besarnya energi pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC) dan kadar air terhadap besarnya berat isi kering tanah. Semakin besar energi pemadatan maka berat isi kering tanah juga akan meningkat, yang dibarengi dengan kadar optimum kecenderungannya semakin berkurang.
- Besarnya energi pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC) mempengaruhi karakteristik pemadatan tanah yaitu berat isi kering. Semakin besar energi pemadatan RIC kecenderungannya akan menghasilkan berat isi kering tanah yang lebih besar.
- Besarnya energi pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC) berdasarkan kumulatif jumlah tumbukan berpengaruh terhadap penurunan tanah. Penurunan tanah awalnya cukup besar tetapi lama kelamaan berkurang dan sampai tidak terjadi penurunan lagi. Penurunan tidak terjadi pada jumlah kumulatif pukulan mencapai 90 kali. Artinya pemadatan RIC dapat dihentikan jika kumulatif jumlah tumbukan sudah mencapai 90 kali.
- Untuk mengevaluasi kinerja pemadatan *Rapid Impact Compaction* (RIC) di lapangan maka dapat digunakan Analisa *Relatif Compaction* yaitu perbandingan antara berat isi kering hasil pemadatan RIC terhadap berat isi kering hasil *standard proctor*. Dari hasil pengujian didapat nilai R_c sebesar 95% ini berarti pemadatan RIC dapat digunakan di lapangan.



Referensi

- [1] P. J. Becker (2011) "Assessment of *rapid impact compaction for transportation infrastructure applications*" Graduate Theses and Dissertations. Paper 10261, Iowa State University.
- [2] M. M. Mohammed, H. Roslan, and S. Firas (2013), "Assessment of *rapid impact compaction* in ground improvement from in-situ testing," *Journal of Central South University*, vol. 20, pp. 786–790.
- [3] B. M. Das, (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*, 7 th. Cengage Learning 200 First Stamford Place, Suite 400 Stamford, CT 06902 USA.
- [4] C. Rajasekhar, A. Naga Sai baba, and M. Kameswara Rao, (2016) "To Develop a Correlation Between CBR and Dynamic Cone Penetration Value," *Int. J. Technol. Res. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 11–16.
- [5] B. Arifin, L. Samang, T. Harianto, and A. B. Muhiddin, (2017) "Pengembangan Alat Uji *Pneumatic Rapid Impact Compaction*," *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 11*, Universitas Tarumanagara, Jakarta, pp. 75–80.
- [6] F. Falkner, C. Adam, I. Paulmichl, D. Adam, and J. Fürpass, (2010) "*Rapid Impact Compaction for Middle-Deep Improvement of the Ground – Numerical and Experimental Investigations*," *From Res. to Des. Eur. Pract.*, no. June, pp. 2–11.
- [7] D. Adam and I. Paulmichl, (2007) "*Rapid Impact Compactor – An Innovative Dynamic Compaction Device for Soil Improvement*," in *Improvement of Soil Properties*, pp. 183–193.

