

PENILAIAN LIKUIFAKSI DENGAN PENGUJIAN TRIAKSIAL TERKONSOLIDASI-TAK TERDRAINASE

Togani Cahyadi Upomo^{1,*}, Rini Kusumawardani¹, Untoro Nugroho², Arief Kusbiantoro¹, Muh Arief Firdaus¹, Muhammad Farhan Syahputra²

¹Prodi S2 Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang
Gedung E3&E4 Kampus UNNES Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang

²Prodi S1 Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang
Gedung E3&E4 Kampus UNNES Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang

^{*}Correspondent Author: togani.cahyadi@mail.unnes.ac.id

Abstract

This study discusses the assessment of liquefaction by triaxial consolidated undrained (CU) testing. The soil sample employs Rembang silica sand with a grain size distribution that lies within the zone of liquefaction. In the test, Liquefaction develops in sand when the ratio of the change in pore water pressure to its confining stress (R_u) turns approximately 1 and the deviator stress drops to approximately zero. According to the findings, loose to medium-dense sand experience liquefaction when the applied confining stress is low (<100 kPa). In sandy soils, limited liquefaction occurs at confining pressures of 200 – 400 kPa with the range of relative densities around 34.41% – 47.78%. Critical state line develops from Triaxial CU testing to predict the undrained and drained behavior of sand.

Keywords: *rembang sand, soil liquefaction, triaxial consolidated undrained, critical state line*

PENDAHULUAN

Ketika tanah pasir lepas jenuh air pada kondisi tak terdrainase mendapatkan beban statik ataupun dinamik, tekanan air pori akan meningkat sampai mendekati tegangan kekangannya. Kondisi tersebut menyebabkan kekuatan tanah pasir turun sampai dengan kekuatan residual yang umumnya sangat kecil atau mendekati nol (Castro, 1969). Fenomena ini sering disebut sebagai likuifaksi. Likuifaksi sangat menarik dan menantang bagi ahli geoteknik di seluruh dunia untuk meneliti penyebab, perilaku maupun metode penilaiannya (Kramer, 1996).

Fenomena likuifaksi sering terjadi pada bangunan air atau area

didekatnya, karena tanah pada area tersebut umumnya jenuh air dan mempunyai muka air tanah yang tinggi. Bendungan *lower San Fernando* merupakan salah satu bangunan air yang longsor akibat fenomena likuifaksi setelah dihantam gempa 6.6 Mw pada tanggal 9 Februari 1971 (Lee et al., 1975; Seed et al., 1973, 1975). Contoh lain adalah longsor besar pada lereng yang sangat landai ($<3^\circ$) di Petobo, Palu, Indonesia tahun 2018 yang dipicu oleh gempa dengan kekuatan 7.5 Mw (Bradley et al., 2019; Kusumawardani et al., 2021; Mason et al., 2021; Upomo et al., 2023).

Menurut Upomo et al. (2023), fenomena likuifaksi di Petobo, Palu

disebabkan oleh muka air tanah yang tinggi akibat dari infiltrasi air dari sawah dan saluran air Gumbasa. Ketika gempa Palu-Donggala 2018 menerjang Petobo, Palu, tekanan air pori dalam tanah tiba-tiba meningkat, tegangan efektif tanah menjadi sangat kecil atau mendekati nol sehingga menyebabkan terbentuknya bidang gelincir dan longsoran yang besar (Mason et al., 2021). Kasus-kasus kejadian likuifaksi selain menyebabkan kerusakan infrastruktur, juga menimbulkan korban jiwa yang cukup besar (Bardet & Kapuskar, 1993; Cubrinovski et al., 2012; Ishihara & Koga, 1981; Kiyota et al., 2020; Taylor et al., 2012; Youd, 2014).

Untuk menghindari terjadinya korban jiwa dan kerusakan infrastruktur, penilaian terhadap potensi likuifaksi perlu dilakukan pada tahap desain. Penilaian tanah terhadap potensi likuifaksi dapat dilakukan dengan pendekatan pengujian di lapangan ataupun di laboratorium. Salah satu pendekatan di laboratorium adalah melakukan pengujian triaksial statik terkonsolidasi-tak terdrainase yang selanjutnya disebut sebagai triaksial CU. Penelitian tentang likuifaksi dengan menggunakan triaksial CU di Indonesia sangatlah terbatas. Kusumawardani et al. (2023) telah melakukan evaluasi terhadap pasir silika Rembang dengan menggunakan pengujian triaksial CU dengan hasil pasir silika Rembang mengalami likuifaksi pada kondisi sangat lepas sampai lepas. Penelitian tersebut hanya menggunakan dua variasi kepadatan relatif awal ($D_{r,i}$) dan tegangan kejang

(σ'_3), sehingga perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam. Lestari et al. (2014) juga telah melakukan menggunakan triaksial CU pasir Padang untuk membangun *critical state line*.

Oleh karena kejadian likuifaksi di Indonesia cukup banyak seperti kejadian di Palu (Bradley et al., 2019), Lombok (Pamumpuni et al., 2018) dan Yogyakarta (Sarah & Soebowo, 2013) dan penelitian likuifaksi dengan triaksial CU di Indonesia hanya sedikit, maka kami melakukan pengujian pada sampel pasir silika Rembang dengan distribusi ukuran butir yang sama dengan penelitian Kusumawardani et al. (2023) untuk membahas perilaku likuifaksi dengan triaksial CU pada tanah pasir silika Rembang dengan variasi kepadatan relatif setelah konsolidasi ($D_{r,c}$) maupun tegangan kejang (σ'_3) serta membangun kurva *critical state line* untuk menilai potensi likuifaksi.

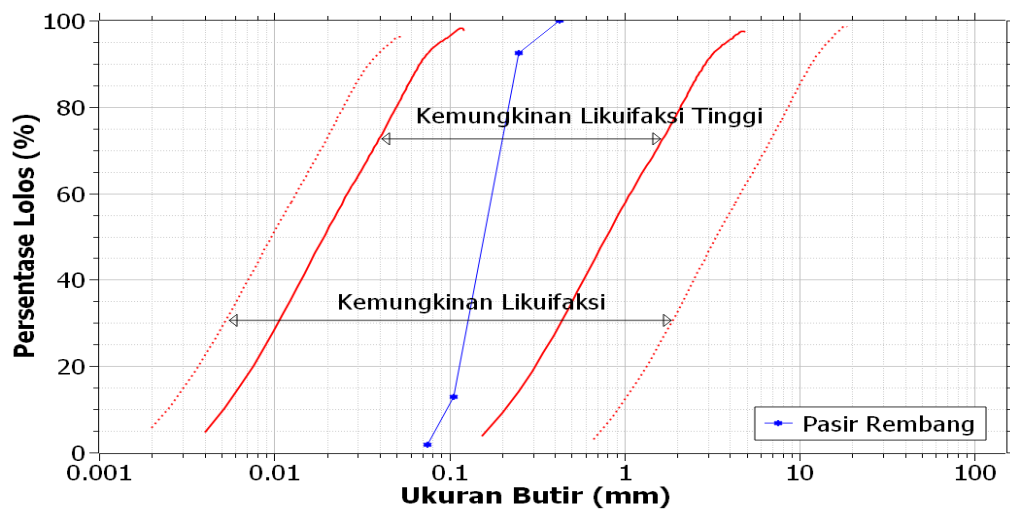
METODE PENELITIAN

Tanah pasir silika yang digunakan dalam pengujian ini didapatkan dari Kecamatan Kragan, Kabupaten Rembang. Tanah pasir tersebut mempunyai kadar silika yang cukup tinggi sehingga butiran tidak mudah pecah. Distribusi ukuran butir pada tanah pasir Rembang ini selanjutnya didesain terletak dalam zona distribusi ukuran butir Tsuchida (1970) seperti dalam Gambar 1. Pada gambar tersebut, distribusi ukuran butir tanah yang mempunyai potensi likuifaksi berada diantara garis putus-putus merah, sedangkan potensi likuifaksi tinggi

berada diantara garis merah. Distribusi ukuran butir pasir Rembang yang digunakan dalam penelitian ini terletak pada area ukuran butir dengan potensi likuifaksi tinggi.

Parameter tanah pasir Rembang lainnya seperti berat jenis (G_s), kepadatan maksimum (γ_{dmax}) dan minimum (γ_{dmin}), angka pori maksimum

(e_{max}) dan minimum (e_{min}) dapat dilihat pada Tabel 1. Seluruh pengujian dalam penelitian ini menggunakan alat triaksial produk dari GDS instruments. Selama pengujian, input dan pembacaan data dikendalikan dan terekam secara otomatis melalui komputer PC. Gambar 2 menunjukkan peralatan triaksial yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Distribusi ukuran butir pasir Rembang yang digunakan dalam penelitian

Tabel 1. Sifat tanah pasir silika Rembang yang digunakan dalam Penelitian

Sifat fisis	Simbol	Satuan	Nilai
Berat jenis	G_s	-	2.74
Kepadatan maksimum	γ_{dmax}	g/cm^3	1.55
Kepadatan minimum	γ_{dmin}	g/cm^3	1.217
Angka pori maksimum	e_{max}	-	1.251
Angka pori minimum	e_{min}	-	0.768



Gambar 2 Peralatan triaksial produk GDS Instruments

Pencetakan dan pembentukan sampel tanah menggunakan metode yang diusulkan oleh da Fonseca et al. (2021) yaitu metode pemadatan basah (*moist tamping*) dengan kadar air desain sebesar 5%. Sampel dicetak dengan diameter 70 mm dan tinggi 140 mm. Setelah sampel tanah dicetak dan dipadatkan sesuai dengan desain kepadatan relatif awal ($D_{r,i}$), selanjutnya tekanan negatif diberikan kedalam tanah untuk menjaga sampel tanah dalam kondisi baik seperti terlihat pada Gambar 3. Pada pengujian triaksial CU ini, tanah dinyatakan sudah jenuh apabila nilai B tercapai 0.98. Setelah tanah dalam kondisi jenuh,

tanah diberikan tegangan keang (σ'_3) dan dikonsolidasikan selama 1 jam.

Kepadatan relatif pasir yang dijadikan acuan adalah kepadatan relatif setelah konsolidasi ($D_{r,c}$). Kepadatan relatif setelah konsolidasi ini ($D_{r,c}$) sangat sulit didesain, sehingga sampel pasir diusahakan mewakili tiga kondisi yaitu kondisi sangat lepas, lepas dan setengah padat. Tabel 2 merupakan hubungan antara kepadatan relatif dan klasifikasi kepadatan tanah pasir yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

Selanjutnya, proses penggeseran (*shearing*) dilakukan setelah proses konsolidasi selesai.



Gambar 3 Sampel tanah pasir Rembang setelah dicetak dan diberikan tekanan negatif

Tabel 2 Hubungan nilai SPT-N, kepadatan relatif dan klasifikasi tanah pasir (Mitchell & Soga, 2005)

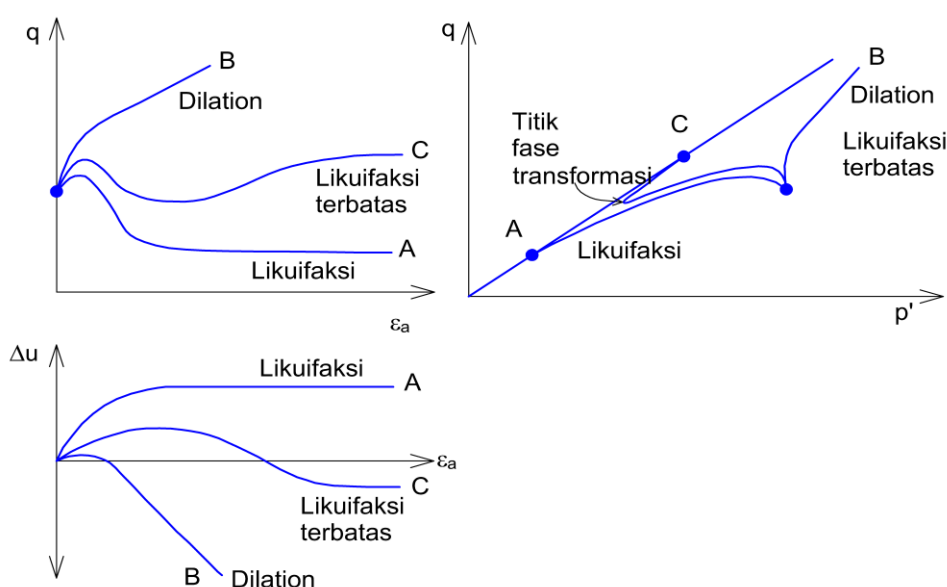
SPT-N (jumlah pukulan/30 cm)	Kepadatan Relatif, D_r (%)	Klasifikasi Kepadatan
0-4	0-20	Sangat lepas
4-10	20-40	Lepas
10-30	40-60	Setengah padat
30-50	60-80	Padat
>50	80-100	Sangat padat

Perilaku tanah pasir jenuh terhadap fenomena likuifaksi dapat dibagi

menjadi tiga, yaitu likuifaksi, likuifaksi terbatas dan *dilation* (Castro, 1969).

Tanah pasir dengan perilaku *dilation* umumnya terjadi pada tanah pasir padat sampai sangat padat. Sedangkan tanah pasir setengah padat akan mengalami likuifaksi terbatas. Likuifaksi terjadi pada tanah pasir sangat lepas sampai lepas ketika diberikan pembebanan statik maupun dinamik. Hasil pengujian triaksial CU yang dilakukan oleh Castro (1969), perilaku tanah pasir dapat

digambarkan dalam grafik hubungan tegangan-regangan, $p' - q$ (*stress path*) dan tekanan air pori-regangan. p' (tegangan efektif rerata) didefinisikan sebagai $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ dan q (tegangan deviator) didefinisikan sebagai $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$. Tipikal grafik tiga kondisi perilaku tanah dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Perilaku tanah pasir ketika likuifaksi penuh, likuifaksi terbatas dan *dilation* pada grafik hubungan antara : a) tegangan dengan regangan, b) perubahan tekanan air pori dengan regangan dan c) p' dengan q (Castro, 1969)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3 menunjukkan skenario penilaian likuifaksi akibat dari pengaruh kepadatan relatif dan tegangan kejang. Pada kondisi tegangan kejang efektif sebesar 400 kPa, pengujian menggunakan tiga variasi kepadatan relatif ($D_{r,c}$) yaitu 25.65%, 34.41%, dan 47.78%. Pada kondisi tegangan kejang efektif sebesar 100 kPa, pengujian menggunakan dua

variasi kepadatan relatif ($D_{r,c}$) yaitu 18.23% dan 41.16%.

Variasi tegangan kejang diberikan pada tanah pasir dengan klasifikasi setengah padat, lepas, dan sangat lepas sampai lepas. Pada tanah pasir setengah padat, variasi tegangan kejang yang diberikan antara 100 - 400 kPa, pada tanah pasir sangat lepas sampai lepas, variasi tegangan kejang antara 100 kPa dan 400 kPa.

Kontrol kepadatan relatif pada variasi tegangan kejang ini hanya dilakukan pada kepadatan relatif awal ($D_{r,i}$). Sedangkan kepadatan relatif

setelah konsolidasi ($D_{r,c}$) akan sedikit bervariasi tapi masih dalam zona klasifikasi sangat lepas, lepas dan setengah padat seperti dalam Tabel 2.

Tabel 3 Variasi kepadatan relatif (D_r) dan tegangan kejang (σ'_3)

Skenario	Kepadatan relatif ($D_{r,c}$)	Tegangan kejang (σ'_3)	Klasifikasi
Variasi kepadatan relatif	25.65%	400 kPa	Lepas
	34.41%	400 kPa	Lepas
	47.78%	400 kPa	Setengah padat
	18.23%	100 kPa	Sangat lepas
	41.16%	100 kPa	Setengah padat
Variasi tegangan kejang	41.16%	100 kPa	Setengah padat
	44.20%	200 kPa	Setengah padat
	47.78%	400 kPa	Setengah padat
	38.31%	50 kPa	Lepas
	34.41%	400 kPa	Lepas
	18.23%	100 kPa	Sangat lepas
	25.65%	400 kPa	Lepas

Pengaruh Tegangan Kekang

Gambar 5 – 7 menunjukkan grafik hubungan antara regangan dan tegangan, p' dan q , serta regangan dan R_u pada pasir sangat lepas sampai setengah padat dengan beberapa variasi tegangan kejang. R_u merupakan perbandingan antara perubahan tekanan air pori (Δu) dengan tegangan kejang (σ'_3).

Gambar 5 menunjukkan perilaku tanah pasir setengah padat dengan nilai kepadatan relatif ($D_{r,c}$) antara 41.16% – 47.78%. Ketika tiga variasi tegangan kejang 100 kPa, 200 kPa dan 400 kPa diberikan ke sampel pasir setengah padat, tanah pasir terlihat mempunyai dua perilaku yang berbeda yaitu likuifaksi ketika diberikan tegangan kejang 100 kPa, likuifaksi terbatas ketika diberikan tegangan kejang 200 kPa dan 400 kPa. Perbedaan perilaku

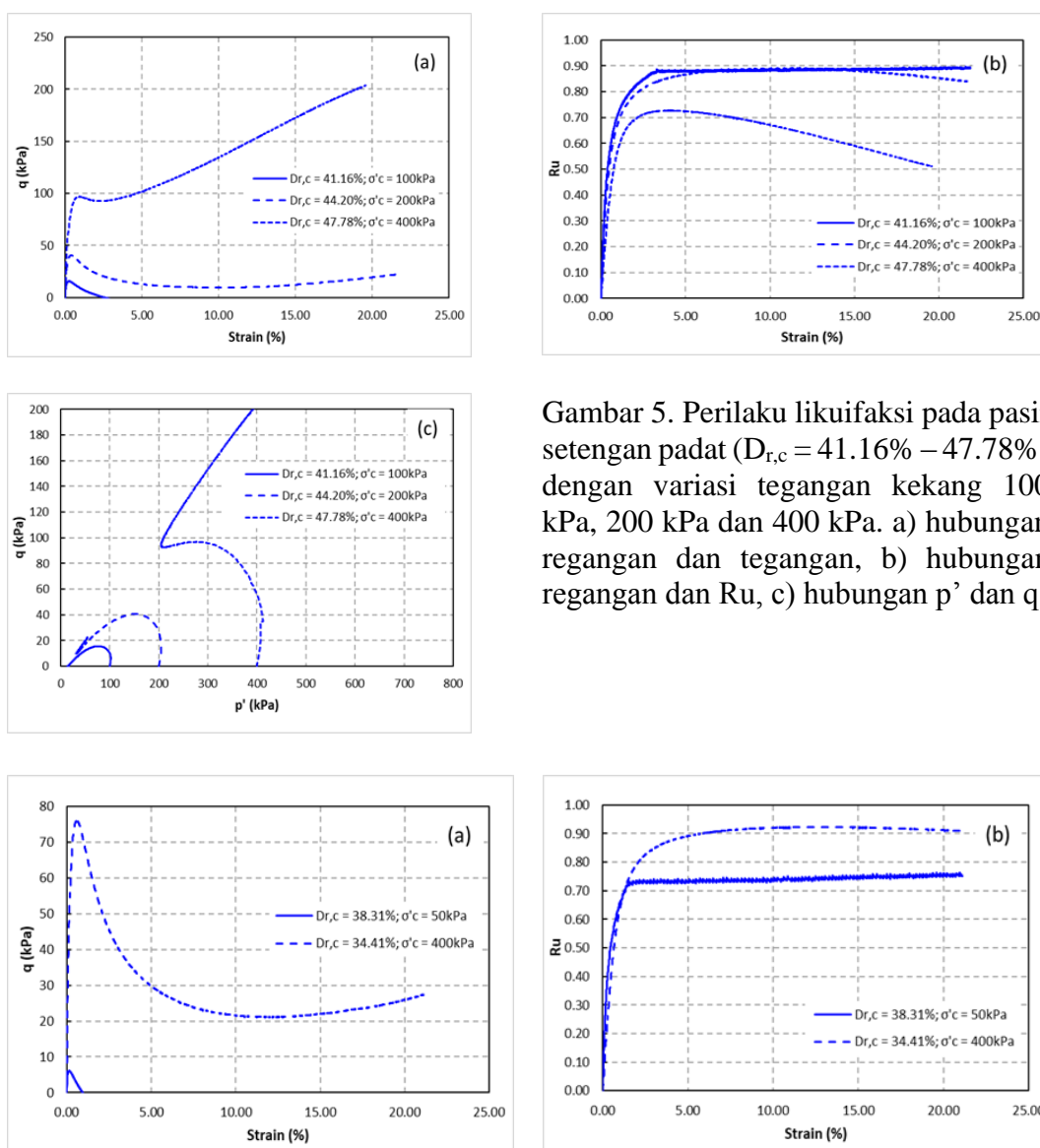
tersebut diakibatkan oleh perilaku dari tekanan air pori ketika penggeseran (*shearing*). Ketika likuifaksi terjadi, nilai tekanan air pori bergerak mendekati tegangan kejang efektif sehingga kuat gesernya akan turun mendekati nol. Seiring dengan naiknya tegangan kejang, tekanan air pori akan bisa direduksi untuk tidak mendekati nilai tegangan kejangnya. Hal ini terlihat dari naiknya kuat geser tanah (q) setelah mencapai puncak dalam Gambar 5.

Apabila digambarkan dengan rasio R_u , pada perilaku likuifaksi, nilai R_u mencapai 0.90, sedangkan pada perilaku likuifaksi terbatas nilai R_u hanya sebesar 0.70 – 0.90. Gambar 6 menunjukkan perilaku tanah pasir lepas dengan nilai kepadatan relatif ($D_{r,c}$) sebesar 38.31% dan 34.31% dengan tegangan kejang masing-masing

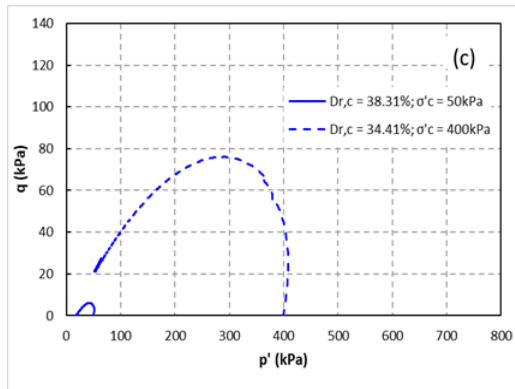
sebesar 50 kPa dan 400 kPa. Perilaku tanah pasir pada kondisi ini adalah likuifaksi ketika diberikan tegangan keang 50 kPa dan likuifaksi terbatas ketika diberikan tegangan keang 400 kPa. Penambahan tegangan keang menyebabkan kuat geser tanah (q) meningkat.

Perilaku tanah pasir dengan kepadatan relatif ($D_{r,c}$) kurang dari 30% atau bersifat sangat lepas sampai lepas,

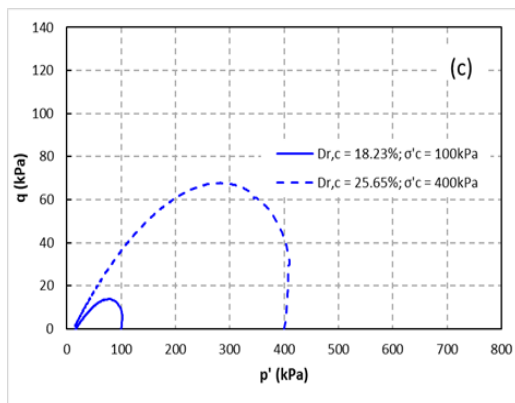
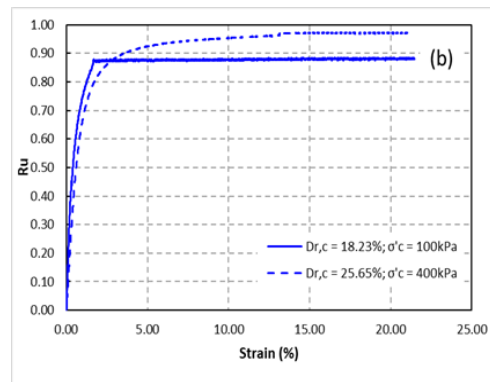
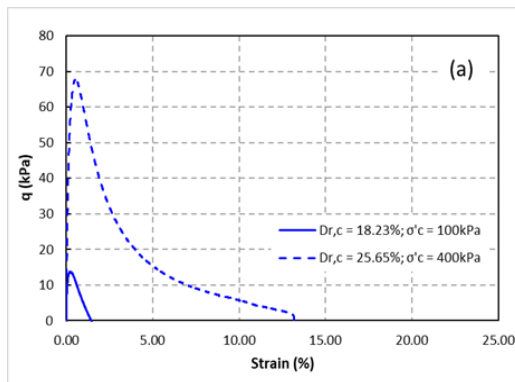
ketika diberikan tegangan keang 100 kPa dan 400 kPa, menunjukkan perilaku likuifaksi seperti terlihat pada Gambar 7. Meskipun kedua sampel sama-sama mengalami likuifaksi, tetapi regangan setelah runtuh berbeda. Regangan keruntuhan pada sampel dengan tegangan keang 100 kPa sebesar 2% dan sampel dengan tegangan keang 400 kPa sebesar 12%.



Gambar 5. Perilaku likuifaksi pada pasir setengan padat ($D_{r,c} = 41.16\% - 47.78\%$) dengan variasi tegangan keang 100 kPa, 200 kPa dan 400 kPa. a) hubungan regangan dan tegangan, b) hubungan regangan dan R_u , c) hubungan p' dan q



Gambar 6. Perilaku likuifaksi pada pasir setengah padat ($D_{r,c} = 34.41\% - 38.31\%$) dengan variasi tegangan keang 50 kPa dan 400 kPa. a) hubungan regangan dan tegangan, b) hubungan regangan dan R_u , c) hubungan p' dan q



Gambar 7. Perilaku likuifaksi pada pasir sangat lepas sampai lepas ($D_{r,c} < 30\%$) dengan variasi tegangan keang 100 kPa dan 400 kPa. a) hubungan regangan dan tegangan, b) hubungan regangan dan R_u , c) hubungan p' dan q

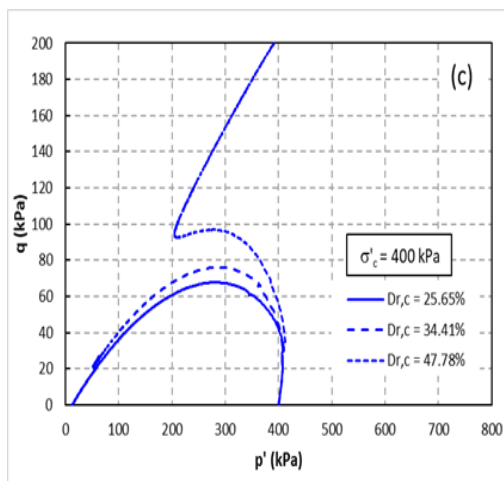
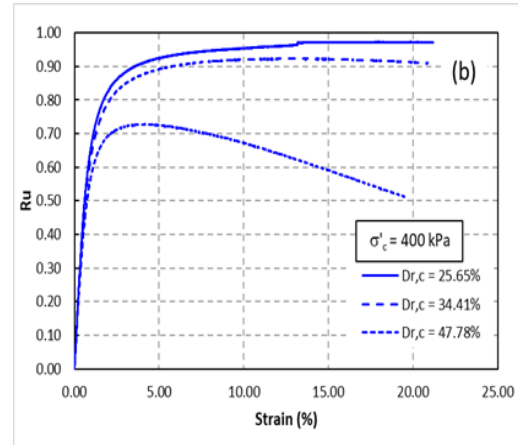
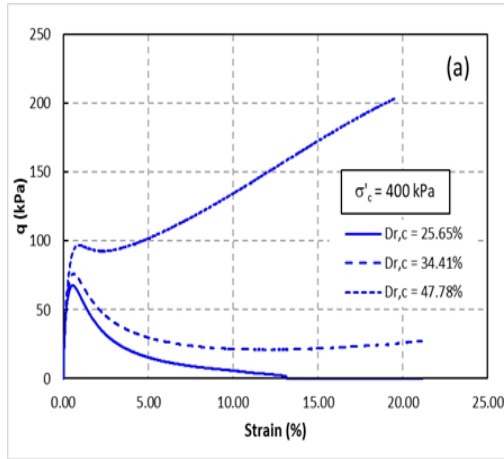
Pengaruh Kepadatan Relatif

Gambar 8 dan 9 menunjukkan grafik hubungan antara regangan dan tegangan, p' dan q , serta regangan dan R_u pada pasir sangat lepas sampai setengah padat dengan pemberian tegangan keang 100 kPa dan 400 kPa. Ketika tegangan keang sebesar 400 kPa diaplikasikan ke tanah pasir lepas sampai setengah padat, maka tanah pasir mempunyai dua perilaku yang

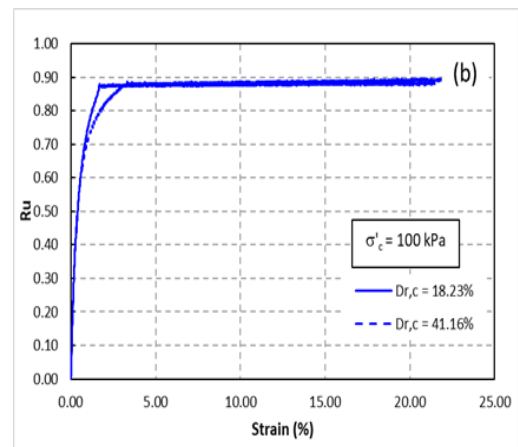
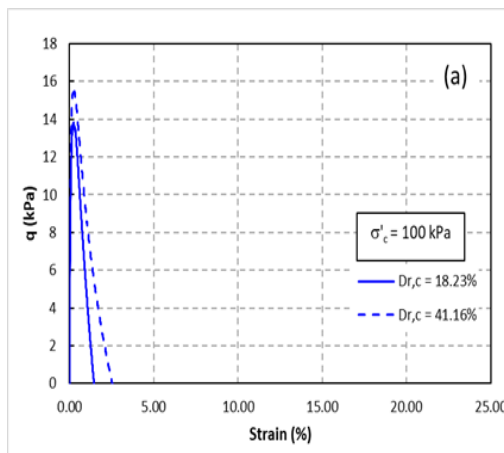
berbeda yaitu likuifaksi dan likuifaksi terbatas (Gambar 8). Pada tanah pasir lepas, kekuatan tanah akan turun mendekati nol akibat dari perilaku tekanan air pori yang naik mendekati tegangan keang. Seiring bertambahnya kepadatan relatif, tekanan air pori akan bergerak turun setelah mencapai puncak. Ketika diberikan tegangan keang 100 kPa, tanah pasir sangat lepas maupun

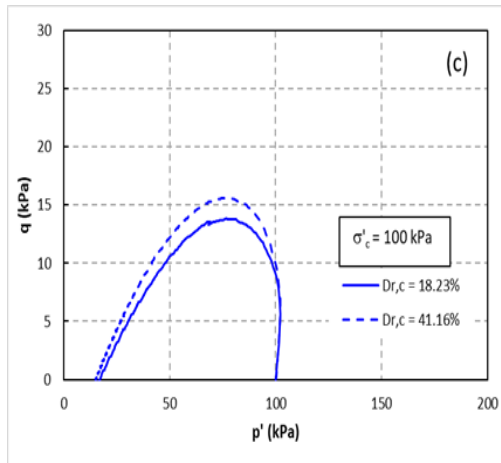
setengah padat mengalami likuifaksi (Gambar 9). Sampel setengah padat dan lepas dengan tegangan kekang rendah

(<100 kPa) runtuh pada regangan yang hampir sama yaitu sekitar 2%.



Gambar 8. Perilaku likuifaksi pada pasir lepas sampai setengah padat ($Dr,c = 25.65\% - 47.78\%$) dengan tegangan kekang 400 kPa. a) hubungan regangan dan tegangan, b) hubungan regangan dan R_u , c) hubungan p' dan q



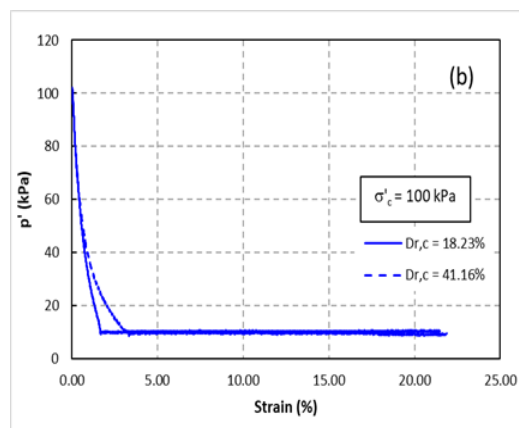
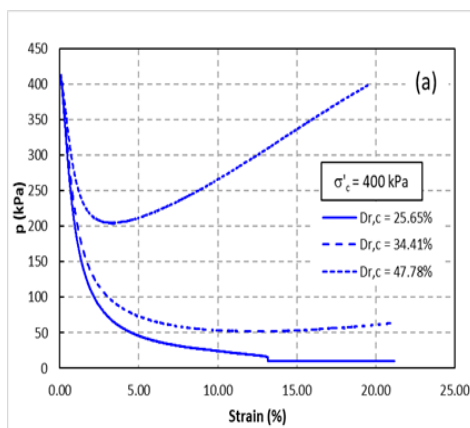


Gambar 9. Perilaku likuifaksi pada pasir sangat lepas dan setengah padat dengan tegangan kekang 100 kPa. a) hubungan regangan dan tegangan, b) hubungan regangan dan R_u , c) hubungan p' dan q

DISKUSI

Tanah pasir yang mengalami likuifaksi, ketika diberikan pembebanan, maka tegangan deviator akan naik dan mencapai puncak, selanjutnya tegangan deviator tersebut turun sampai mendekati nol seperti terlihat pada grafik hubungan tegangan dan regangan serta p' dan q di Gambar 5 – 9. Hal ini disebabkan oleh air didalam butiran tanah terjebak dan tidak dapat terdisipasi sehingga menyebabkan kenaikan tekanan air pori saat pembebanan. Apabila tekanan air pori tersebut telah konstan dan mendekati nilai tegangan kekang, maka kuat geser tanah akan menjadi sangat kecil atau terjadi likuifaksi.

Pada perilaku likuifaksi terbatas, tekanan air pori akan naik mendekati tegangan kekang dan selanjutnya turun secara perlahan. Sedangkan pada perilaku *dilation*, tekanan air pori akan naik tetapi tidak sampai mendekati tegangan kekang. Tekanan air pori pada kasus likuifaksi terbatas dan *dilation* mengalami penurunan yang disebabkan oleh terjadinya *suction* (Yamamuro & Lade, 1997). Gambar 10 menunjukkan hubungan regangan dengan tegangan efektif rerata. Ketika terjadi *suction*, tegangan efektif rerata yang awalnya mengalami penurunan berubah naik secara perlahan.



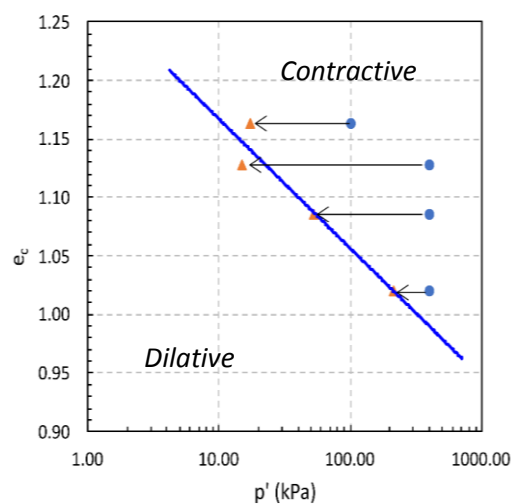
Gambar 8. Hubungan antara regangan dengan p' (tegangan efektif rerata)

Berdasarkan variasi tegangan keang, pasir setengah padat akan mengalami likuifaksi penuh ketika tegangan keang yang terjadi cukup kecil. Seiring dengan penambahan tegangan keang, perilaku pasir setengah padat berubah menjadi likuifaksi terbatas. Likuifaksi penuh tetap terjadi pada tanah sangat lepas sampai lepas meskipun tegangan keang yang diberikan cukup besar.

Berdasarkan pengujian tersebut, tanah pasir setengah padat mengalami likuifaksi ketika dekat dengan permukaan tanah karena tegangan keang yang terjadi cukup kecil (<100 kPa). Sedangkan pada pasir sangat lepas likuifaksi dapat terjadi meskipun tegangan keang yang diberikan cukup tinggi (>400 kPa). Menurut Idriss & Boulanger (2008), kasus likuifaksi umumnya terjadi hanya sampai kedalaman 15 m atau pada kondisi tegangan keang yang kecil. Likuifaksi tidak selalu menimbulkan kerusakan di permukaan. Apabila terdapat lapisan tebal dan tidak rentan terhadap likuifaksi di atas lapisan yang rentan terhadap likuifaksi, maka kerusakan yang terjadi di permukaan kecil (Ishihara, 1985; Upomo et al., 2023).

Gambar 11 menunjukkan kurva *critical state line* (CSL) yang dibangun dari pengujian pasir Rembang. Pada zona di kanan garis CSL menunjukkan tanah berperilaku *contractive* dan dikiri garis CSL tanah berperilaku *dilative*. Pada pengujian triaksial CU, ketika tanah diberikan beban maka volume akan tetap dan tegangan efektif rerata akan turun seiring dengan naiknya

tekanan air pori sehingga tegangan efektif rerata akan bergerak mendatar ke arah garis CSL. Menurut Castro (1969), likuifaksi hanya bisa terjadi ketika tanah berada pada zona *contractive*. Pasir setengah padat ataupun padat dapat terjadi likuifaksi ketika mendapatkan tegangan keang yang cukup, sehingga tanah pasir berperilaku *contractive*.



Gambar 9. *Critical state line* (CSL) tanah pasir Rembang

SIMPULAN

Pengujian dengan variasi kepadatan relatif dan tegangan keang telah dilakukan pada pasir Rembang. Distribusi ukuran butir pasir Rembang didesain berada dalam zona dengan potensi likuifaksi. Hasil pengujian menunjukkan variasi tegangan keang, pasir setengah padat akan mengalami likuifaksi penuh ketika diberikan tegangan keang kecil. Penambahan tegangan keang pada pasir setengah padat mengubah perilaku dari likuifaksi menjadi likuifaksi terbatas. Likuifaksi tetap terjadi pada tanah pasir sangat

lepas sampai lepas meskipun tegangan keakang yang diberikan mencapai 400 kPa. Pembuatan kurva *critical state line* juga telah dilakukan dalam penelitian ini untuk memberikan gambaran zona *contractive* dan *dilatative* pada pasir silika Rembang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan dana untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Hubbard, J., Meilianda, E., Switzer, A., Du, N., Brocard, G., Alfian, D., Benazir, B., Feng, G., Yun, S.H., Majewski, J., Wei, S., & Hill, E.M., 2019, Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation. *Nature Geoscience*, 12, 935–939.
- Castro, G., 1969, *Liquefaction of sands* [Ph.D. thesis]. Harvard University.
- Cubrinovski, M., Henderson, D., & Bradley, B., 2012, Liquefaction Impacts in Residential Areas in the 2010-2011 Christchurch Earthquakes. *One Year after the 2011 Great East Earthquake*, 811–824.
- 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.
- Idriss, I.M., & Boulanger, R.W., 2008, *Soil Liquefaction during Earthquakes*. EERI.
- Ishihara, K., 1985, Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 321–376.
- Ishihara, K., & Koga, Y., 1981, Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata earthquake. *Soils and Foundations*, 21(3), 35–52.
- 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.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Kusumawardani, R., Muhsiong, C., Upomo, T., Huang, R.C., Fansuri, M., & Prayitno, G., 2021, Understanding of Petobo liquefaction flowslide by 2018.09.28 Palu-Donggala Indonesia earthquake based on site reconnaissance. *Landslides*, 18(9), Article 9.
- Kusumawardani, R., Upomo, T., Nugroho, U., & Cahyo, H.,

- 2023, Evaluasi Likuifaksi Pasir Silika Rembang Melalui Uji Triaksial Consolidated Undrained. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(3), 147–152.
- Lee, K.L., Seed, H.B., & Makdisi, F.I., 1975, Properties of soil in the San Fernando Hydraulic Fill Dams. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101(GT8), Article GT8.
- 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.
- Mason, H.B., Montgomery, J., Gallant, A.P., Hutabarat, D., Reed, A. N., Wartman, J., Irsyam, M., Simatupang, P.T., Alatas, I.M., Prakoso, W.A., Djarwadi, D., Hanifa, R., Rahardjo, P., Faizal, L., Harnanto, D.S., Kawanda, A., Himawan, A., & Yasin, W., 2021, East Palu Valley landslides induced by the 2018 M 7.5 Palu-Donggala earthquake. *Geomorphology*, 373, 107482.
- Mitchell, J.K., & Soga, K., 2005, *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, Inc.
- 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.
- 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.
- Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M., & Makdisi, F.I., 1973, *Analysis of the slides in the San Fernando Dams during the earthquake of Feb. 9, 1971* (EERC 73-2; Issue EERC 73-2). Earthquake Engineering Research Center.
- Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M., & Makdisi, F.I., 1975, The Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101(7), Article 7.
- 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.
- Upomo, T., Chang, M., Kusumawardani, R., Prayitno, G., Kuo, C.P., & Nugroho, U.,

- 2023, Assessment of Petobo Flowslide Induced by Soil Liquefaction during 2018 Palu–Donggala Indonesian Earthquake. *Sustainability*, 15(6), 1–26.
- Yamamuro, J.A., & Lade, P.V., 1997, Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 905–917.
- Youd, T.L., 2014, 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.