

EVALUASI PERUBAHAN KEPADATAN RELATIF TANAH PASIR YANG DIPERKUAT TIANG HYBRID BERBASIS PENGUJIAN SHAKING TABLE

Muhammad Yunus¹⁾, Achmad Bakri Muhiddin²⁾, Tri Harianto²⁾ dan Ardy Arsyad³⁾

¹⁾Mahasiswa Doktoral, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

²⁾Profesor, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

³⁾Associate Profesor, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
E-mail: yunusm22d@student.unhas.ac.id

Abstract

Earthquakes have the potential to trigger changes in the physical properties of soil, one of which is the relative density value. This parameter is crucial for determining the shear strength of soil, its resistance to liquefaction phenomena and the stability of soil masses when subjected to dynamic loading. This study aims to evaluate changes in the relative density of saturated sand soil reinforced with hybrid piles as a result of cyclic acceleration loading via shaking table testing. A physical model was constructed in a test bed comprising a 600 mm-thick layer of sandy soil, divided into six 100 mm-thick layers with an initial relative density of 40%. Testing involved inputting sinusoidal waves with accelerations of 0.3 g, 0.4 g and 0.5 g at a constant frequency for 60 seconds. The variation in void ratio at each layer depth was analysed to represent the change in relative density due to the loading cycle. The test results showed that using hybrid piles increased the relative density values in saturated sand soils, effectively reducing the degradation of soil strength caused by cyclic acceleration loading. This finding could serve as a reference for developing soil reinforcement methods to mitigate liquefaction in earthquake-prone areas.

Keywords: *relative density, hybrid piles, void ratio, shaking table*

PENDAHULUAN

Di wilayah dengan resiko gempa yang tinggi, seperti Indonesia yang berada di jalur cincin api Pasifik, studi mengenai perubahan sifat fisik tanah akibat gempa menjadi sangat penting. Fenomena likuifaksi dan deformasi tanah telah terbukti menjadi ancaman signifikan terhadap stabilitas infrastruktur vital, termasuk jalan raya, jembatan, pelabuhan, dan fasilitas publik lainnya. Sejumlah peristiwa gempa bumi besar di Indonesia memberikan bukti nyata akan bahaya ini, seperti gempa Aceh 2004 (Aksa et al., 2020) yang memicu kerusakan masif pada infrastruktur pesisir, gempa Padang 2009 (Rusnardi & Kiyono, 2011) yang memunculkan banyak kasus likuifaksi di daerah dataran rendah, gempa Palu 2018 (Hazarika et al., 2021) yang memicu pergeseran tanah besar-besaran akibat likuifaksi dan aliran tanah (*flow slide*), serta gempa Majene 2021 (Arsyad et al., 2024) yang juga melaporkan penurunan tanah signifikan dan keruntuhan fondasi bangunan.

Salah satu dampak utama dari gempa bumi terhadap tanah adalah terjadinya perubahan pada struktur internalnya, yang meliputi redistribusi partikel-partikel penyusun tanah sehingga dapat memodifikasi sifat fisik maupun mekaniknya. Di antara parameter tanah yang sensitif

terhadap pengaruh gempa, **kepadatan relatif** (*relative density*) memiliki peran penting sebagai indikator tingkat kekompakan tanah, yang ditentukan dengan membandingkan kondisi kerapatan aktual terhadap batas kondisi tanah paling longgar dan paling padat. Kajian mengenai pengaruh beban gempa bumi, khususnya pada kondisi terjadinya likuifaksi dan keterkaitannya dengan nilai tahanan penetrasi konus (*cone penetration resistance, q_c*) serta kepadatan relatif tanah, menjadi topik yang relevan dan penting dalam memahami fenomena ini. Penelitian semacam ini berperan signifikan dalam analisis kasus-kasus likuifaksi di lapangan, sebagaimana telah dilakukan oleh sejumlah peneliti (Ha et al., 2011); (Darby et al., 2017); (Gu et al., 2022); (Jamiolkowski et al., 2003). Namun, sebagian besar data pada basis catatan kejadian likuifaksi hanya mencakup hasil uji penetrasi kerucut (*Cone Penetration Test / CPT*) yang diperoleh setelah peristiwa likuifaksi berlangsung. Kondisi ini menimbulkan pertanyaan kritis terkait tingkat representativitas data tersebut dalam menggambarkan karakteristik dan kondisi tanah sebelum kejadian.

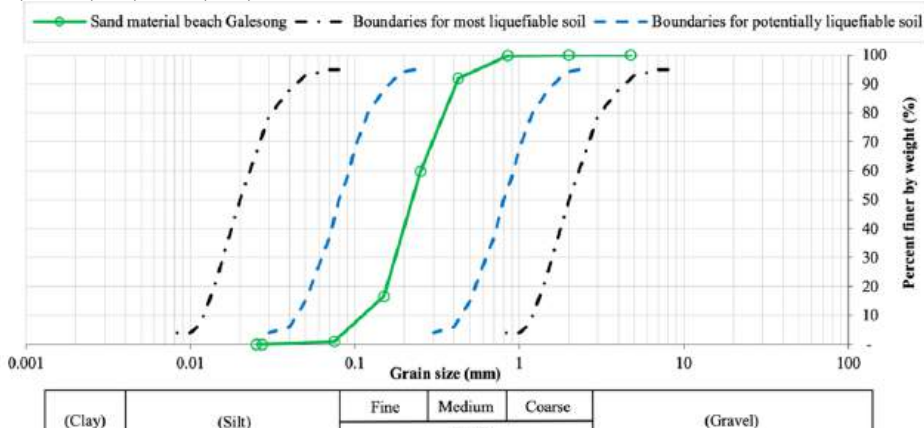
Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai tahanan penetrasi konus (*cone penetration resistance, q_c*) tanah yang diperkuat tiang hybrid dan mengalami percepatan pembebanan berulang, serta mengevaluasi perubahan kepadatan relatif dan angka pori tanah serta keterkaitannya dengan nilai q_c tersebut. Pengujian dilakukan menggunakan *shaking table* yang dilengkapi dengan bak uji transparan untuk memudahkan observasi. Sampel tanah pasir jenuh dengan kepadatan relatif awal sebesar 40% dipersiapkan sebanyak dua model pengujian. Model yang pertama berupa model tanah tanpa perkuatan dan model yang kedua model tanah dengan perkuatan tiang hybrid, kemudian diberikan percepatan pembebanan berulang dengan variasi percepatan 0,3g, 0,4g, dan 0,5g, masing-masing berdurasi 60 detik.

METODE PENELITIAN

Pasir yang digunakan

Jenis tanah yang digunakan dalam penelitian ini berupa pasir lokal yang diperoleh di sekitar daerah pantai Galesong, Kabupaten Takalar, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Distribusi ukuran butir pasir Galesong ditunjukkan pada Gambar 1. Grafik distribusi ukuran butiran tanah yang diperoleh berada dalam kisaran gradasi pasir yang rentan terlikuifaksi. Karakteristik dari pasir Galesong disajikan pada Tabel 1.

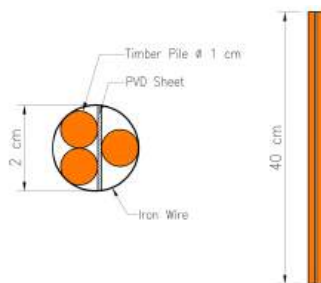
Tabel 1
Karakteristik Pasir Galesong

Berat jenis (G _s)	Distribusi ukuran butiran					Berat isi kering minimum (gr/cm ³)	Berat isi kering maksimum (gr/cm ³)	Angka pori minimum	Angka pori maksimum												
	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	(γ _{dmin})	(γ _{dmax})	(e _{min.})	(e _{max.})												
3.47	0.1								0.86												
<table> <tr> <td>(Clay)</td> <td>(Silt)</td> <td>Fine</td> <td>Medium</td> <td>Coarse</td> <td>(Gravel)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3">(Sand)</td> <td></td> </tr> </table>										(Clay)	(Silt)	Fine	Medium	Coarse	(Gravel)			(Sand)			
(Clay)	(Silt)	Fine	Medium	Coarse	(Gravel)																
		(Sand)																			

Gambar 1. Distribusi ukuran butir pasir Galesong

Tiang Hybrid

Pada penelitian ini, material tiang hybrid yang digunakan merupakan gabungan dua jenis bahan, yaitu lembaran *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan kayu *Eucalyptus Pellita*. Tiga batang kayu *Eucalyptus Pellita* berdiameter 1 cm dan panjang 40 cm dirangkai sejajar, dengan lembaran PVD dipasang di sela-sela kayu tersebut. Lembaran PVD diikat menggunakan kawat baja pada tiga titik, yaitu ujung atas, bagian tengah, dan ujung bawah tiang, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Detail tiang hybrid

Persiapan Model Pengujian

Pada pengujian eksperimental ini, digunakan model bak uji transparan berukuran 120 cm × 100 cm × 80 cm (panjang × lebar × tinggi) yang dirancang khusus untuk kebutuhan

Figure 1 consists of two schematic diagrams of the experimental setup. Diagram (a) is a top view of the container, showing a central area of 62 cm by 20 cm where the hybrid piles are installed. The container dimensions are 120 cm by 100 cm. Diagram (b) is a side view showing the vertical arrangement of the piles, the drainage layer, and the sensors. The total height of the container is 80 cm, with a sand layer of 60 cm and a drainage layer of 20 cm. The piles are 120 cm long. The sensors are located at the top of the piles, with a distance of 10 cm between the top of the pile and the sensor. The sensors are labeled P1, A1, P2, A2, P3, and A3. The legend indicates that orange circles represent Piezometer Sensors, grey squares represent Accelerometer Sensors, and black triangles represent Laser Displacement Sensors.

Proses persiapan sampel tanah pasir dilakukan menggunakan metode penjenuhan pasir (*sand bed*) untuk mengevaluasi ketahanan pasir terhadap potensi likuifaksi di bawah pengaruh percepatan berulang. Model tanah pasir dalam bak pengujian disusun setebal 600 mm, terdiri atas enam lapisan pasir dengan ketebalan masing-masing 100 mm dan kepadatan relatif ditetapkan sebesar 40%. Jumlah pasir yang dibutuhkan untuk setiap lapisan dihitung guna mencapai kepadatan relatif tersebut. Setelah seluruh lapisan pasir dimasukkan ke dalam bak, air dialirkan secara perlahan untuk menjenuhkan tanah, dan ketinggian air diamati melalui kaca akrilik hingga mencapai permukaan. Pasir dinyatakan jenuh sempurna setelah didiamkan selama 24 jam. Tahap berikutnya adalah pembuatan model *embankment* di atas lapisan pasir jenuh sempurna. Model *embankment* ini dibuat dari tanah lempung dan berfungsi sebagai simulasi beban permukaan, di mana parameter mekanisnya tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap inti penelitian ini.

Static Cone Penetrometer

Kepadatan tanah yang telah disiapkan diuji dengan menggunakan *static cone penetrometer*. 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. Pengujian dilakukan pada empat titik di setiap sisi model *embankment*, dan nilai tahanan penetrasi konus (q_c) rata-rata digunakan untuk mengestimasi kepadatan relatif tanah

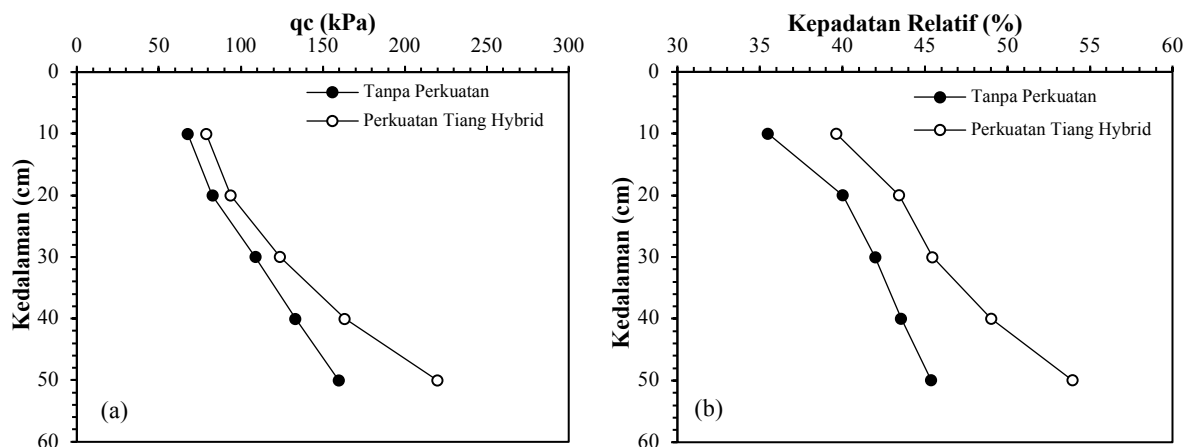
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh kondisi tanah terhadap ketahanan terhadap likuifaksi

Dari hasil pengujian *static cone penetrometer* yang dilakukan diperoleh nilai tahanan penetrasi (q_c). Nilai q_c pada tiap kedalaman 100 mm dan kepadatan relatif yang sesuai diestimasi dengan menggunakan Persamaan 1 yang diusulkan oleh (Jamiolkowski et al., 2003).

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

Dimana Dr adalah nilai kepadatan relatif (%), dan q_c adalah nilai tahanan penetrasi (q_c) hasil pengujian *static cone penetrometer* (kPa), dan σ'_{vo} adalah nilai tekanan overburden efektif (kPa). Nilai q_c dan kepadatan relatif tanah tiap kedalaman pada kondisi awal model tanah tanpa perkuatan dan model dengan perkuatan tiang hybrid ditunjukkan pada Gambar 4.

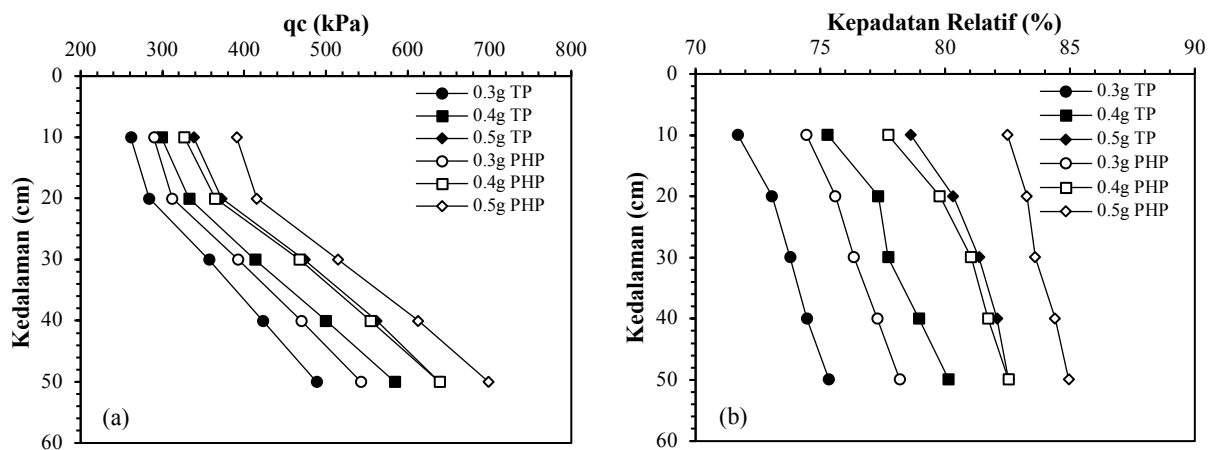


Gambar 4. Kondisi awal model tanah tanpa perkuatan dan model dengan perkuatan tiang hybrid, (a) Tahanan penetrasi (q_c), (b) Nilai kepadatan relatif (Dr)

Gambar 4a menunjukkan nilai q_c pada model tanah tanpa perkuatan berkisar antara 67,62 kPa hingga 159,66 kPa, sedangkan pada model tanah dengan perkuatan tiang hybrid berkisar antara 78,89 kPa hingga 219,76 kPa. Rata-rata nilai q_c pada tiap kedalaman lapisan tanah yang diperkuat tianh hybrid mengalami peningkatan sebesar 20,86%. Gambar 4b menunjukkan bahwa penggunaan metode sedimentasi basah dalam proses persiapan sampel mampu menghasilkan keseragaman kepadatan relatif pada setiap lapisan tanah. Nilai kepadatan relatif pada model tanah tanpa perkuatan berada pada rentang 35% hingga 45%, sementara pada model tanah dengan perkuatan tiang hybrid berada pada kisaran 39% hingga 53%. Peningkatan rata-rata kepadatan relatif pada model dengan perkuatan tiang hybrid mencapai 11,96%. Kenaikan ini dipengaruhi peningkatan tegangan efektif akibat adanya beban berlebih yang bekerja pada tanah.

Perubahan kepadatan relatif akibat variasi percepatan pembebanan berulang

Nilai q_c akibat variasi percepatan pembebanan berulang yang diberikan pada model tanah tanpa perkuatan dan model tanah dengan perkuatan tiang hybrid ditunjukkan pada Gambar 5a, sedangkan perubahan nilai kepadatan relatif tanah pada model tanpa perkuatan dan model tanah dengan perkuatan tiang hybrid ditunjukkan pada Gambar 5b.



Gambar 5. Kondisi tanah setelah pembebanan, (a) Tahanan penetrasi (q_c),
(b) Nilai kepadatan relatif (D_r)

Dari Gambar 5 dapat diamati bahwa nilai q_c dan nilai kepadatan relatif tanah mengalami peningkatan secara terus menerus pada model tanpa perkuatan dan model perkuatan tiang hybrid akibat percepatan pembebanan berulang yang diberikan. Peningkatan nilai q_c pada tanah terjadi akibat proses pemadatan yang terjadi pada tanah, namun peningkatan ini tidak linear pada tiap kedalaman lapisan tanah. Hal ini menunjukkan kepadatan tanah tidak merata pada tiap kedalaman lapisan tanah. Rasio peningkatan kepadatan relatif tanah yang diperkuat tiang

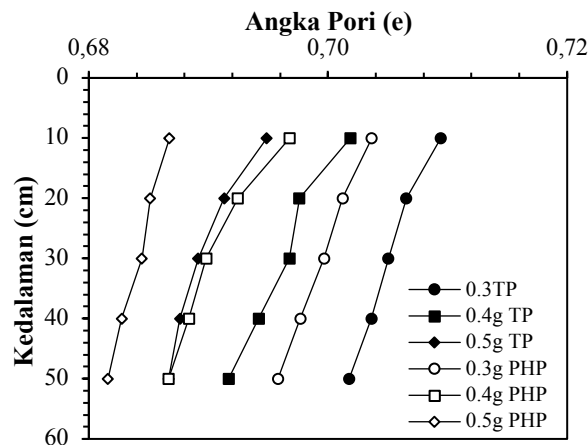
hybrid dengan percepatan pembebanan berulang 0.3g diperoleh nilai sebesar 3,46% hingga 3,83%, dan percepatan pembebanan berulang 0.4g diperoleh nilai sebesar 2,98% hingga 4,27%, dan percepatan pembebanan berulang 0.5g diperoleh nilai sebesar 2,76% hingga 4,93%.

Variasi nilai angka pori pada tanah

Nilai angka pori tanah merupakan parameter krusial dalam menilai potensi likuifaksi serta mengevaluasi efektivitas metode perkuatan tanah yang diterapkan. Variasi angka pori pada setiap kedalaman lapisan tanah diperkirakan menggunakan Persamaan 2.

$$e = e_{max} - D_r (e_{max} - e_{min}) \quad (2)$$

Dimana e adalah nilai angka pori dan D_r adalah kepadatan relatif tanah pada tiap kedalaman tertentu dan e_{max} dan e_{min} nilai angka pori maksimum dan angka pori minimum yang disajikan pada Tabel 1. Variasi nilai angka pori pada tiap kedalaman lapisan tanah akibat percepatan pembebanan berulang



Gambar 6. Variasi nilai angka pori pada tiap kedalaman

Gambar 6 menunjukkan penurunan angka pori sebagai akibat dari percepatan pembebanan berulang. Pada model tanpa perkuatan, nilai rasio penurunan angka pori untuk PGA 0,3g berkisar antara 8,2% hingga 9,7%, untuk PGA 0,4g berkisar antara 10,40% hingga 11,78%, dan untuk PGA 0,5g berkisar antara 11,12% hingga 12,77%. Sementara itu, pada model dengan perkuatan tiang hybrid, nilai rasio penurunan angka pori untuk PGA 0,3g berada pada kisaran 6,82% hingga 9,41%, untuk PGA 0,4g berkisar antara 8,04% hingga 10,30%, dan untuk PGA 0,5g berkisar antara 8,72% hingga 11,59%. Penurunan rasio angka pori tersebut mengonfirmasi adanya peningkatan kepadatan tanah akibat percepatan pembebanan berulang yang diterapkan..

SIMPULAN

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

1. Nilai tahanan penetrasi konus (q_c) menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya percepatan beban gempa yang diaplikasikan. Distribusi peningkatan q_c pada setiap kedalaman lapisan tanah bersifat tidak seragam, di mana lapisan bagian bawah memperlihatkan nilai q_c yang lebih tinggi dibandingkan lapisan bagian atas. Tanah pasir yang semula berada dalam kondisi lepas mengalami kenaikan nilai q_c hingga hampir tiga kali lipat dari kondisi awal.
2. Nilai kepadatan relatif (D_r) bervariasi pada setiap kedalaman lapisan tanah akibat pengaruh percepatan beban gempa, yang memicu aliran air dari lapisan bawah ke atas. Fenomena ini menyebabkan lapisan tanah bagian atas (dangkal) menjadi lebih rentan terhadap likuifaksi. Pemasangan tiang hybrid dapat meningkatkan nilai q_c dan kepadatan relatif tanah sehingga dapat meningkatkan ketahanan tanah terhadap potensi likuifaksi, hal ini tervalidasi dari menurunnya angka pori tanah yang dapat mereduksi tekanan air pori yang berlebih pada saat terjadi gempa.

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 (Kemendiknasaintek), 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 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>
- Ha, I. S., Olson, S. M., Seo, M. W., & Kim, M. M. (2011). Evaluation of reliquefaction resistance using shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(4), 682–691. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.12.008>
- 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. (2003). 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)
- 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>
- Rusnardi, R., & Kiyono, J. (2011). Estimation of Earthquake Ground Motion in Padang, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 1(1), 71–77.
- SNI 2827:2008. (2008). *Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir*. Badan Standarisasi Nasional.