

PERUBAHAN NILAI KEPADATAN RELATIF TANAH PASIR AKIBAT VARIASI PERCEPATAN MAKSIMUM GEMPA

Muhammad Yunus^{1*}, Achmad Bakri Muhiddin², Tri Harianto² dan Ardy Arsyad²

^{1*}Mahasiswa Program Studi S3 Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Kabupaten Gowa
e-mail: yunusm22d@student.unhas.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Kabupaten Gowa
e-mail: bakrim@unhas.ac.id

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Kabupaten Gowa
e-mail: vriharianto@unhas.ac.id

⁴Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Kabupaten Gowa
e-mail: ardysyad@unhas.ac.id

ABSTRAK

Gempa bumi sering kali menyebabkan perubahan sifat fisik tanah, termasuk perubahan nilai kepadatan relatif (*relative density*). Kepadatan relatif tanah merupakan parameter penting yang menentukan kekuatan geser tanah, ketahanan terhadap likuifaksi, dan stabilitas tanah saat menerima beban dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan nilai kepadatan relatif tanah akibat variasi percepatan beban gempa. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental menggunakan alat uji shaking table di laboratorium. Nilai kepadatan relatif tanah pasir diambil sebesar 40%, percepatan beban gempa divariasikan 0,3g; 0,4g; dan 0,5g. Alat Hand Cone Penetrometer digunakan untuk menentukan tahanan penetrasi konus (q_c) dan melakukan evaluasi hubungan antara percepatan beban gempa, dan kepadatan relatif (D_r) tanah. Hasil penelitian menunjukkan nilai kepadatan relatif (D_r) yang diperoleh tidak seragam pada tiap kedalaman lapisan tanah akibat variasi percepatan maksimum gempa (*Peak Ground Acceleration/PGA*) yang diberikan, sehingga menginduksi aliran air dari bawah ke atas yang membuat lapisan tanah pada bagian atas (dangkal) rentan mengalami likuifaksi.

Kata kunci: kepadatan relatif, tahanan penetrasi konus, percepatan maksimum gempa, *shaking table*

6. PENDAHULUAN

Di wilayah dengan resiko gempa yang tinggi, seperti Indonesia yang berada di jalur cincin api Pasifik (Suyadi et al., 2023), studi mengenai perubahan sifat fisik tanah akibat gempa menjadi sangat penting. Fenomena likuifaksi tanah dan deformasi yang menyertai selama terjadinya gempa bumi merupakan salah satu ancaman utama terhadap stabilitas infrastruktur. Peristiwa gempa bumi berulang di masa lalu, seperti gempa Aceh 2004 (Aksa et al., 2020), gempa Padang 2009 (Rusnardi & Kiyono, 2011), gempa Palu 2018 (Hazarika et al., 2021), dan gempa Majene 2021 (Arsyad et al., 2024) melaporkan kejadian likuifaksi tanah yang disertai dengan penurunan tanah dan kegagalan fondasi.

Salah satu dampak utama gempa bumi terhadap tanah adalah perubahan struktur internalnya, termasuk redistribusi partikel tanah yang dapat mengubah sifat fisik dan mekaniknya. Salah satu parameter tanah yang sangat dipengaruhi oleh gempa adalah **kepadatan relatif tanah** (*relative density*), yang merupakan indikator tingkat kekompakan atau kerapatan tanah dibandingkan dengan kondisi tanah yang paling longgar/lepas dan paling padat. **Kepadatan relatif tanah** memainkan peran penting dalam menentukan stabilitas tanah, kekuatan geser, dan ketahanan terhadap fenomena seperti likuifaksi. Likuifaksi sering kali terjadi pada tanah granular, terutama pasir yang jenuh air, ketika tanah kehilangan kekuatannya akibat tekanan air pori yang meningkat selama gempa bumi. Variasi percepatan maksimum gempa (*Peak Ground Acceleration/PGA*) dapat mempercepat redistribusi partikel tanah dan memicu perubahan drastis pada nilai kepadatan relatif, sehingga memengaruhi daya dukung tanah dan kestabilannya.

Penelitian mengenai efek dari pembebanan gempa bumi, khususnya pada saat terjadi likuifaksi dan hubungannya dengan nilai tahanan penetrasi konus (q_c) serta kepadatan relatif tanah menjadi topik bahasan yang menarik khususnya dalam mempelajari studi kasus kejadian likuifaksi di lapangan seperti yang dilakukan oleh beberapa peneliti (Gu et al., 2022; Jamiolkowski et al., 2003a; Sharp et al., 2010). Sebagian besar catatan kasus kejadian likuifaksi dalam basis data pemicu terjadinya likuifaksi hanya mencakup data hasil uji penetrasi kerucut (*Cone Penetration Test / CPT*) yang dikumpulkan setelah terjadinya peristiwa likuifaksi, sehingga memunculkan pertanyaan mengenai sejauh mana data tersebut dapat merepresentasikan kondisi tanah sebelum kejadian (Darby et al., 2017).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan tahanan penetrasi konus (q_c) dari tanah yang diberikan variasi percepatan maksimum gempa (PGA), serta mengevaluasi perubahan nilai kepadatan relatif tanah dan hubungannya

dengan nilai tahanan penetrasi konus (q_c). Alat *shaking table* yang dipasang dengan bak pengujian transparan digunakan untuk melakukan pengujian. Tanah pasir dalam kondisi jenuh dengan kepadatan relatif 40% disiapkan dan diuji berulang dengan variasi PGA 0.3g, 0.4g, dan 0.5g dengan durasi waktu selama 60 detik.

7. METODOLOGI PENELITIAN

Pasir yang digunakan

Jenis tanah pasir yang digunakan dalam penelitian ini berupa jenis pasir lokal yang diperoleh di sekitar daerah pantai Galesong, Kabupaten Takalar, Provinsi Sulawesi Selatan. Sampel pasir Galesong ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sampel pasir Galesong

Shaking Table

Pengujian laboratorium dilakukan menggunakan shaking table yang tersedia di Laboratorium Geoteknik dan Geoenvironmental, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dimensi unit shaking table adalah 1,2 m x 1,2 m dengan kapasitas 3 T. Gerakan horizontal meja dapat dibentuk dengan menggunakan aktuator servo-hidrolik yang dipasang di atas shaking table, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Kecepatan puncak maksimum, panjang langkah maksimum, frekuensi operasi, dan rentang akselerasi masing-masing adalah 1 m/s, perpindahan maksimum 400 mm, 0,01-50 Hz, dan 0,001-1g. Frekuensi akselerasi dan beban dinamis dapat dipilih sesuai dengan kondisi pengujian menggunakan akuisisi data yang dikontrol secara digital.



Gambar 2. Shaking table

Persiapan model fisik

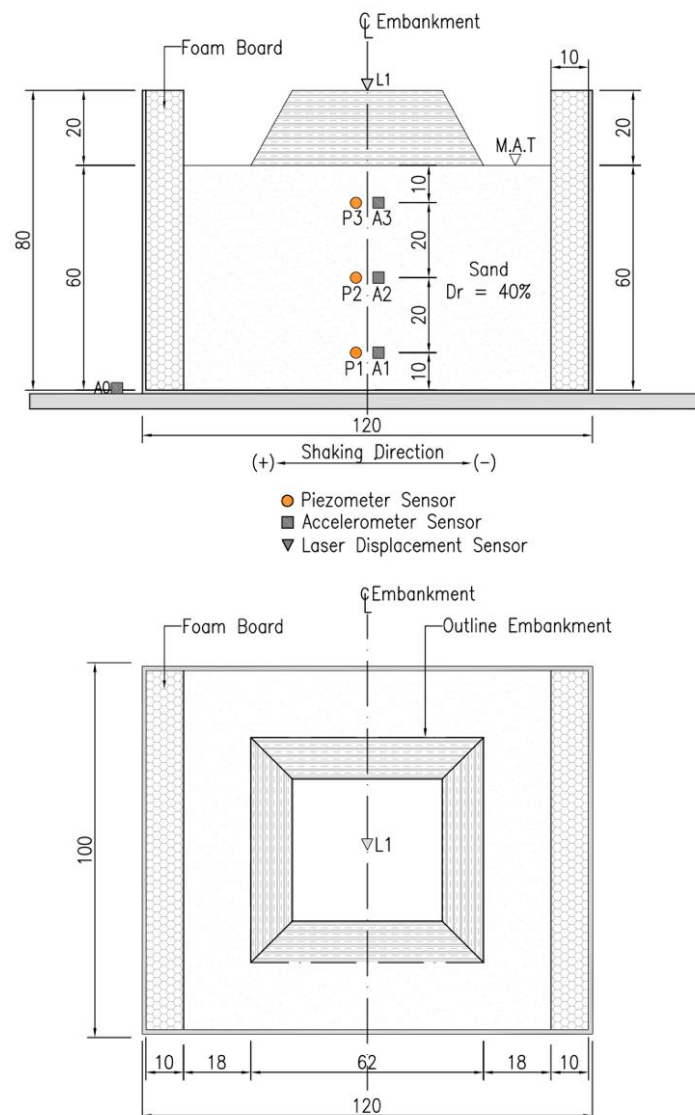
Dalam pengujian eksperimental ini, model bak pengujian transparan berukuran 120 cm x 100 cm x 80 cm (panjang x lebar x tinggi) dibuat khusus dan digunakan dalam penelitian ini. Kaca acrylic yang digunakan untuk membuat model bak memiliki ketebalan 10 mm, dan diikat dengan aman menggunakan braket baja yang diikat ke rangka baja. Karena kekakuan wadah dapat menimbulkan efek batas pada sampel tanah (Lee et al., 2012), maka untuk meminimalkan efek batas ini, di bagian samping dari dinding bak pengujian dipasang papan busa (*foam board*) berupa busa polyurethane. Papan busa ini berfungsi untuk mereduksi pengaruh gelombang yang dipantulkan dari dinding samping bak pengujian yang kaku (Lombardi et al., 2015) (Ghorbani et al., 2023).

Model fisik pengujian di laboratorium disiapkan dengan metode *sand bed saturation*, di mana lapisan pasir kering setebal 600 mm dipersiapkan dengan kepadatan relatif 40%. Untuk menjaga keseragaman kepadatan, lapisan tersebut dibagi menjadi enam bagian. Estimasi kebutuhan pasir dilakukan menggunakan metode pembobotan berdasarkan berat isi kering pasir (γ_d) dan volume bak pengujian. Pada pelaksanaan, setiap lapisan setebal 100 mm membutuhkan 194,52 kg pasir, sehingga total berat pasir kering yang digunakan untuk enam lapisan adalah 1.167,12 kg. Pasir kering yang telah ditimbang sesuai dengan berat masing-masing lapisan kemudian dituangkan secara seragam ke dalam bak

uji, dengan tinggi jatuh (*fall height*) dijaga sebesar 20 cm untuk memastikan pencapaian kepadatan relatif 40% (Padmanabhan & Shanmugam, 2024). Selama proses penimbunan, dilakukan pemasangan instrumen berupa tiga sensor piezometer (P1, P2, P3) dan tiga sensor akselerometer (A1, A2, A3) yang diposisikan sesuai konfigurasi pada Gambar 3.

Setelah proses penuangan pasir selesai dilakukan, tahapan selanjutnya adalah proses penjenuhan sampel pasir dengan cara memasukkan air secara perlahan ke dalam bak pengujian. Perubahan ketinggian air di dalam bak pengujian diamati melalui dinding kaca acrylic dari bak pengujian. Aliran air dihentikan ketika ketinggian air melewati permukaan lapisan pasir setinggi 1 cm. Lapisan pasir yang telah diisi air kemudian didiamkan selama 24 jam agar air dapat meresap dan redistribusi air pori tercapai sehingga lapisan pasir dapat dalam kondisi jenuh sempurna

Tahap berikutnya adalah pembuatan model *embankment* yang akan ditempatkan di bagian atas lapisan pasir yang telah jenuh. Model *embankment* dibuat dari tanah lempung dengan sudut sebesar 60° menggunakan cetakan (*mold*) yang terbuat dari rangka besi dan dipadatkan di luar bak pengujian. Setelah proses pemadatan selesai dilakukan, model *embankment* kemudian diangkat ke dalam bak pengujian yang telah terisi pasir jenuh dan ditempatkan sesuai dengan rencana pengujian model fisik yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rencana model fisik pengujian

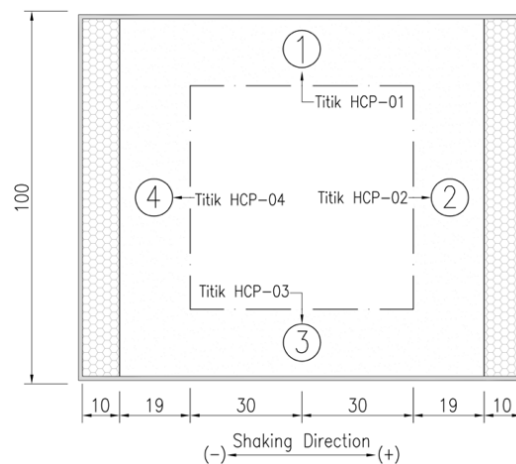
Evaluasi Kepadatan Relatif

Kepadatan tanah yang telah disiapkan diuji dengan menggunakan *Hand Cone Penetrometer* (HCP). Penetrometer kerucut ini terdiri dari konus penggerak yang memiliki sudut kerucut 60° dengan luas penampang $6,45 \text{ cm}^2$, batang

penyambung, dan proving ring yang terpasang dial beban. Untuk evaluasi kepadatan, konus penggerak didorong secara vertikal ke dalam tanah yang telah disiapkan dengan kecepatan 10 mm/detik merujuk ke (SNI 2827:2008, 2008) dan (ASTM D 3441 - 16, 2016), nilai resistensi penetrasi yang sesuai pada setiap penetrasi 100 mm dicatat. Lokasi titik pengujian HCP dilakukan pada tiap sisi dari model embankment yang dimodelkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dari nilai tahanan penetrasi kerucut yang diperoleh, kepadatan relatif lapisan pasir pada kedalaman yang berbeda diestimasi dengan menggunakan Persamaan 1 yang diusulkan oleh (Jamiolkowski et al., 2003b).

$$Dr = 100 \left[0,268 \times \ln \left(\frac{q_c / \sigma_{atm}}{\sqrt{\sigma'_{vo} / \sigma_{atm}}} \right) - 0,675 \right] \quad (1)$$

Dimana Dr adalah nilai kepadatan relatif (%), q_c adalah nilai tahanan penetrasi konus hasil pengujian HCP (kPa), σ'_{vo} adalah nilai tekanan overburden efektif (kPa), dan σ_{atm} adalah tekanan atmosfer (atm).



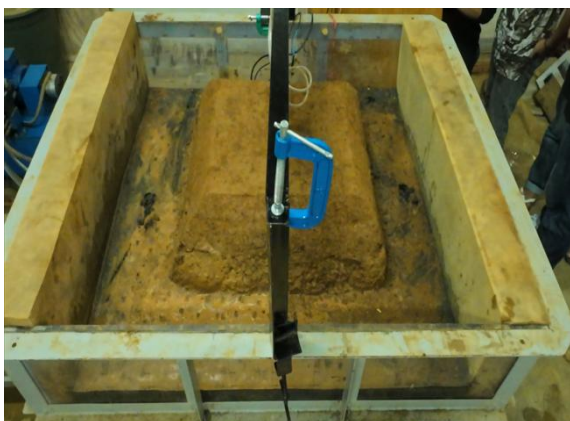
Gambar 4. Titik pengujian HCP

Tahap pengujian model

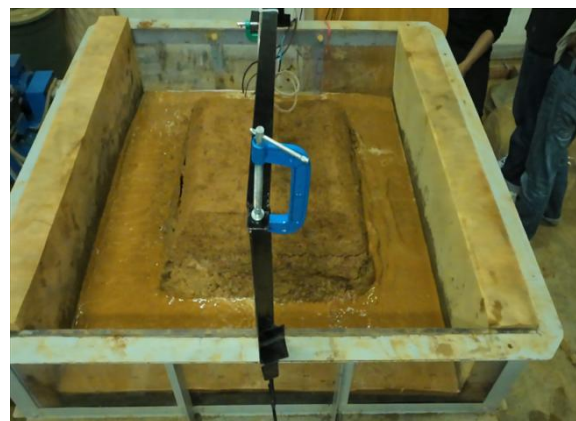
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi perubahan kepadatan relatif tanah pasir dalam kondisi jenuh yang mengalami guncangan berulang. Oleh karena itu, variasi percepatan maksimum gempa (PGA) dipilih. Untuk studi eksperimental, gelombang sinusoidal dengan PGA 0.3g, 0.4g, dan 0.5g pada frekuensi konstan dipilih dengan durasi waktu getaran selama 60 detik. Matriks pengujian yang dilaksanakan di laboratorium disajikan pada Tabel 2. Untuk kondisi model fisik sebelum dan setelah pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 1. Matriks pengujian model fisik

Kode	Dr (%)	Akselerasi (g)	Waktu (detik)
PGA 0.3g	40	0.3	60
PGA 0.4g	40	0.4	60
PGA 0.5g	40	0.5	60



(a)



(b)

Gambar 5. Kondisi model fisik, (a) sebelum pengujian, (b) setelah pengujian

8. HASIL DAN PEMBAHASAN

Indeks properties pasir

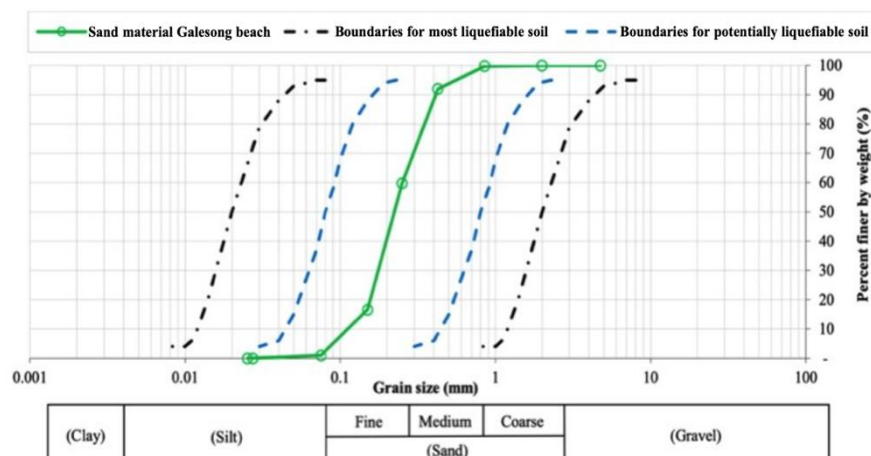
Pengujian indeks properties pasir Galesong dilaksanakan dengan mengacu ke (ASTM 4254 - 16, 2016) dan (ASTM 4253 - 16, 2016) dan hasil pengujian indeks properties pasir disajikan pada Tabel 2. Jenis pasir Galesong termasuk ke dalam kategori pasir besi (hitam) yang mengandung mineral berat berupa magnetit sehingga memiliki berat jenis > 2.70 . Pasir jenis ini biasanya ditemukan di sekitaran pantai atau endapan alluvial dengan kandungan mineral berat tinggi.

Tabel 2. Indeks properties pasir Galesong

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Nilai
1.	Kadar air (w)	%	18.26
2.	Berat jenis (G_s)	-	3.17
3.	Ukuran butiran		
a.	D_{10}	mm	0.120
b.	D_{30}	mm	0.180
c.	D_{60}	mm	0.265
d.	Koefisien keseragaman (c_u)	-	2.21
e.	Koefisien gradasi (c_c)	-	1.02
4.	Berat isi kering		
a.	Berat isi kering minimum ($\gamma_{dmin.}$)	kN/m^3	18.25
b.	Berat isi kering maksimum ($\gamma_{dmax.}$)	kN/m^3	20.21
5.	Angka pori (e)		
a.	Angka pori minimum ($e_{min.}$)	-	0.65
b.	Angka Pori maksimum ($e_{max.}$)	-	0.86

Gradasi ukuran butiran pasir

Grafik gradasi ukuran butiran pasir Galesong ditunjukkan pada Gambar 1. Gradasi ukuran butir pasir Galesong menunjukkan pasir termasuk kategori bergradasi seragam (*uniformly graded*) dengan nilai koefisien keseragaman ($C_u = 2.21 < 4$), dan nilai koefisien gradasi $C_c = 1.02$. Gambar 1 merupakan interpretasi distribusi ukuran butiran pasir Galesong terhadap rentang gradasi butiran yang berpotensi likuifaksi menurut (Tsuchida, 1970). Hasil analisis menunjukkan bahwa Pasir Galesong termasuk ke dalam kategori pasir yang berpotensi likuifaksi.



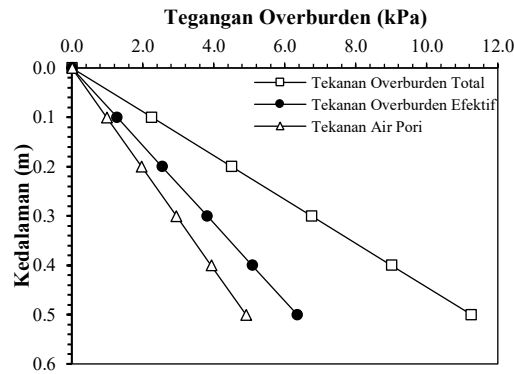
Gambar 6. Distribusi ukuran butir pasir Galesong yang rentan terhadap likuifaksi (Tsuchida, 1970)

Tegangan overburden yang bekerja

Tegangan overburden tanah adalah tekanan vertikal yang bekerja pada suatu lapisan tanah akibat berat tanah yang berada di atasnya. Jenis tegangan overburden yang biasa bekerja pada lapisan tanah terdiri atas, tegangan overburden total (σ_v), tekanan air pori (u), dan tegangan overburden efektif (σ'_v). Untuk besaran nilai tegangan overburden lapisan tanah pasir pada model fisik yang diuji ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 7.

Tabel 2. Analisis tegangan overburden yang bekerja

No.	Kedalaman (m)	γ (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	σ_{v0} (kPa)	u (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.	0,00	22,51	9,81	0,00	0,00	0,00
2.	0,10	22,51	9,81	2,25	0,98	1,27
3.	0,20	22,51	9,81	4,50	1,96	2,54
4.	0,30	22,51	9,81	6,75	2,94	3,81
5.	0,40	22,51	9,81	9,00	3,92	5,08
6.	0,50	22,51	9,81	11,25	4,91	6,35



Gambar 7. Tegangan overburden yang bekerja

Tahanan penetrasi konus (q_c)

Nilai tahanan penetrasi konus (q_c) yang diperoleh dari hasil pengujian HCP pada tiap kedalaman lapisan tanah dibahas pada bagian ini. Nilai tahanan penetrasi konus (q_c) setiap kedalaman lapisan tanah dengan nilai kepadatan relatif sebesar 40% pada tiap titik pengujian HCP yang mengalami guncangan akibat variasi percepatan beban gempa yang diberikan ditunjukkan pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan perbedaan nilai tahanan penetrasi konus (q_c) yang diperoleh pada tiap titik pengujian, dimana pada titik HCP-02 dan titik HCP-04 yang sejajar arah guncangan memiliki nilai q_c yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai q_c pada titik HCP-01 dan titik HCP-03 yang tegak lurus arah guncangan. Hal ini disebabkan pengujian titik HCP-01 dan titik HCP-03 mengalami proses densifikasi tanah yang lebih cepat dibandingkan titik HCP-02 dan titik HCP-04. Gambar 8 juga menunjukkan peningkatan nilai q_c sesuai dengan nilai percepatan beban gempa yang diberikan, namun peningkatan nilai q_c yang diperoleh tidak linier dengan kedalaman tanah yang menunjukkan proses densifikasi tidak seragam dengan kedalaman.

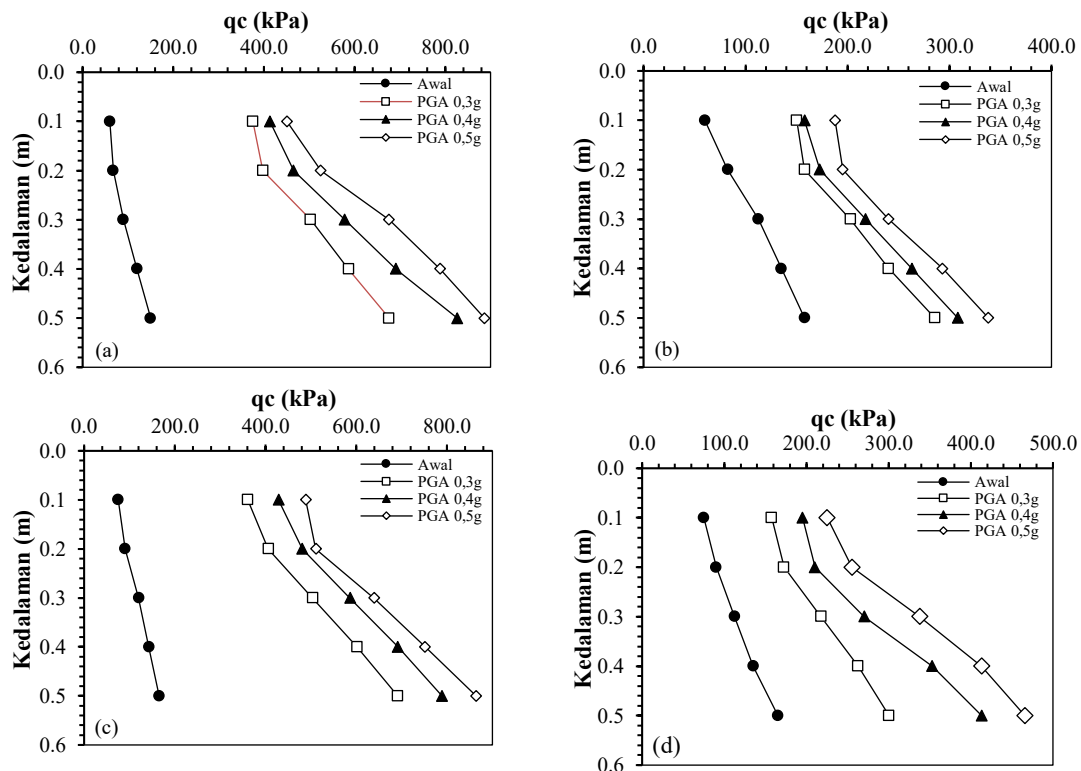
Perubahan kepadatan relatif (D_r)

Dari hasil analisis nilai tahanan penetrasi konus (q_c), maka selanjutnya dilakukan evaluasi nilai kepadatan relatif tanah dengan menggunakan Persamaan 1. Hasil evaluasi nilai kepadatan relatif tanah yang mengalami guncangan akibat variasi percepatan gempa (*Peak Ground Acceleration/PGA*) ditunjukkan pada Gambar 9. Untuk perbandingan yang lebih baik, maka nilai kepadatan relatif tanah pada kondisi awal diplot pada Gambar 9 yang sama

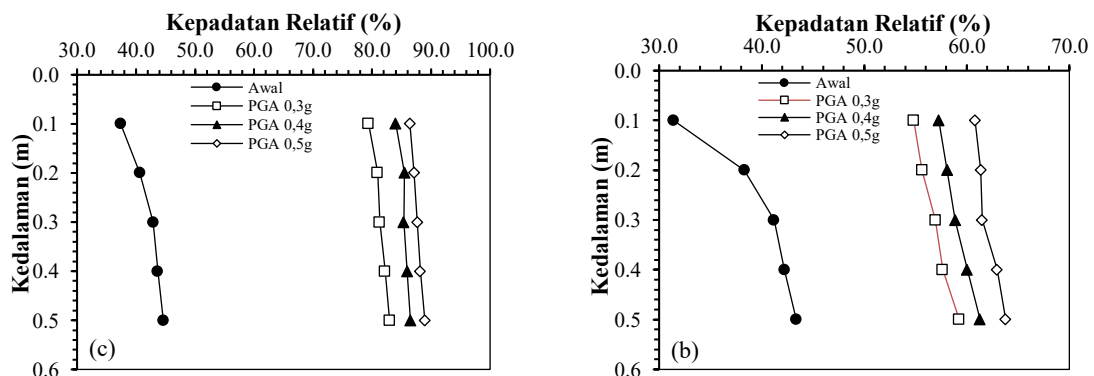
Gambar 9 menunjukkan peningkatan nilai kepadatan relatif tanah yang tidak linier pada tiap lapisan kedalaman tanah dan peningkatan nilai kepadatan relatif ditemukan bervariasi dari lapisan atas ke lapisan bawah. Pada kondisi awal

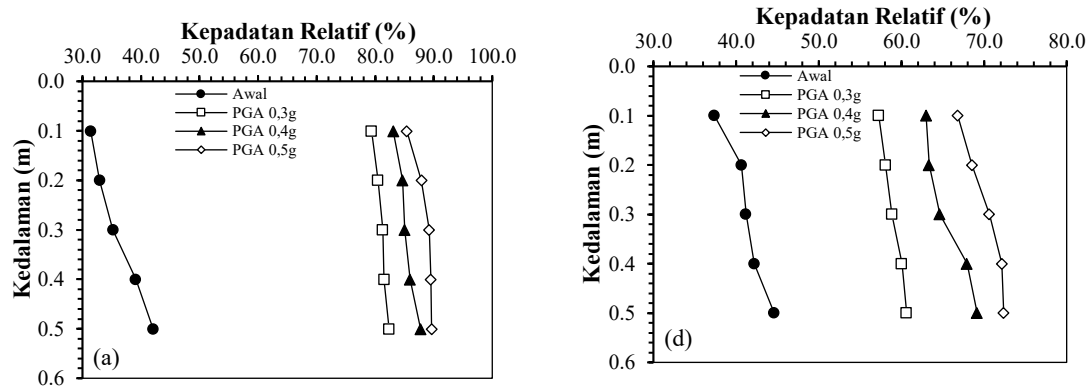
diperoleh peningkatan nilai kepadatan relatif sekitar 8% hingga 12%, setelah PGA 0.3g diperoleh nilai peningkatan kepadatan relatif sebesar 4% hingga 5%, setelah PGA 0.4g diperoleh peningkatan nilai kepadatan relatif sebesar 3% hingga 6%, dan setelah PGA 0.5g diperoleh peningkatan nilai kepadatan relatif sebesar 1% hingga 3%.

Peningkatan nilai kepadatan relatif yang signifikan mayoritas terjadi pada lapisan bagian bawah dibandingkan pada bagian atas. Hasil pengujian ini menvalidasi bahwa variasi kepadatan tanah salah satunya disebabkan oleh pengaruh drainase ke atas selama guncangan berlangsung dan setelah terjadi guncangan (Darby et al., 2017); (Padmanabhan & Shanmugam, 2022). Meskipun proses densifikasi tanah terjadi setiap peningkatan pembebanan, akan tetapi peningkatan nilai kepadatan relatif yang signifikan terjadi pada PGA sebesar 0.3g, dimana pada kondisi PGA 0.3g ini terjadi likuifaksi pada tanah. Hal ini disebabkan oleh variasi kepadatan yang memiliki kepadatan yang lebih tinggi di bagian bawah daripada di bagian atas yang secara terus menerus menginduksi drainase ke atas yang menyebabkan timbulnya tekanan air pori yang berlebih dengan cepat. Selanjutnya pada PGA 0.4g dan PGA 0.5g dimana nilai kepadatan relatif tetap mengalami peningkatan tapi tidak menyebabkan re-likuifaksi (likuifaksi berulang) karena tekanan air pori yang berlebih tadi telah terdisipasi sepenuhnya



Gambar 8. Nilai tahanan penetrasi konus (q_c), (a) Titik HCP-01; (b) Titik HCP-02; (c) Titik HCP-03; (d) Titik HCP-04





Gambar 9. Nilai kepadatan relatif (D_r), (a) Titik HCP-01; (b) Titik HCP-02; (c) Titik HCP-03; (d) Titik HCP-04

9. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan evaluasi yang telah dilakukan, maka dapat dituliskan kesimpulan sebagai berikut:

- Distribusi ukuran butir pasir Galesong menunjukkan pasir termasuk kategori bergradasi seragam (*uniformly graded*) dengan nilai koefisien keseragaman ($C_u = 2.21 < 4$), dan nilai koefisien gradasi $C_c = 1.02$. Pasir dengan kategori bergradasi seragam memiliki stabilitas yang rendah dan kurang baik untuk konstruksi fondasi karena mudah mengalami penurunan (*settlement*) dan terlikuifaksi jika dalam kondisi jenuh dan mengalami guncangan gempa.
- Terjadi peningkatan nilai tahanan penetrasi konus (q_c) seiring dengan bertambahnya percepatan maksimum gempa yang diberikan. Peningkatan nilai q_c pada tiap kedalaman lapisan tanah tidak seragam, dimana lapisan bagian bawah memiliki nilai q_c lebih besar dibandingkan lapisan bagian atas. Lapisan tanah pasir yang awalnya dalam kondisi lepas mengalami peningkatan nilai tahanan penetrasi konus (q_c) hampir tiga kali lipat.
- Nilai kepadatan relatif (D_r) yang diperoleh tidak seragam pada tiap kedalaman lapisan tanah akibat percepatan maksimum gempa yang diberikan, sehingga menginduksi aliran air dari bawah ke atas yang membuat lapisan tanah pada bagian atas (dangkal) rentan mengalami likuifaksi. Untuk mereduksi hal tersebut, disarankan agar substruktur yang terletak di kedalaman tanah dangkal pada daerah rawan gempa harus diperkuat dengan pemilihan metode perbaikan tanah yang sesuai agar dapat meminimalisir tekanan air pori yang berlebih selama kejadian gempa berlangsung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan dan pembiayaan Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) dari Pusat Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi (PPAPT) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemendikristek), dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Pemerintah Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Aksa, F. I., Utaya, S., Bachri, S., & Handoyo, B. (2020). Investigating the Role of Geography Education in Enhancing Earthquake Preparedness: Evidence from Aceh, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 19(76), 9–16. <https://doi.org/10.21660/2020.76.90006>
- Arsyad, A., Syamsuddin, E., Azmi, M., Asyhari, M., & Wiryadiputra Suryadi, R. (2024). A site-specific earthquake ground response analysis and relations to collapsing buildings in the 2021 Mw. 6.2 Mamuju-Majene Earthquake Sulawesi Indonesia. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 10(26), v10.OS-15-03. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v10.OS-15-03>
- ASTM 4253 - 16. (2016). *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4253-16E01>
- ASTM 4254 - 16. (2016). *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density I*. American Standard Testing Material. <https://doi.org/10.1520/D4254-16>
- ASTM D 3441 - 16. (2016). *Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3441-16>
- Darby, K. M., Boulanger, R. W., & Dejong, J. T. (2017). Effect of multiple shaking events on cone penetration resistances in saturated sand. In M. Taieb (Ed.), *In Proc., 3rd Int. Conf. on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, PBDIII*.
- Ghorbani, A., Hasanzadehshooiili, H., Somti Foumani, M. A., Medzvieckas, J., & Kliukas, R. (2023). Liquefaction Potential of Saturated Sand Reinforced by Cement-Grouted Micropiles: An Evolutionary Approach Based on

- Shaking Table Tests. *Materials*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ma16062194>
- Gu, L., Zheng, W., Zhu, W., Wang, Z., Ling, X., & Zhang, F. (2022). Liquefaction-induced damage evaluation of earth embankment and corresponding countermeasure. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(9), 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0848-7>
- Hazarika, H., Rohit, D., Pasha, S. M. K., Maeda, T., Masyhur, I., Arsyad, A., & Nurdin, S. (2021). Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia. *Soils and Foundations*, 61(1), 239–255. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.007>
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., & Manassero, M. (2003a). Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. *Soil Behavior and Soft Ground Construction Honouring Charles C. Chuck Ladd*, 201–238. [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40659(2003)7)
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., & Manassero, M. (2003b). Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, 201–238. [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)7](https://doi.org/10.1061/40659(2003)7)
- Lee, C. J., Wei, Y. C., & Kuo, Y. C. (2012). Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1), 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.10.011>
- Lombardi, D., Bhattacharya, S., Scarpa, F., & Bianchi, M. (2015). Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.09.008>
- Padmanabhan, G., & Shanmugam, G. K. (2022). Reliquefaction Assessment Studies on Saturated Sand Deposits under Repeated Acceleration Loading Using 1-g Shaking Table Experiments. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(6), 2888–2910. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1778588>
- Padmanabhan, G., & Shanmugam, G. K. (2024). Performance assessment of prefabricated vertical drains in mitigating soil liquefaction subjected to repeated seismic events using shaking table experiments. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 18(3), 411–427. <https://doi.org/10.1007/s11709-024-1057-3>
- Rusnardi, R., & Kiyono, J. (2011). Estimation of Earthquake Ground Motion in Padang, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 1(1), 71–77.
- Sharp, M. K., Dobry, R., & Phillips, R. (2010). CPT-Based Evaluation of Liquefaction and Lateral Spreading in Centrifuge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10), 1334–1346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000338)
- SNI 2827:2008. (2008). *Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir*. Badan Standarisasi Nasional.
- Suyadi, Harianto, T., Muhiddin, A. B., & Arsyad, A. (2023). Soil Reinforcement Model Test Using Timber Pile at Liquefaction Area. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(6), 1509–1521. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-06-016>
- Tsuchida, H. (1970). Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits. *Abstract of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute*, 1(3), 1–3.