

## EVALUASI LIKUIFAKSI PASIR SILIKA REMBANG MELALUI UJI TRIAKSIAL CONSOLIDATED UNDRAINED

Rini Kusumawardani<sup>1</sup>, Togani Cahyadi Upomo<sup>1,\*</sup>, Untoro Nugroho<sup>1</sup>, Hanggoro Tri Cahyo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Universitas Negeri Semarang, 50229, Indonesia

\*Corresponding author: [togani.cahyadi@mail.unnes.ac.id](mailto:togani.cahyadi@mail.unnes.ac.id)

**Abstract:** Soil liquefaction is a phenomenon where saturated, loose, sandy soil loses its strength, commonly as a result of static and dynamic loads, which are generally caused by earthquakes. The static and dynamic loads that are transferred into the soil cause a significant increase in pore water pressure, resulting in a reduction in effective soil stress. In Indonesia, the soil liquefaction phenomenon has occurred many times, including in Yogyakarta in 2006, Lombok and Palu in 2018. Performing triaxial static testing with the consolidated undrained (CU) condition is one method for evaluating soil liquefaction. In this study, triaxial testing under CU conditions was conducted to evaluate the soil liquefaction potential of Rembang silica sand. The tests were carried out in the loose sand with relative density ( $D_r$ ) = 10%, and the dense sand with  $D_r$  = 40%. A moist tamping method was applied for remolding samples. During the test, effective stress ( $\sigma'_3$ ) of 100 kPa and 400 kPa are applied to the samples. The tests show that pore water pressure on soil with a relative density of 10% tends to increase with the given effective stress. This causes the soil to lose its effective stress and experience liquefaction. Furthermore, medium-density sand with a relative density of 40% has a peak in pore water pressure, which then becomes constant, allowing the soil to maintain its strength.

**Keywords:** static liquefaction, triaxial CU test, Rembang sand, loose and dense sand

**Abstrak:** Likuifaksi merupakan fenomena dimana tanah pasir lepas dalam kondisi jenuh air kehilangan kekuatannya akibat dari beban statik maupun dinamik yang umumnya diakibatkan oleh gempa bumi. Beban statik maupun dinamik yang disalurkan kedalam tanah tersebut menyebabkan peningkatan tekanan air pori yang signifikan sehingga tegangan efektif tanah menjadi hilang. Fenomena likuifaksi beberapa kali terjadi di Indonesia, seperti fenomena likuifaksi di Yogyakarta tahun 2006, Lombok dan Palu tahun 2018. Salah satu metode untuk menilai likuifaksi dapat menggunakan pengujian triaksial statik dengan menerapkan kondisi *consolidated undrained (CU)*. Pada studi ini, pengujian triaksial pada kondisi *CU* diterapkan untuk menguji potensi likuifaksi pada tanah pasir silika Rembang. Pengujian dilakukan pada kondisi tanah pasir lepas dengan kepadatan relatif ( $D_r$ ) = 10% dan tanah pasir setengah padat dengan  $D_r$  = 40%. Agar  $D_r$  rencana tercapai, metode pemadatan basah diterapkan dalam mencetak sampel. Selama pengujian, tegangan efektif ( $\sigma'_3$ ) yang diberikan pada sampel sebesar 100 kPa dan 400 kPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan air pori pada kepadatan relatif 10% cenderung naik sampai dengan nilai tegangan efektif ( $\sigma'_3$ ) yang diberikan. Hal tersebut menyebabkan tanah kehilangan tegangan efektifnya dan mengalami likuifaksi. Sedangkan pada kepadatan relatif 40%, tegangan air pori akan mencapai puncak dan selanjutnya konstan sehingga tanah dapat menjaga kekuatannya.

**Kata kunci:** : likuifaksi statik, pengujian triaksial CU, pasir Rembang, pasir lepas dan padat

### PENDAHULUAN

Likuifaksi umumnya terjadi pada tanah pasir lepas dalam kondisi jenuh air akibat beban statik maupun siklik (Das & Luo, 2016; Prakash, 1981). Beban statik maupun siklik yang berlangsung cepat menyebabkan peningkatan tekanan air pori tanah dan menurunnya tegangan efektif tanah secara drastis. Hal tersebut mengakibatkan tanah kehilangan kekuatannya (Idriss & Boulanger, 2008; Kramer, 1996). Di beberapa tempat, likuifaksi ditandai dengan adanya retakan lateral, penurunan tanah maupun

*sand boiling* (Idriss & Boulanger, 2008). Bencana akibat likuifaksi menyebabkan kerusakan infrastruktur bahkan korban jiwa yang cukup besar. Beberapa contoh fenomena likuifaksi yang pernah terjadi adalah likuifaksi di Alaska 1964 (Youd, 2014), Niigata 1964 (Ishihara & Koga, 1981), Loma Prieta 1989 (Bardet & Kapuskar, 1993), Norhtridge 1994 (Holzer et al., 1999), Kobe 1995 (Soga, 1997), Adapazari 1999 (Bray et al., 2004), dan Christchurch 2011 (Taylor et al., 2012). Bahkan, kejadian likuifaksi juga pernah terjadi di

Indonesia seperti likuifaksi di Yogyakarta 2006 (Sarah & Soebowo, 2013), Lombok 2018 (Pamumpuni et al., 2018) dan Palu 2018 (Kiyota et al., 2020).

Castro (1969) melakukan evaluasi likuifaksi pada tanah pasir dengan menggunakan triaksial statik dan siklik. Castro (1969) juga melakukan beberapa variasi kepadatan relatif maupun ukuran butir. Penggunaan triaksial juga dilakukan oleh beberapa peneliti lain untuk menilai potensi likuifaksi pada tanah pasir (Ishihara, 1993). Lade & Yamamuro (1997) meneliti pengaruh kadar lanau dan variasi kepadatan terhadap potensi likuifaksi dengan pengujian triaksial. Monkul & Yamamuro (2011) melakukan pengujian triaksial untuk mengetahui perilaku pasir yang dicampur dengan lanau serta memvariasikan kadar lanau dan dimensi butiran lanau.

Penggunaan triaksial untuk menilai likuifaksi masih sangat jarang dilakukan oleh peneliti Indonesia. Lestari et al. (2014) telah melakukan penelitian likuifaksi dengan sampel tanah pasir Padang menggunakan triaksial. Hasil penelitian menunjukkan grafik tegangan vs regangan dan tekanan air pori vs regangan mempunyai perilaku yang berbeda dengan hasil penelitian Castro (1969). Pada hasil pengujian Lestari et al. (2014), perilaku tekanan air pori dan tegangan efektif terlihat tidak konsisten. Perilaku *dilate* pada grafik hubungan tegangan vs regangan tidak terlihat ketika tekanan air pori turun.

Pada penelitian ini, kami melakukan penilaian likuifaksi pada tanah pasir silika Rembang dengan triaksial statik di laboratorium dinamika tanah program studi Teknik Sipil UNNES. Perilaku tegangan-regangan, tekanan air pori, dan lintasan tegangan (*stress path*) pasir silika Rembang ditinjau dari dua variasi kepadatan yaitu pasir lepas (*loose*) dengan nilai kepadatan relatif ( $D_r$ ) = 10% dan setengah padat (*medium dense*) dengan nilai kepadatan relatif ( $D_r$ ) = 40% serta dua variasi tegangan efektif ( $\sigma'_3$ ) sebesar 100 kPa dan 400 kPa.

## METODE PENELITIAN

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir silika Rembang yang telah dicuci terlebih dahulu sehingga butiran yang lolos saringan no 200 kurang dari 1%. Selain itu, ukuran butir pasir juga didesain agar masuk dalam zona likuifaksi Tsuchida (1970). Gambar 1 menunjukkan nilai batas zona ukuran butir

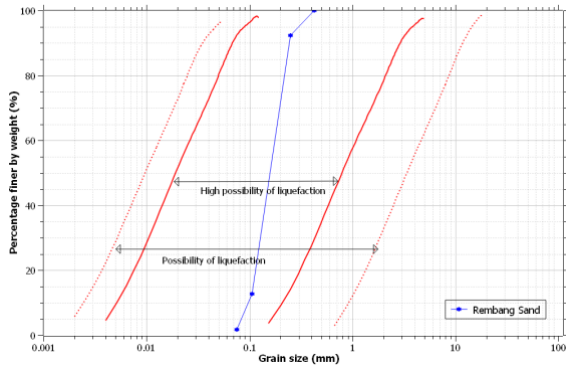
tanah pasir yang memiliki potensi likuifaksi tinggi dan kemungkinan likuifaksi. Potensi likuifaksi tinggi ditunjukkan pada zona garis merah, sedangkan kemungkinan likuifaksi ditunjukkan pada zona garis putus-putus merah. Gradasi sampel tanah pasir silika Rembang yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan dengan garis biru diantara zona yang memiliki potensi likuifaksi tinggi.

Pengujian berat jenis ( $G_s$ ) mengacu standard ASTM D854-14 (2014), sedangkan pengujian kepadatan minimum ( $D_r, min$ ) dan maksimum ( $D_r, maks$ ) mengacu standard ASTM D 4254-00 (2014) dan ASTM D 4253-00 (2014). Tabel 1 menunjukkan nilai berat jenis, kepadatan minimum dan maksimum sampel.

Sampel untuk pengujian dicetak dan dibentuk dengan metode pemadatan basah (*moist tamping*) sesuai dengan metode pemadatan basah yang diusulkan oleh da Fonseca et al. (2021). Sebelum pemadatan, sampel dibasahi terlebih dahulu dengan air agar kadar air menjadi 5%, setelah air dan tanah bercampur selanjutnya disimpan dalam kantong plastik tertutup dan dibiarkan selama 24 jam. Sebelum pemadatan, membran dan *split mold* dengan diameter 70 mm dan tinggi 140 mm dipersiapkan. Batu pori dan kertas filter diletakkan pada bawah sampel. Sampel yang telah disiapkan selanjutnya dibagi menjadi lima lapisan pemadatan. Variasi kepadatan relatif ( $D_r$ ) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10% dan 40%. Nilai  $D_r$  tersebut merupakan representasi dari tanah pasir lepas ( $D_r = 10\%$ ) dan setengah padat ( $D_r = 40\%$ ). Setelah pemadatan sampel selesai, pada sisi atas sampel diletakkan kertas filter, batu pori dan *top cap* triaksial. Selanjutnya, sampel diberikan tekanan negatif sebesar 76 cmHg ( $\approx 101$  kPa).

**Tabel 1** Sifat Fisis Pasir Silika Rembang

Sifat fisis	Simbol	Satuan	Nilai
Berat jenis	$G_s$	-	2,74
Kepadatan maksimum	$\gamma_{d, maks}$	g/cm <sup>3</sup>	1,55
Kepadatan minimum	$\gamma_{d, min}$	g/cm <sup>3</sup>	1,217
Angka pori maksimum	$e_{ maks}$	-	1,251
Angka pori minimum	$e_{ min}$	-	0,768



**Gambar 1** Distribusi Ukuran Butir Pasir Silika Rembang

Alat pengujian triaksial yang digunakan merupakan produk dari Wyckham Farrance dengan modifikasi sel triaksial dari Humboldt (Gambar 3). Seluruh data hasil pengujian dibaca oleh data logger dan terekam secara otomatis dalam komputer.

Penjenuhan dilakukan dengan cara memberikan tekanan negatif kedalam sampel terlebih dahulu sampai udara dalam sampel hilang, dan selanjutnya dialirkan air yang telah divakum (*deaired water*) melalui sampel dengan menjaga tekanan dalam sampel kurang dari 10 kPa. Setelah seluruh pori air terisi air, pengukuran nilai B (B value) dilakukan. Sampel dinyatakan dalam kondisi jenuh apabila nilai B minimal sebesar 0.98 serta backpressure minimum sebesar 200 kPa.

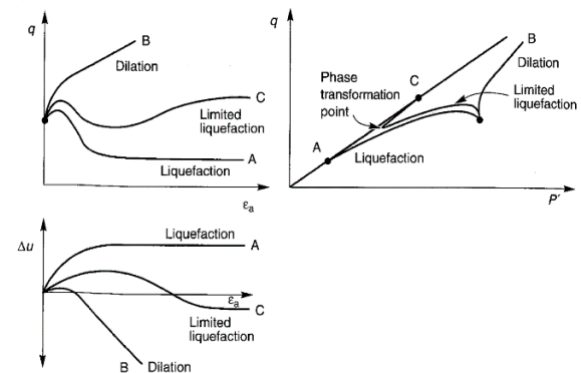
Kecepatan regangan yang digunakan selama pengujian sebesar 0.35%/min setelah sampel dikonsolidasikan dengan effective confining pressure ( $\sigma'_3$ ) sebesar 100 kPa dan 400 kPa.



**Gambar 2** Peralatan Triaksial dan Data Logger di Laboratorium Dinamika Tanah Program Studi Teknik Sipil UNNES

Castro (1969) membagi perilaku tanah pasir menjadi tiga, yaitu likuifaksi, *limited*

*liquefaction*, dan *dilation*. Perilaku tanah pasir ini digambarkan dalam grafik hubungan tegangan-regangan, tekanan air pori-regangan dan lintasan tegangan seperti terlihat pada Gambar 4. Pada tanah yang mengalami likuifaksi, tegangan efektifnya akan naik sampai puncak dan selanjutnya runtuh serta mengalami regangan yang besar dengan tegangan efektif yang sangat rendah. Sedangkan pada tanah pasir yang mengalami *limited liquefaction*, tegangan efektif akan naik sampai puncak selanjutnya turun lalu mengalami fase transformasi dan selanjutnya tegangan efektif akan kembali naik seperti terlihat dalam Gambar 3b. Tanah pasir padat mengalami perilaku *dilation*, yakni tegangan efektif tanah naik (Gambar 3a) seiring dengan penurunan tekanan air pori yang terjadi (Gambar 3c).



**Gambar 3** Perilaku likuifaksi, *limited liquefaction* dan dilation pada grafik : a) hubungan tegangan regangan, b) tekanan air pori vs regangan dan c) lintasan tegangan (Castro, 1969)

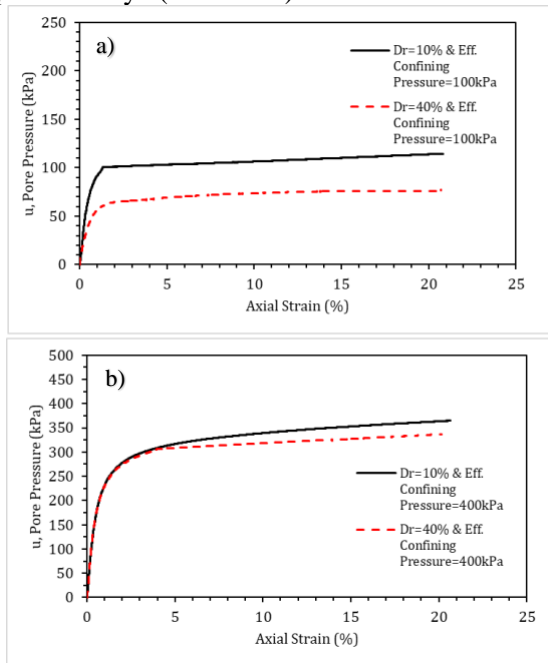
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian triaksial CU menunjukkan perbedaan perilaku tekanan air pori (Gambar 4), tegangan-regangan (Gambar 5) dan lintasan tegangan (Gambar 6).

Gambar 4 menunjukkan kurva perilaku tekanan air pori selama pengujian triaksial CU. Perilaku tekanan air pori dengan  $D_r = 10\%$  menunjukkan perilaku tekanan air pori saat terjadi likuifaksi. Pada tanah dengan  $D_r = 10\%$ , tekanan air pori meningkat sampai pada regangan 2%, selanjutnya tekanan air pori relatif datar dan mendekati nilai *effective confining pressure*-nya. Hal ini mengakibatkan tanah kehilangan tegangan efektifnya. Kehilangan tegangan efektif tersebut juga ditunjukkan dalam grafik hubungan tegangan-regangan pada Gambar 5 dan lintasan tegangan pada Gambar 6. Pada grafik hubungan tegangan-regangan, mula-

mula perbedaan tegangan (*stress difference*) tanah meningkat sampai puncak dan selanjutnya turun sampai dengan nol. Sedangkan pada grafik lintasan tegangan, grafik bergerak ke kiri sampai nilai perbedaan tegangan (*stress difference*) mencapai nilai nol sehingga tanah kehilangan tegangan efektif.

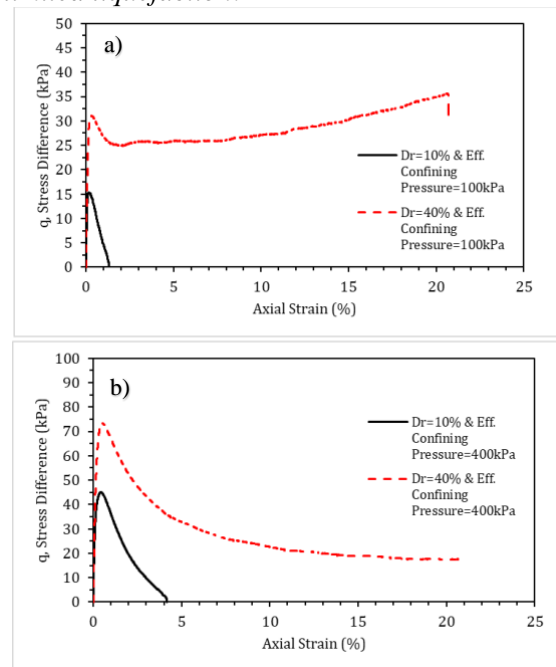
Tanah dengan  $D_r = 40\%$  menunjukkan dua perilaku yang berbeda seperti terlihat pada grafik regangan tegangan pada Gambar 5 dan lintasan tegangan pada Gambar 6. Ketika *effective confining pressure* sebesar 100 kPa, tegangan efektif tanah mula-mula naik sampai puncak lalu turun atau disebut sebagai *strain softening*, dan kembali naik. Perilaku naiknya tegangan efektif ini disebut juga sebagai perilaku *dilative*. Sedangkan, ketika *effective confining pressure* sebesar 400 kPa, tegangan efektif tanah mula-mula meningkat dan selanjutnya turun lalu konstan. Fase transformasi terjadi pada tegangan efektif sebesar 20-25 kPa. Tinjauan terhadap tekanan air pori menunjukkan tekanan air pori meningkat saat pembebanan tetapi tekanan air pori tersebut masih dibawah *effective confining pressure*-nya (Gambar 4).



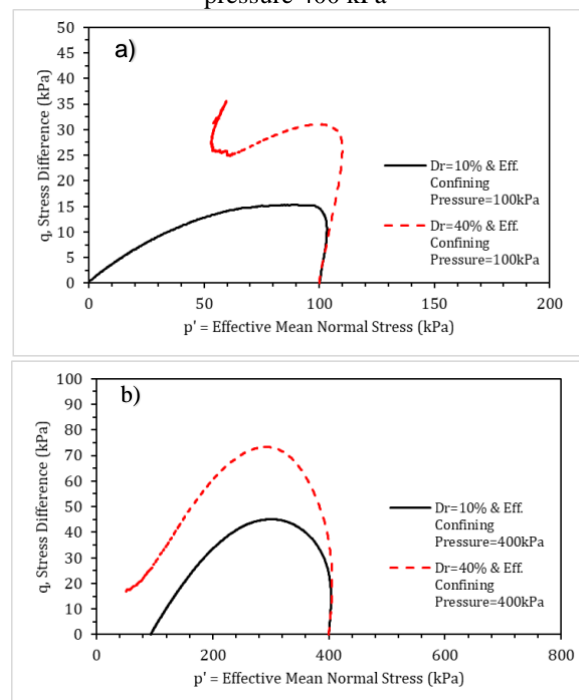
**Gambar 4** Perilaku tekanan air pori, a)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *effective confining pressure* 100 kPa, b)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *effective confining pressure* 400 kPa

Berdasarkan kriteria likuifaksi yang didefinisikan oleh Castro (1969), pada  $D_r = 10\%$  dan *effective confining pressure* sebesar 100 kPa dan 400 kPa, tanah pasir silika Rembang mengalami likuifaksi. Sedangkan, tanah pasir

silika Rembang dengan  $D_r = 40\%$  mengalami *limited liquefaction*.



**Gambar 5** Hubungan regangan dan tegangan, a)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *eff. confining pressure* 100 kPa, b)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *eff. confining pressure* 400 kPa



**Gambar 6** Lintasan tegangan, a)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *effective confining pressure* 100 kPa, b)  $D_r = 10\%$  &  $40\%$  dengan *effective confining pressure* 400 kPa

## KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan pengujian triaksial CU dengan variasi kepadatan relatif dan

effective confining pressure. Sampel yang digunakan dalam pengujian adalah pasir silika Rembang dengan ukuran butir didesain agar masuk dalam zona likuifaksi Tsuchida (1970). Hasil pengujian menunjukkan tanah pada kondisi lepas ( $D_r = 10\%$ ) mengalami likuifaksi, sedangkan tanah pada kondisi setengah padat ( $D_r = 40\%$ ) mengalami *limited liquefaction*.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D 4253-00. (2014). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using vibratory table*.
- ASTM D 4254-00. (2014). *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*.
- ASTM D854-14. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.
- Bardet, J. P., & Kapuskar, M. (1993). *Liquefaction Sand Boils in San Francisco during 1989 Loma Prieta earthquake*. Journal of Geotechnical Engineering, 119(3), 543–562. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-)
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R. B., Cetin, O. K., Bol, E., Baturay, M. B., Christensen, C., & Karadayilar, T. (2004). *Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(7), 673–685. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-)
- Castro, G. (1969). *Liquefaction of Sands* [PhD Thesis]. Harvard University.
- da Fonseca, A. V., Cordeiro, D., & Molina-Gómez, F. (2021). *Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples*. Geotechnics, 1(1), 95–127.
- Das, B. M., & Luo, Z. (2016). *Principles of Soil Dynamics (3rd ed.)*. Cengage Learning.
- Holzer, T. L., Bennett, M. J., Ponti, D. J., & Tinsley III, J. C. (1999). *Liquefaction and soil failure during 1994 Northridge earthquake*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(6), 438–452. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-)
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction during Earthquakes*. EERI.
- Ishihara, K. (1993). *Liquefaction and flow failure during earthquakes*. Géotechnique, 43(3), 351–451. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- Ishihara, K., & Koga, Y. (1981). *Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata earthquake*. Soils and Foundations, 21(3), 35–52. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.3\\_35](https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.3_35)
- Kiyota, T., Furuichi, H., Hidayat, R. F., Tada, N., & Nawir, H. (2020). *Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia*. Soils and Foundations, 60(3), 722–735. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.015>
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (1997). *Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands*. Canadian Geotechnical Journal, 34(6), 918–928. <https://doi.org/10.1139/t97-052>
- Lestari, A. S., Hartadi, M. D., & Kesumah, A. (2014). *Liquefaction potensial evaluation based on critical state parameter concept and piezocone test of sandy sediments Padang Indonesia*. Engineering Innovation for Sustainable Development, 133–137.
- Monkul, M. M., & Yamamuro, J. A. (2011). *Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands*. Canadian Geotechnical Journal, 48(6). <https://doi.org/10.1139/t11-001>
- Pamumpuni, A., Sapiie, B., Marshal, M. E., Apriansyah, D., & Anisprawoto, A. (2018). *Penyelidikan geologi paska gempa Lombok 5 Agustus 2018*. In Kajian rangkaian gempa Lombok Provinsi Nusa Tenggara Barat (pp. 27–34). Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.

- Prakash, S. (1981). *Soil Dynamics*. McGraw-Hill.
- Sarah, D., & Soebowo, E. (2013). *Liquefaction due to the 2006 Yogyakarta Earthquake: Field Occurrence and Geotechnical Analysis*. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.050>
- Soga, K. (1997). *Soil liquefaction effects observed in the Kobe earthquake of 1995*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 131(1), 34–51. <https://doi.org/10.1680/igeng.1998.30004>
- Taylor, M. L., Cubrinovski, M., & Bradley, B. A. (2012). *Characterisation of ground conditions in the Christchurch Central Business district*. *Australian Geomechanics Journal*, 42(4), 43–57.
- Tsuchida, H. (1970). *Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits*. 3.1-3.33.
- Youd, T. L. (2014, July 21). *Ground failure investigations following the 1964 Alaska earthquake*. *Proceedings of the 10 Th National Conference in Earthquake Engineering. Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska*.