

PENGARUH ENERGI PEMADATAN DI LABORATORIUM TERHADAP PARAMETER KOMPAKSI MATERIAL *CRUSHED LIMESTONE* PADALARANG

Andrias Suhendra Nugraha ⁽¹⁾, Jimmy Glorius Dwi Saputra ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mahasiswa Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan dan Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha
Email: andrias.snugraha@gmail.com

⁽²⁾ Alumnus Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha
Email: jimmyglorius@yahoo.com

ABSTRAK

Pelaksanaan konstruksi timbunan jalan (*road embankment*) merupakan suatu pekerjaan yang memerlukan kajian geoteknik. Kajian geoteknik dilakukan terhadap material timbunan (*fill material*) yang akan digunakan pada saat tahapan pemadatan (kompaksi) di lapangan. Evaluasi terhadap hasil suatu proses kompaksi mengacu terhadap parameter kompaksi dari *fill material* yang telah disyaratkan oleh spesifikasi desain. Parameter kompaksi tersebut antara lain adalah kadar air optimum (*optimum moisture content*, w_{opt}) dan berat isi kering maksimum (*maximum dry density*, $\gamma_{dry\ max}$).

Tujuan studi ini adalah untuk menganalisis dan mengevaluasi pengaruh energi pemadatan di laboratorium terhadap parameter kompaksi material *crushed limestone* yang berasal dari daerah Padalarang, Jawa Barat. Terdapat 4 (empat) variasi energi pemadatan (E) yang ditinjau pada studi ini yaitu : 605 kN.m/m³ (energi *standard Proctor*, E1); 1.4 E1; 2.2 E1 dan 3.0 E1. Keseluruhan uji kompaksi di laboratorium menggunakan *mold* dan *rammer* untuk *standard Proctor test* (ASTM D 698).

Hasil studi menunjukkan bahwa peningkatan energi pemadatan untuk kompaksi di laboratorium sebesar 3 kali energi pemadatan *standard Proctor*, hanya menghasilkan kenaikan $\gamma_{dry\ max}$ sebesar 5% dan merubah nilai w_{opt} sebesar 3%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan energi pemadatan di laboratorium tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai $\gamma_{dry\ max}$ maupun w_{opt} , untuk kondisi *crushed limestone* bergradasi buruk (*poorly graded*) dengan rentang ukuran butir 0.85mm – 4.75mm.

Kata kunci:, energi pemadatan, parameter kompaksi *crushed limestone*

ABSTRACT

The implementation of road embankment construction is a work that requires a geotechnical study. A geotechnical study is carried out on fill material which will be used during the compaction stage in the field. Evaluation of the results of a compacting process refers to the compacting parameters of the fill material that have been required by the design specifications. The compacting parameters include optimum water content (w_{opt}) and maximum dry density ($\gamma_{dry\ max}$).

The aim of this study is to analyze and evaluate the effect of compaction energy in the laboratory on the compacting parameters of crushed limestone material originating from Padalarang, West Java. There are 4 (four) variations of compaction energy (E) reviewed in this study, namely: 605 kN.m / m³ (energy of standard Proctor, E1); 1.4 E1; 2.2 E1 and 3.0 E1. All compaction tests in the laboratory use molds and rammers for the standard Proctor test (ASTM D 698).

The results of the study showed that an increase in compaction energy for compacting in the laboratory was 3 times the compaction energy of the standrad Proctor, only increase $\gamma_{dry\ max}$ by 5% and changing w_{opt} by 3%. This shows that for poorly graded crushed limestone with grain size ranges; 0.85mm - 4.75mm, the increase in compaction energy for laboratory tests does not significantly affect the value of $\gamma_{dry\ max}$ or w_{opt} .

Keywords: compaction energy, compaction parameter of crushed limestone

1. PENDAHULUAN

Pelaksanaan konstruksi timbunan jalan (*road embankment*) merupakan suatu pekerjaan yang memerlukan kajian geoteknik. Kajian geoteknik yang dilakukan diantaranya adalah kajian teknis terhadap material timbunan (*fill material*) yang akan digunakan pada saat tahapan pemadatan (kompaksi) di lapangan. *Fill material* yang digunakan pada timbunan jalan, pada umumnya adalah material tanah. Pada perkembangan saat ini, *fill material* dapat berupa material *crushed rock* /batu pecah (Choi et al, 2018) maupun *rock dust* / abu batu (Satyanarayana et al, 2013).

Evaluasi terhadap hasil suatu proses kompaksi mengacu terhadap parameter kompaksi dari *fill material* yang disyaratkan oleh spesifikasi desain. Parameter kompaksi tersebut antara lain adalah kadar air optimum (*optimum moisture content*, w_{opt}) dan berat isi kering maksimum (*maximum dry density*, $\gamma_{dry\ max}$). Kedua parameter tersebut dapat diperoleh dari hasil uji kompaksi di laboratorium. Pada kasus di mana kekuatan tanah (*strength of soil*) yang lebih tinggi diperlukan, maka energi pemadatan perlu ditingkatkan pula (Gurtug dan Shridaran, 2015).

Pada studi ini akan dilakukan evaluasi perubahan parameter kompaksi dari *crushed limestone* sebagai *fill material* terhadap besaran energi kompaksi yang berbeda-beda. *Limestone* adalah jenis batuan sedimen (*sedimentary rock*) yang didominasi oleh mineral *calcite* (Waltham, 2009). Material *crushed limestone* yang digunakan pada studi ini berasal dari daerah Padalarang, Jawa Barat.

2. TUJUAN

Tujuan studi ini adalah untuk menganalisis dan mengevaluasi pengaruh energi pemadatan di laboratorium terhadap parameter kompaksi pada material *crushed limestone* Padalarang.

3. METODOLOGI

Pengujian terhadap material *crushed limestone* dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah - Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung. Metoda untuk setiap uji antara lain adalah :

- Uji kadar air (*water content*, w) di laboratorium mengacu pada standar uji ASTM D 2216.
- Uji *specific gravity*, G_s di laboratorium mengacu pada standar uji XP CEN ISO/TS 17892-3.

- Uji *sieve analysis* di laboratorium mengacu pada standar uji : BS 1377, ASTM C 136 dan ASTM D 2487.
- Uji kompaksi di laboratorium menggunakan *mold* (cetakan) dan *rammer* (penumbuk) *standard Proctor* dan mengacu pada standar uji ASTM D 698.

3.1 Material Uji

Material *limestone* yang digunakan sebagai sampel uji pada studi ini berasal dari salah satu *quarry* di Padalarang, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat. Ukuran butir awal dari material tersebut adalah berupa *boulder* seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. *Limestone* berukuran *Boulder* (Ukuran butir > 300mm)

Untuk mendapatkan ukuran butir yang akan digunakan sebagai sampel uji, pada material *limestone* berukuran *boulder* tersebut diberlakukan proses *crushing*, yaitu proses penghancuran dengan menggunakan mesin *crusher* di salah satu pabrik di kawasan Padalarang. Mesin *crusher* yang digunakan tampak pada Gambar 2.



Gambar 2. Mesin *crusher*

Proses *crushing* dimulai dengan tahap penghancuran material *limestone* berukuran *boulder* dengan menggunakan mesin *crusher* hingga diakhiri proses tapis

dengan saringan yang tersusun dimulai dari 4mm, 3mm, 2mm, dan 1mm (Nugraha et al, 2017). Mekanisme proses *crushing* tersebut tampak pada Gambar 3,



Gambar 3. Proses *crushing*

Setelah melalui proses *crushing* di pabrik, selanjutnya sampel uji dimasukkan ke dalam karung dengan berat $\pm 50\text{kg}$ untuk dibawa ke laboratorium uji seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Sampel Uji Material *Crushed Limestone* Saat Tiba di Laboratorium

Setelah tiba di laboratorium, material uji melewati proses *quartering* untuk mendapatkan sampel uji yang representatif. Proses *quartering* tampak pada Gambar 4.



(a)



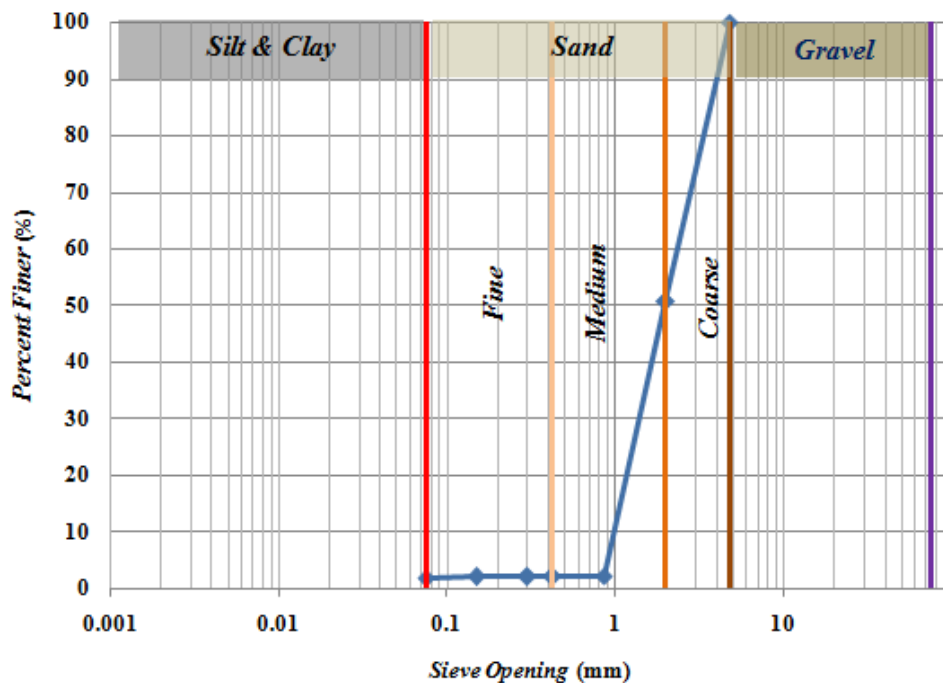
(b)

Gambar 4. (a) Proses *Quartering* (b) Sampel Uji Material *Crushed Limestone*

Nilai *water content* dan *specific gravity* untuk material *crushed limestone* dinyatakan pada Tabel 1. Kadar air yang dinyatakan pada Tabel 1 adalah pada kondisi inisial (saat sampel uji dikeluarkan dari karung / tahap persiapan sampel uji). Sementara kurva distribusi ukuran butir untuk material uji tampak pada Gambar 5.

Tabel 1. Indeks Properti Sampel Uji Material *Crushed Limestone*

Material Uji	<i>Crushed Limestone</i>
<i>Water Content, w (%)</i>	0.17
<i>Specific Gravity, G_s</i>	2.71



Gambar 5. Kurva Distribusi Ukuran Butir Sample Uji Material *Crushed Limestone*

Gambar 5 menunjukkan bahwa material *crushed limestone* yang digunakan sebagai sampel uji adalah didominasi ukuran butir 0.85mm – 4.75mm sebesar 98% dan *fines content* (material yang lolos saringan No.200 [0.075mm]) sebesar 2%.

Nilai *coefficient of uniformity* (koefisien keseragaman), C_u , dan nilai *coefficient of curvature* (koefisien gradasi), C_c ditentukan dengan menggunakan persamaan yang mengacu pada ASTM D 2487, sebagai berikut :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2)$$

dimana:

D_{10} = diameter yang bersesuaian dengan 10% lolos ayakan (*sieve*)

D_{30} = diameter yang bersesuaian dengan 30% lolos ayakan (*sieve*)

D_{60} = diameter yang bersesuaian dengan 60% lolos ayakan (*sieve*)

Nilai C_u , C_c serta jenis gradasi dari sampel uji dinyatakan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter C_u , C_c , % Fines dan Jenis Gradasi untuk Sampel Uji Material Crushed Limestone

Material Uji	Coefficient of Uniformity (C_u)	Coefficient of Curvature (C_c)	Jenis Gradasi
Crushed Limestone	2.43	0.87	Poorly graded

Uji unsur kimia pada material *crushed limestone* dilakukan dengan metoda XRF. Uji tersebut dilakukan di Laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung. Hasil uji unsur kimia dinyatakan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kimia dengan Metoda XRF pada Material Crushed Limestone (Nugraha et al, 2017)

Oksida	Satuan	Jumlah	Elemen
SiO ₂	%	0.839	Si
TiO ₂	%	0.0155	Ti
Al ₂ O ₃	%	0.268	Al
Fe ₂ O ₃	%	0.232	Fe
MnO	%	0.0095	Mn
CaO	%	55.86	Ca
MgO	%	1.33	Mg
Na ₂ O	%	0.0878	Na
K ₂ O	%	0.0174	K
P	%	0.0325	P
SO ₃	%	0.015	S

SrO	%	0.0286	Sr
LOI (Lost of Ignation)	%	40.36	-

Tabel 4 menunjukkan bahwa menunjukkan bahwa oksida yang terbesar adalah CaO, dengan jumlah 55,86%.

3.2 Energi Kompaksi Di Laboratorium

Mold (cetakan) dan *rammer* (penumbuk) *standard Proctor* (ASTM D 698) yang digunakan untuk keseluruhan uji kompaksi di laboratorium tampak pada Gambar 5.



Gambar 5. Mold dan Rammer untuk Uji Standard Proctor

Energi pemadatan/kompaksi (E) ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$E = \frac{\text{Berat Rammer} \times \text{Tinggi Jatuh} \times \text{Jumlah Lapis} \times \text{Jumlah Tumbukan per lapis}}{\text{Volume Mold}} \quad (3)$$

dimana:

- Berat *rammer* = 2.5 kg
- Tinggi jatuh = 30.5 cm
- Volume *mold* = 950 cm³
- Jumlah tumbukan per lapis = 25; 35; 56; dan 75 (4 variasi)
- Jumlah lapisan = 3 lapisan (di dalam *Mold*) dan tetap untuk setiap variasi tumbukan

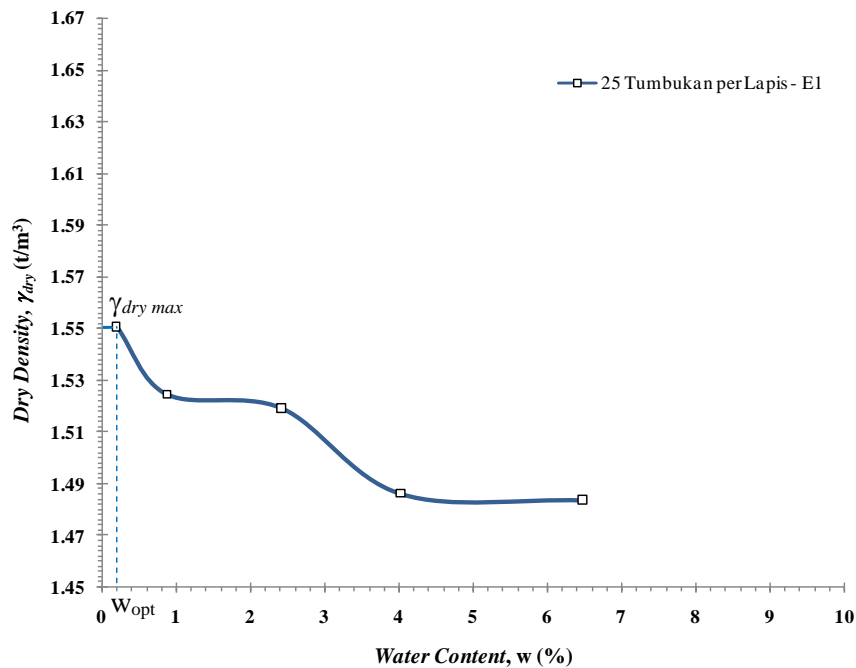
Penomoran sampel uji dan besar energi yang bersesuaian dengan variasi jumlah tumbukan per lapis tanah pada *mold standard Proctor* dinyatakan pada Tabel 6.

Tabel 6. Energi Pemadatan untuk Setiap Jumlah Tumbukan per Lapis Tanah Pada *Mold-Standard Proctor*

Jumlah Tumbukan Per Lapis	Energi Pemadatan, E	
	(kN.m/m ³)	Simbol
25	605	E1
35	847	E2
56	1356	E3
75	1816	E4

4. HASIL UJI DAN ANALISIS

Kurva kompaksi yang diperoleh dari hasil uji kompaksi terhadap material *crushed limestone* dengan energi kompaksi E1 tampak pada Gambar 6. Parameter kompaksi untuk material *cruhsed limestone* dengan energi kompaksi 605 kN.m/m³ (energi *standard Proctor test*) dinyatakan pada Tabel 7.

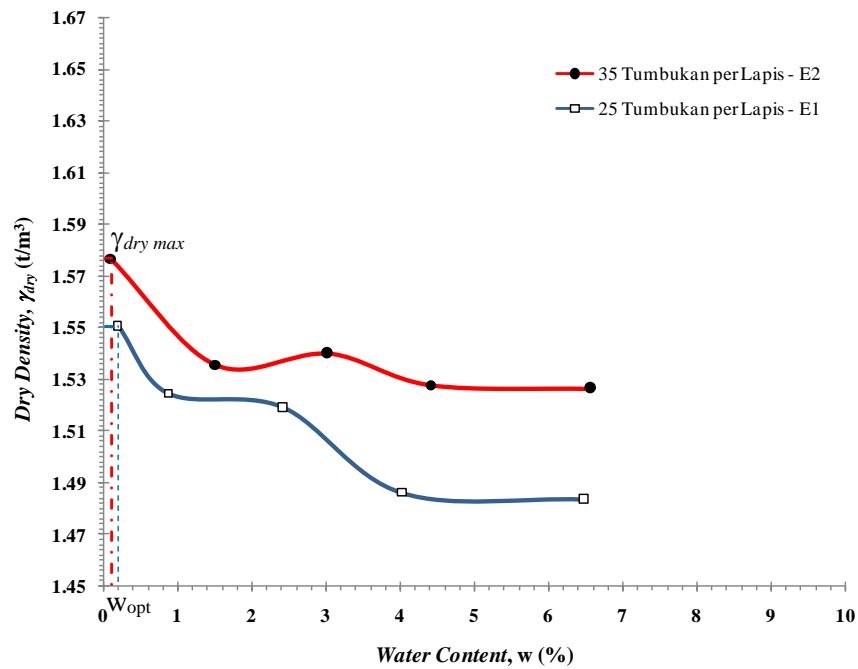


Gambar 6. Kurva Kompaksi untuk 25 Tumbukan per Lapis (Energi, E1 = 605 kN.m/m³)

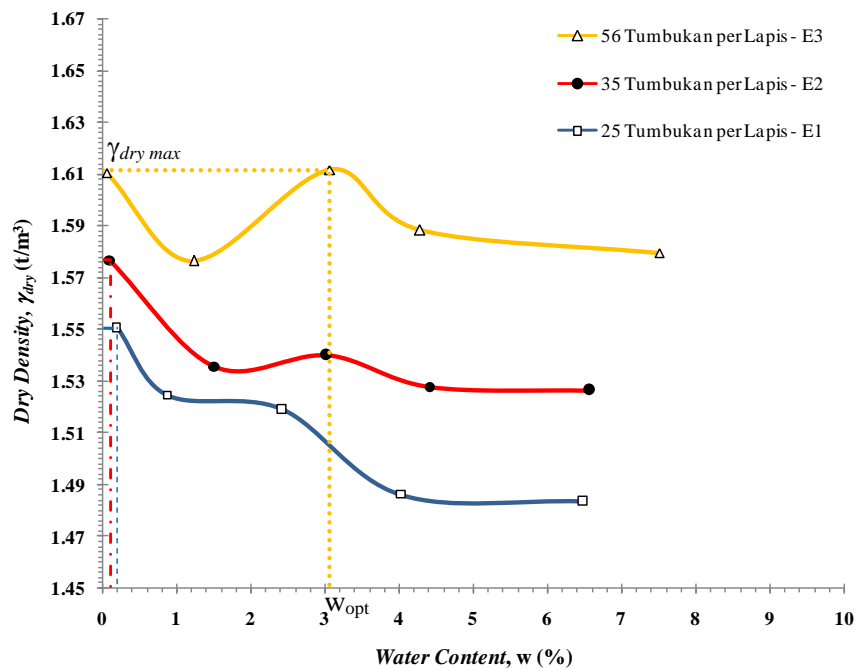
Tabel 7. Parameter Kompaksi untuk Energi = E1 (Energi *Standard Proctor*)

Jumlah Tumbukan per Lapis	Energi (kN.m/m ³)	W _{opt} (%)	γ _{dry max} (t/m ³)
25	605	0.2	1.55

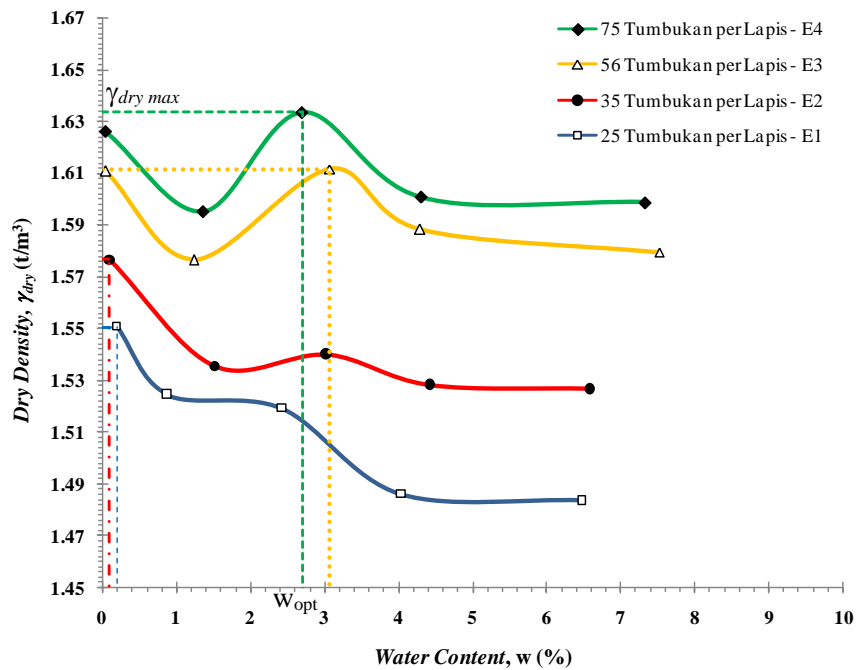
Perbandingan kurva kompaksi material *crushed limestone* pada kondisi 35 tumbukan per lapis (E2), 56 tumbukan per lapis (E3) dan 75 tumbukan per lapis (E4) terhadap kurva kompaksi pada kondisi 25 tumbukan per lapis (E1 atau energi *standard Proctor test*) tampak berturut-turut pada Gambar 7 hingga Gambar 9.



Gambar 7. Perbandingan Kurva Kompaksi E2 Terhadap E1



Gambar 8. Perbandingan Kurva Kompaksi E3 dan E2 Terhadap E1



Gambar 9. Perbandingan Kurva Kompaksi E4, E3 dan E2 Terhadap E1

Gambar 9 menunjukkan bahwa terdapat 2 (dua) pola atau *trend* kurva kompaksi yang dihasilkan. Pola pertama adalah dihasilkan oleh kurva kompaksi dengan energi E1 dan E2, sementara pola kedua dihasilkan oleh kurva kompaksi dengan energi E3 dan E4.

Pada pola pertama, nilai $\gamma_{dry\ max}$ diperoleh pada kondisi $w_{opt} < 1\%$. Sementara pada pola kedua, nilai nilai $\gamma_{dry\ max}$ diperoleh pada kondisi w_{opt} mendekati nilai 3%.

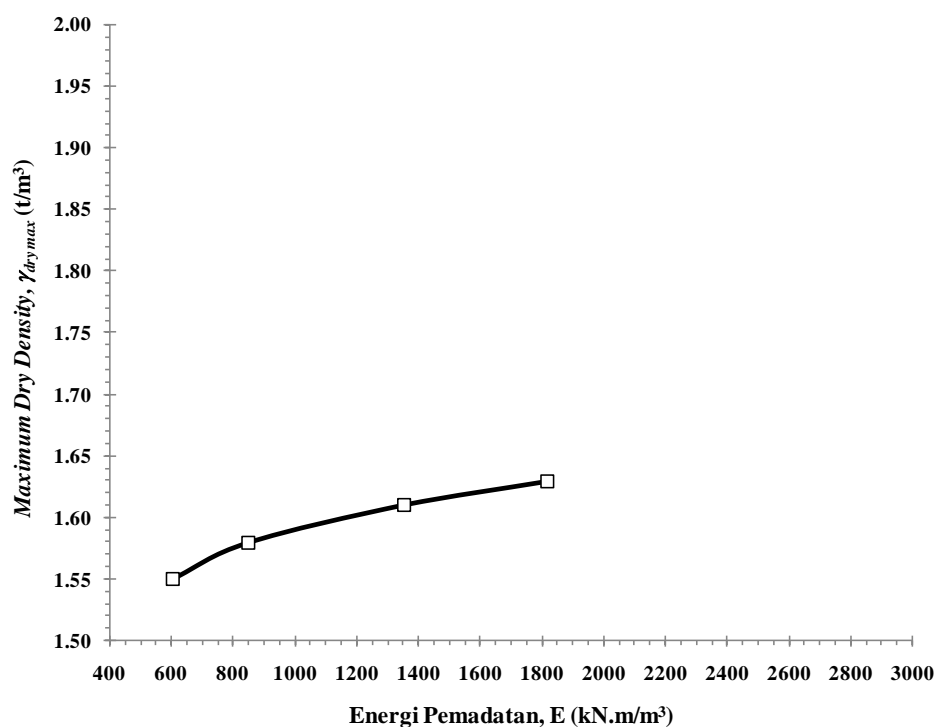
Parameter kompaksi yang diperoleh dari setiap kurva kompaksi (4 variasi energi) dinyatakan Tabel 7.

Tabel 7. Parameter Kompaksi Material *Crushed Limestone* untuk Setiap Variasi Energi

Jumlah Tumbukan Per Lapis	Energi Pemasatan		w_{opt} (%)	$\gamma_{dry\ max}$ (t/m^3)
	($kN.m/m^3$)	Simbol		
25	605	E1	0.2	1.55
35	847	E2	0.1	1.58
56	1356	E3	3.1	1.61
75	1816	E4	2.7	1.63

Tabel 7 menunjukkan bahwa pada saat uji kompaksi dengan kondisi energi pepadatan E2, w_{opt} cenderung berkurang sedikit dari w_{opt} yang diperoleh pada saat energi E1, hal ini bersesuaian dengan nilai $\gamma_{dry\ max}$ pada kondisi E2 lebih besar sedikit dari $\gamma_{dry\ max}$ pada kondisi E1 (pola pertama). Demikian pula halnya pada kondisi energi pepadatan E4, w_{opt} cenderung berkurang sedikit dari w_{opt} yang diperoleh pada saat energi E3, hal ini bersesuaian dengan nilai $\gamma_{dry\ max}$ pada kondisi E4 lebih besar sedikit dari $\gamma_{dry\ max}$ pada kondisi E3 (pola kedua).

Kurva hubungan antara energi pepadatan (E) dan $\gamma_{dry\ max}$ tampak pada Gambar 10. Batasan kurva tersebut adalah untuk rentang nilai $w_{opt} \simeq 0.1\% - 3.0\%$.



Gambar 10. Kurva Energi Pematatan - $\gamma_{dry\ max}$

Rasio energi pematatan, persentase peningkatan $\gamma_{dry\ max}$ dan rasio $\gamma_{dry\ max}$ terhadap kondisi uji *standard Proctor* untuk setiap variasi energi pematatan dinyatakan pada Tabel 8.

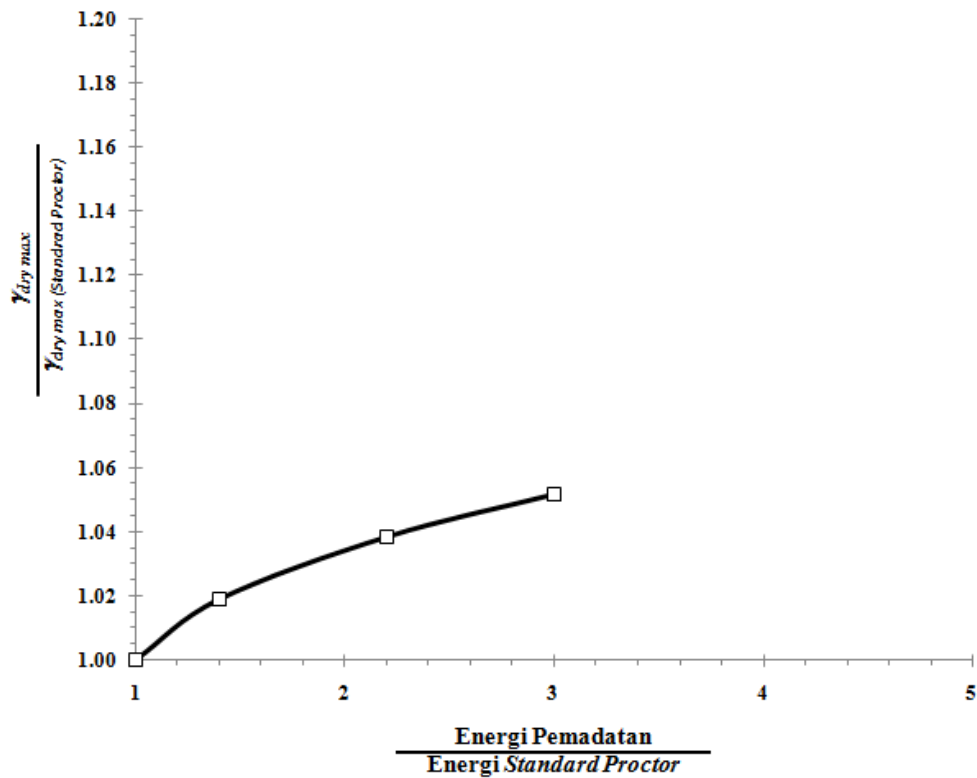
Tabel 8. Rasio Energi Pematatan, Persentase Peningkatan $\gamma_{dry\ max}$ dan Rasio $\gamma_{dry\ max}$ terhadap kondisi Uji *Standard Proctor* untuk setiap Variasi Energi

Energi		Energi Pematatan Energi (SP)	$\gamma_{dry\ max}$ (t/m ³)	Peningkatan $\gamma_{dry\ max}$ (%)	$\frac{\gamma_{dry\ max}}{\gamma_{dry\ max\ (SP)}}$
(kN.m/m ³)	Simbol				
605*	E1	1.0	1.55*	-	1.00
847	E2	1.4	1.58	2	1.02
1356	E3	2.2	1.61	4	1.04
1816	E4	3.0	1.63	5	1.05

Keterangan : * = SP = *Standard Proctor*

Tabel 8 menunjukkan bahwa kenaikan energi dari E1 (605 kN.m/m³) menjadi 3.0 x E1 (E4 = 1816 kN.m/m³) hanya menaikkan $\gamma_{dry\ max}$ sebesar 5%.

Rasio energi pematatan dan rasio $\gamma_{dry\ max}$ pada Tabel 7 selanjutnya digunakan untuk penggambaran kurva normalisasi energi (E) pematatan terhadap energi *standard Proctor* dan $\gamma_{dry\ max}$ terhadap $\gamma_{dry\ max}$ (*Standard Proctor*) seperti tampak pada Gambar 11.



Gambar 11. Kurva Normalisasi $\frac{\text{Energi Pemasadatan}}{\text{Energi Standard Proctor}}$ vs $\frac{\gamma_{dry\ max}}{\gamma_{dry\ max\ (Standard\ Proctor)}}$

Kurva normalisasi pada Gambar 11 menunjukkan bahwa kurva membentuk suatu kecenderungan untuk menjadi landai (asimtotik) setelah energi pepadatan lebih besar dari 3 kali energi *standard Proctor*.

5. SIMPULAN

Dari hasil studi dapat disimpulkan bahwa peningkatan energi pepadatan untuk kompaksi di laboratorium dari energi *standard Proctor* sebesar 605 kN.m/m³ (E1) menjadi 1816 kN.m/m³ (3xE1) hanya menaikkan *maximum dry density*, $\gamma_{dry\ max}$ sebesar 5%, yaitu dari semula 1.55 t/m³ menjadi 1.63 t/m³. Sementara nilai *optimum moisture content*, w_{opt} berubah dari 0.1% (kondisi E1) menjadi 2.7% (kondisi 3xE1).

Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan energi pepadatan di laboratorium tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai $\gamma_{dry\ max}$ maupun w_{opt} , untuk kondisi *crushed*

limestone bergradasi buruk (*poorly graded*) dan rentang ukuran butir 0.85mm – 4.75mm.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM C 136, *Standard Test Methods for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, Annual Book of ASTM Standards.
2. ASTM D 2216, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture Content) of Soil and Rock by Mass*, Annual Book of ASTM Standards.
3. ASTM D 2487, *Standard Practice for Classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, Annual Book of ASTM Standards.
4. ASTM D 698, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, Annual Book of ASTM Standards.
5. BS 1377, (1990), *Method of Test for Soils for Civil Engineering Purposes-Part 2: Classification Tests*, BSI.
6. Gurtug, Y., and Sridharan, A., (2015), “*Prediction of Compaction Behaviour of Soils at Different Energy Levels*”, *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.7, No.3.
7. Nugraha, A.S., Fahlevi, J.D., Soentpiet, S.H., (2017), *Studi Pengaruh Ukuran Butir terhadap Parameter Kompaksi dan Nilai CBR Material Crushed Limestone Padalarang*, *Jurnal Teknik Sipil* Vol. 13 No. 2, pp. 160 - 179.
8. Satyanarayana, P.V.V., Teja, R.P., Harshanandan, T., Chandra, K.L, (2013), “*A Study On The Use Of Crushed Stone Aggregate And Crusher Dust Mixes In Flexible Pavements*”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 11, November-2013 1126 ISSN 2229-5518, pp 1126 – 1136.
9. Waltham, T., (2009), *Foundation of Engineering Geology*, 3rd Ed., Spon Press, London.
10. XP CEN ISO/TS 17892-3, (2005), *Laboratory Testing of Soil-Part 3: Determination of Particle Density – Pycnometer Method*, French Standardization, Geotechnical Investigation and Testing.
11. Yong-Jin Choi, Donghyun Ahn, Tan Hung Nguyen and Jaehun Ahn, (2018), “*Assessment of Field Compaction of Aggregate Base Materials for Permeable Pavements Based on Plate Load Tests*”, *Sustainability* 2018, 10, 3817; doi:10.3390/su10103817.