

**PENGARUH KERAPATAN TANAH PASIR KALI OPAK PLERET
YOGYAKARTA TERHADAP POTENSI LIKUIFAKSI
BERDASARKAN UJI SHAKING TABLE**

***THE EFFECT OF SOIL DENSITY OF KALI OPAK PLERET
YOGYAKARTA SAND ON LIQUEFACTION POTENTIAL BASED ON
SHAKING TABLE TEST***

Bimawijaya Laia

Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
Staff Pengajar, STKIP Nias Selatan
bimawijaya.laia@gmail.com

INTISARI

Likuifaksi adalah suatu peristiwa berubahnya sifat tanah dari keadaan padat menjadi keadaan cair, yang disebabkan oleh beban siklik pada saat gempa terjadi sehingga tekanan air pori meningkat melebihi tegangan efektif tanah. Likuifaksi umumnya terjadi di lapisan sedimen granular dengan tingkat kerapatan rendah. Pengaruh kerapatan relatif tanah terhadap mekanisme likuifaksi dapat diketahui dengan melakukan uji eksperimental menggunakan *shaking table*. Parameter yang digunakan untuk menentukan tanah yang mengalami likuifaksi adalah rasio peningkatan tegangan air pori (r_u). Jika $r_u \geq 1$ maka likuifaksi dapat terjadi, sedangkan jika $r_u < 1$ maka likuifaksi tidak dapat terjadi. Tanah pasir Kali Opak Pleret yang digunakan sebagai objek dalam penelitian memiliki kerapatan sebesar 24,35%. Hasil evaluasi uji *shaking table* menunjukkan bahwa potensi likuifaksi terbesar terjadi pada kerapatan relatif tanah 25% untuk percepatan gempa 0,4g dan terendah tercatat pada kerapatan relatif tanah 55% untuk percepatan gempa 0,3g. Penurunan muka tanah terbesar terjadi pada kerapatan relatif 25% yakni 4 cm dan terendah pada kerapatan 55% sebesar 0,53 cm. Pengujian ini menunjukkan bahwa pada tanah pasir Kali Opak Pleret dengan kerapatan relatif tanah 25% dan 35% berpotensi likuifaksi, dan pada kerapatan relatif tanah 45% dan 55% tidak berpotensi likuifaksi.

Kata Kunci: likuifaksi, uji *shaking table*, kerapatan relatif, rasio peningkatan tegangan air pori

ABSTRACT

Liquefaction is an event changing soil properties of the solid state into a liquid state, which is caused by cyclic loading when an earthquake occurs that exceeds the pore water pressure increases the effective voltage ground. Liquefaction generally occurs in the sedimentary layers of low density granular level. The influence of the relative soil density on liquefaction mechanism can be determined by performing an experimental test using a shaking table. The parameters used to determine soil liquefaction is experiencing an increase in the ratio of pore water pressure (r_u). If $r_u \geq 1$ then liquefaction can occur, whereas if $r_u < 1$ then liquefaction can not occur. Opak Pleret sandy soil that is used as the object of study has a density of 24.35%. Shaking table test results of the evaluation showed that the greatest potential for liquefaction occurs in the soil relative density of 25% for the seismic acceleration 0.4g and the lowest was recorded at 55% relative density soil to earthquake acceleration 0.3g. The land subsidence occurred in the relative density of 25% which is 4 cm and the lowest density of 55% amounting to 0.53 cm. This test showed that the sandy soil Opak Pleret with relative soil density 25% and 35%

potential liquefaction, and the relative soil density of 45% and 55% no potential liquefaction.

Keywords: liquefaction, shaking table test, the relative density, the ratio of increase in pore water pressure

PENDAHULUAN

Ada begitu banyak peristiwa gempa bumi terjadi di Indonesia, salah satunya adalah Gempa Yogyakarta dan Jawa Tengah pada tanggal 27 Mei 2006 yang menimbulkan kerusakan cukup parah dan diikuti pula oleh peristiwa likuifaksi. Bantul, Piyungan, Pleret, Banguntapan, Jetis, serta Imogiri adalah beberapa daerah yang dilalui patahan Kali Opak dan tercatat mengalami sebaran lateral dan *sand boil* akibat gempa tersebut.

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan secara eksperimental dengan menggunakan alat *shaking table* untuk mengetahui pengaruh kerapatan tanah terhadap mekanisme dan potensi likuifaksi di wilayah Kali Opak Pleret. Kerapatan relatif (R_d) sampel tanah pasir yang digunakan adalah sebesar 25%, 35%, 45%, 55% sesuai dengan kriteria pasir lepas hingga pasir padat Michigan Department of Transportation (2009). Percepatan maksimum yang digunakan dalam permodelan gempa, mengacu pada peraturan gempa SNI 1726:2012 serta didukung dengan hasil penelitian Fathani dkk. (2008) yakni sebesar 0,3g sampai dengan 0,4g untuk wilayah Kali Opak Pleret.

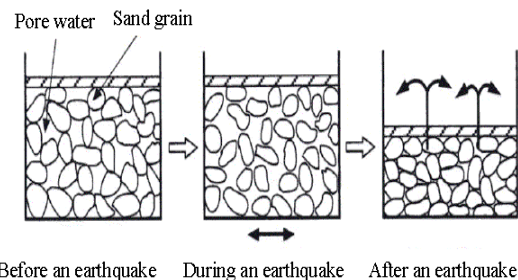
Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat untuk memahami konsep dan mekanisme likuifaksi, khusus mengenai pengaruh kerapatan relatif, percepatan maksimum gempa, dan peningkatan tegangan air pori terhadap potensi likuifaksi.

LANDASAN TEORI

Likuifaksi

Menurut Barker (1981), likuifaksi didefinisikan sebagai keadaan dimana tanah pasir jenuh kehilangan kekuatan geser dan berkurangnya tegangan efektif akibat dari naiknya tegangan air pori. Peningkatan tegangan air pori disebabkan oleh naiknya permukaan air tanah akibat gerakan gelombang dan juga gerakan berulang dari tegangan geser pada tanah berpasir jenuh

selama gempa bumi, gambaran peristiwa likuifaksi dapat terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema mekanisme terjadinya likuifaksi (JSCE, 2007)

Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Mekanisme Likuifaksi

Penelitian yang dilakukan oleh (Prakash, 1981) menunjukkan bahwa karakteristik terjadinya likuifaksi tergantung pada begitu banyak faktor yang saling berkaitan, di antaranya jenis tanah dan distribusi ukuran butiran, kerapatan relatif tanah (R_d), karakteristik getaran, lokasi drainasi, ukuran dan sifat beban yang ditopang oleh tanah, formasi lapisan tanah, periode tanah berada di bawah tekanan yang berkelanjutan, kondisi tanah pada masa lampau.

Analisis Butiran Terhadap Kerentanan Likuifaksi

Menurut New York Department of Transportation (2007), likuifaksi umumnya terjadi pada tanah yang bergradasi seragam (*uniformly graded soil*). Sementara tanah yang bergradasi baik (*well graded soil*) akan mempunyai nilai tahanan terhadap likuifaksi yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang bergradasi jelek (*poor graded soil*). Hal ini disebabkan oleh partikel-partikel kecil yang terdapat pada tanah bergradasi baik akan dapat mengisi rongga di antara partikel yang lebih besar, sehingga potensi untuk mengalami perubahan volume pada kondisi *drain* akan menjadi lebih kecil akibat *undrained loading* (Ikhsan, 2011). Tsuchida (1970) mengusulkan kurva gradasi butiran tanah sebagai identifikasi awal potensi

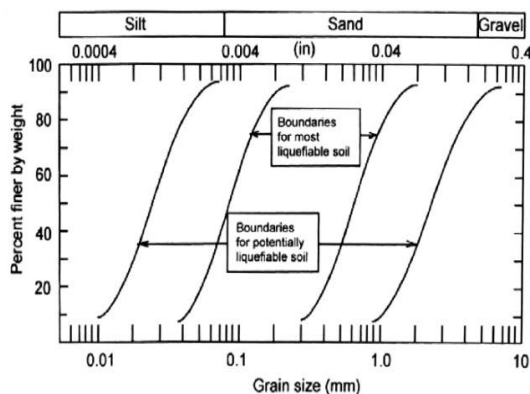
kerentanan tanah terhadap likuifaksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Koefisien gradasi (*coefficient of curvature*) (C_c) dan koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*), (C_u) tanah untuk penentuan tanah bergradasi baik atau buruk dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60}) \times (D_{10})} \quad (1)$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

dimana D_{10} adalah ukuran butiran pada persentase 10% lolos, D_{30} adalah ukuran butiran pada persentase 30% lolos dan D_{60} adalah ukuran butiran pada persentase 60% lolos. Tanah pasir akan disebut *bergradasi baik* jika memiliki koefisien gradasi $1 < C_c < 3$ dengan koefisien keseragaman $C_u > 6$, dan tanah disebut *bergradasi sangat baik* jika memiliki $C_u > 15$, jika tidak terdapat dalam rentang tersebut maka tanah disebut *bergradasi buruk*.



Gambar 2. Rentang kurva gradasi butiran untuk tanah yang terlikuifaksi maupun yang tidak mengalami likuifaksi Tsuchida (1970)

Pengaruh Kerapatan Relatif Tanah Terhadap Mekanisme Likuifaksi

Kerapatan relatif tanah adalah tingkat kerapatan tanah berbutir kasar (tanah granuler) dan merupakan salah satu pengontrol mekanisme likuifaksi (Prakash, 1981). New York Department of Transportation (2007), menyebutkan bahwa likuifaksi umumnya terjadi pada tanah pasir bersih dengan derajat kejenuhan tinggi dan memiliki kerapatan relatif tanah kurang dari 50% dan batas bawah kerapatan relatif tanah

tidak akan mengalami likuifaksi adalah sekitar 75%.

Kerapatan dari tanah pasir dapat dinyatakan dengan nilai *relative density* (R_d), klasifikasi kerapatan relatif tanah pasir dapat terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi kerapatan relatif tanah pasir (Michigan Department of Transportation, 2009)

Jenis Tanah Pasir	Kerapatan Relatif (R_d)
Sangat lepas	0 - 15%
Lepas	15% - 35%
Hampir padat	35% - 65%
padat	65% - 85%
Sangat padat	85% - 100 %

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai kerapatan relatif tanah adalah persamaan yang diperkenalkan oleh Terzaghi dan Peck (1948, dalam ASTM D 4253) dengan beberapa penambahan, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$R_d = \left[\frac{e_{(maks)} - e}{e_{(maks)} - e_{(min)}} \right] \times 100 \quad (3)$$

atau

$$R_d = \left[\frac{\gamma_d(maks)}{\gamma_d} \right] \times \left[\frac{\gamma_d - \gamma_d(min)}{\gamma_d(maks) - \gamma_d(min)} \right] \quad (4)$$

dimana e_{maks} adalah kemungkinan angka pori maksimum, adalah e_{min} adalah kemungkinan angka pori minimum, e adalah angka pori dengan kondisi tertentu, γ_d adalah berat volume kering tanah, $\gamma_d(maks)$ adalah berat volume kering maksimum, dan $\gamma_d(min)$ adalah berat volume kering minimum.

Shaking Table

Shaking table pertama kali diciptakan di Universitas Tokyo pada tahun 1893. *Shaking table* pada awalnya hanya digunakan untuk mengetahui respon struktur terhadap beban dinamik yang selanjutnya dikembangkan untuk mengetahui respon tanah terhadap beban gempa. Uji *shaking table* menghasilkan prediksi yang mendekati keadaan sesungguhnya dalam kaitannya di bidang geoteknik (Boulanger dkk., 2013).

Menurut Prakash (1981) ada beberapa kelebihan dari uji *shaking table*, di antaranya:

- a) Sampel homogen dengan deposit yang besar dan jenuh air dapat digunakan untuk mensimulasikan keadaan lapangan.
- b) Percepatan gempa yang seragam dapat diterapkan diseluruh sampel pada frekuensi yang rendah, sesuai dengan gelombang geser yang mungkin terjadi di lapangan.
- c) Dapat digunakan dalam mode *displacement*, kecepatan atau percepatan untuk memperoleh data percepatan dan frekuensi dari *shaking table*.
- d) Sangat dimungkinkan untuk dapat melacak distribusi tegangan air pori dalam sampel tanah pasir selama likuifaksi.
- e) Pengamatan sampel secara visual dapat dilakukan selama penggetaran.

Kekurangan utama dalam pengujian *shaking table* dengan deposit tanah yang besar, terletak pada biaya awal atau persiapan alat serta bahan yang tinggi dan cenderung lebih tinggi lagi untuk memperoleh data hasil pengujian (Finn, 1972).

Uji Potensi Likuifaksi Dengan Alat *Shaking Table*

Gupta (1979 dalam Prakash, 1981) menyebutkan bahwa likuifaksi tidak akan terjadi saat rasio peningkatan tegangan air pori kurang dari satu ($r_u < 1$), sebaliknya likuifaksi akan terjadi saat rasio tegangan air pori bernilai lebih dari atau sama dengan satu ($r_u \geq 1$) dimana tegangan efektif pada tanah bergerak menuju nol.

Nilai rasio peningkatan tegangan air pori yang dimaksudkan oleh Gupta tersebut dapat diperoleh dari persamaan:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'} \quad (5)$$

dimana r_u adalah rasio peningkatan tegangan air pori, Δu adalah peningkatan tegangan air pori, σ' adalah tegangan efektif tanah.

METODOLOGI PENELITIAN

Kali Opak sebagai objek dalam penelitian ini terletak di Kecamatan Pleret, Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Pemilihan daerah tersebut mengacu pada hasil pemetaan zona potensi likuifaksi di wilayah Kabupaten

Bantul dengan menggunakan data *peak ground acceleration* metode *LPI* dan *LSI* berdasarkan pusat gempa versi BMG dan versi USGS (Yogatama, 2012; Setyabudi, 2013) yang menunjukkan bahwa tanah pasir Kali Opak Pleret, Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta berada di dalam zona *high* atau zona yang berpotensi mengalami likuifaksi tinggi (versi *LPI*) zona *moderate* atau zona sedang (versi *LSI*). Kerapatan relatif tanah pasir divariasikan pada rentang 25%, 35%, 45% dan 55%. Kerapatan relatif tanah tersebut dimulai dari rentang tanah pasir lepas berpotensi likuifaksi hingga tanah tidak berpotensi likuifaksi (Prakash, 1981; New York Department of Transportation, 2007).

Uji eksperimental yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan alat uji *shaking table* analisa gerak satu arah dengan dimensi panjang 241 cm dan lebar 121 cm, menggunakan daya sebesar 25 HP (*Horse Power*) dengan tegangan listrik sebesar 380 volt, dan kapasitas beban maksimum yang mampu ditopang sebesar 2000 kg seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Wadah benda uji yang sudah terpasang pada alat *shaking table*

Kriteria pembebanan pengujian *shaking table* menggunakan percepatan maksimum gempa sebesar 0,3g berdasarkan SNI 1726-2012 untuk wilayah Kali Opak Pleret, Kabupaten Bantul dan hasil penelitian Fathani dkk. (2008). Percepatan maksimum gempa tersebut juga disesuaikan dengan kapasitas percepatan maksimum yang tersedia pada alat uji *shaking table*. Durasi pembebanan dinamis dalam pengujian ini akan dilakukan selama 32 detik dengan estimasi durasi getaran bolak-balik pada tanah maupun pada

batuan untuk jarak episentral kurang dari 10 km dalam Magnitudo 7 skala Richter (Chang dan Krinitszky, 1977).

Tanah pasir yang telah dipersiapkan dituang ke dalam wadah secara perlahan hingga ketinggian 10 cm seperti terlihat pada Gambar 4, wadah pasir lalu diisi air hingga ketinggian yang sama dengan permukaan tanah pasir. Setelah air meresap, tanah dipadatkan dengan menggunakan stamper pemadat tanah, hal ini dilakukan guna memperoleh kerapatan tanah pasir yang diinginkan. Generator listrik kemudian dinyalakan untuk memberikan daya penggerak pada *shaking table* yang kemudian digetarkan sesuai dengan variasi pembebanan yang tersajikan pada Tabel 3.

Selama pengujian berlangsung, tegangan air pori yang terjadi akibat pembebanan dinamik dicatat tiap detiknya pada setiap alat pencatat yang sudah terpasang sebelumnya pada wadah pasir. Hasil pengujian dalam bentuk pembacaan tegangan air pori yang merupakan fungsi dari waktu selanjutnya digambarkan dalam sebuah grafik sehingga dapat dilakukan evaluasi potensi likuifaksi.

Tabel 3. Variasi Pembebanan Siklik

Pengujian	R_d (%)	PGA (g)	Waktu pembebanan (detik)
1	25	0,3	32
2	35	0,3	32
3	45	0,3	32
4	55	0,3	32

HASIL DAN PEMBAHASAN

Propertis Tanah Pasir Kali Opak Pleret

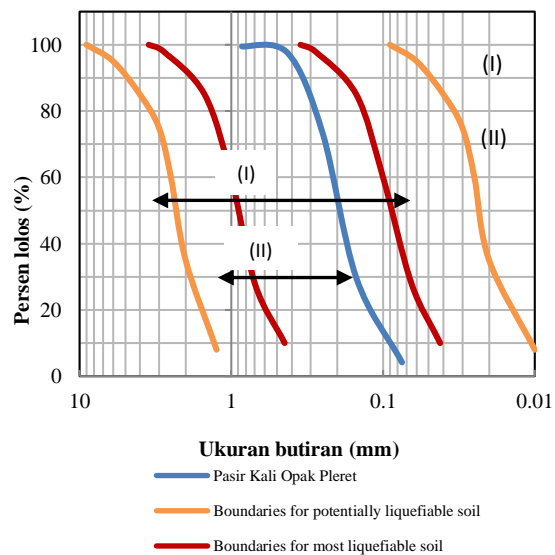
Berdasarkan pengujian awal untuk tanah pasir Kali Opak Pleret, diperoleh tipikal nilai kadar air (w) sebesar 24,92%, *Specific gravity* (G_s) sebesar 2,65. Sifat fisik tanah pasir Kali Opak Pleret secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil analisa saringan kemudian dipadukan dengan grafik sebaran potensi likuifaksi (Tsuchida, 1970), sehingga dapat diperoleh gambaran potensi likuifaksi berdasarkan gradasi butiran. Grafik distribusi butiran pasir Kali Opak Pleret dalam kurva rentang tanah berpotensi likuifaksi, dapat terlihat pada Gambar 5. Grafik tersebut menunjukkan tanah pasir Kali Pleret berada

dalam rentang tanah pasir yang sangat berpotensi mengalami likuifaksi.

Dalam grafik tersebut dapat diperoleh pula diameter butiran pada persentase 10% lolos (D_{10}) = 0,09 mm, diameter butiran pada persentase 30% lolos (D_{30}) = 0,18, dan diameter butiran pada persentase 60% lolos (D_{60}) = 0,22 mm.

Tabel 2. Data propertis tanah pasir Kali Opak Pleret

Propertis Tanah	Simbol	Nilai	Satuan
Kadar air	w	24,92	%
<i>Specific gravity</i>	G_s	2,65	-
Berat volume basah	γ_b	1,72	g/cm ³
Berat volume kering	γ_d	1,37	g/cm ³
Berat volume jenuh	γ_{sat}	1,84	g/cm ³
Angka pori	e	0,89	-
Kerapatan relatif	R_d	24,35	%
Kemiringan kurva	C_c	1,63	-
Keseragaman	C_u	2,44	-



Gambar 4. Grafik sebaran potensi likuifaksi (Tsuchida, 1970)

Hasil Pengujian Shaking Table

Tanah pasir dengan kerapatan relatif 25%, digetarkan dengan percepatan maksimum gempa yakni sebesar 0,3g selama 32 detik. Dalam pengujian ini, tanah menunjukkan

perubahan dalam bentuk dan strukturnya. Tanah yang awalnya terlihat padat, berangsur menjadi cair setelah menerima beban dinamik, hal ini disebabkan peningkatan tegangan pori yang terjadi dalam tanah telah melebihi tegangan normal dalam tanah. Pada pengujian ini, tanah pada kerapatan relatif 25% yang digetarkan dengan percepatan maksimum gempa 0,3g berpotensi mengalami likuifaksi hal ini ditandai oleh tegangan air pori yang terus bergerak naik bahkan melewati batas tegangan efektif tanah ($r_u \geq 1$).

Tidak jauh berbeda dengan yang terjadi pada tanah pada pengujian dengan kerapatan relatif sebesar 25%, tanah dengan kerapatan relatif 35% juga menunjukkan adanya perubahan struktur dari tanah selama pembebanan dinamik. Hal ini terjadi karena tekanan air di dalam tanah akan meningkat sehingga memperkecil gaya antar partikel tanah yang menyebabkan kekuatan tanahnya menjadi menurun.

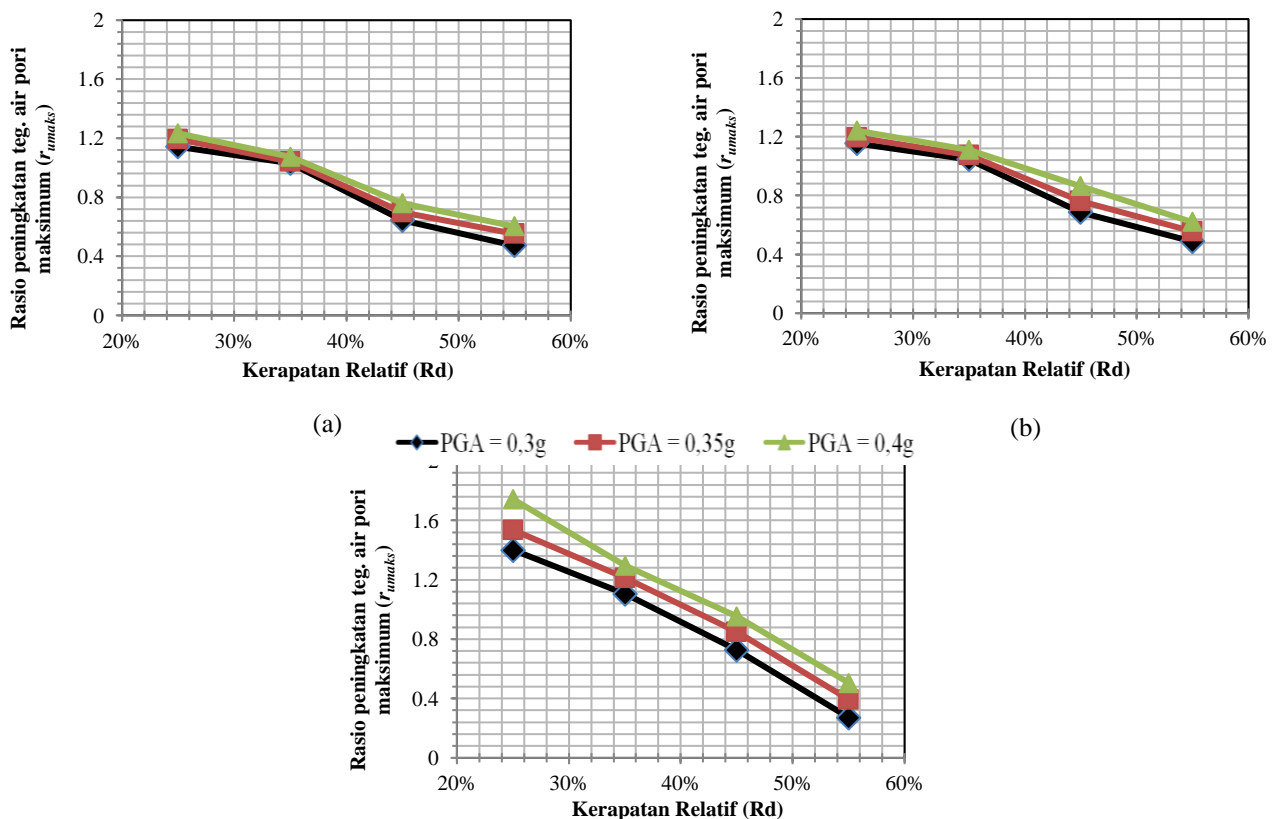
Berdasarkan hasil pengamatan selama pengujian pada kerapatan relatif 45% dan 55% menggunakan *shaking table*, tidak ada

perubahan signifikan pada tanah selama pembebanan dinamik berlangsung. Hal ini disebabkan oleh partikel tanah sudah hampir merapat sehingga tidak ada rongga-rongga yang cukup bagi air untuk bergerak bebas selama pembebanan dinamik, yang berdampak pada mekanisme likuifaksi secara keseluruhan.

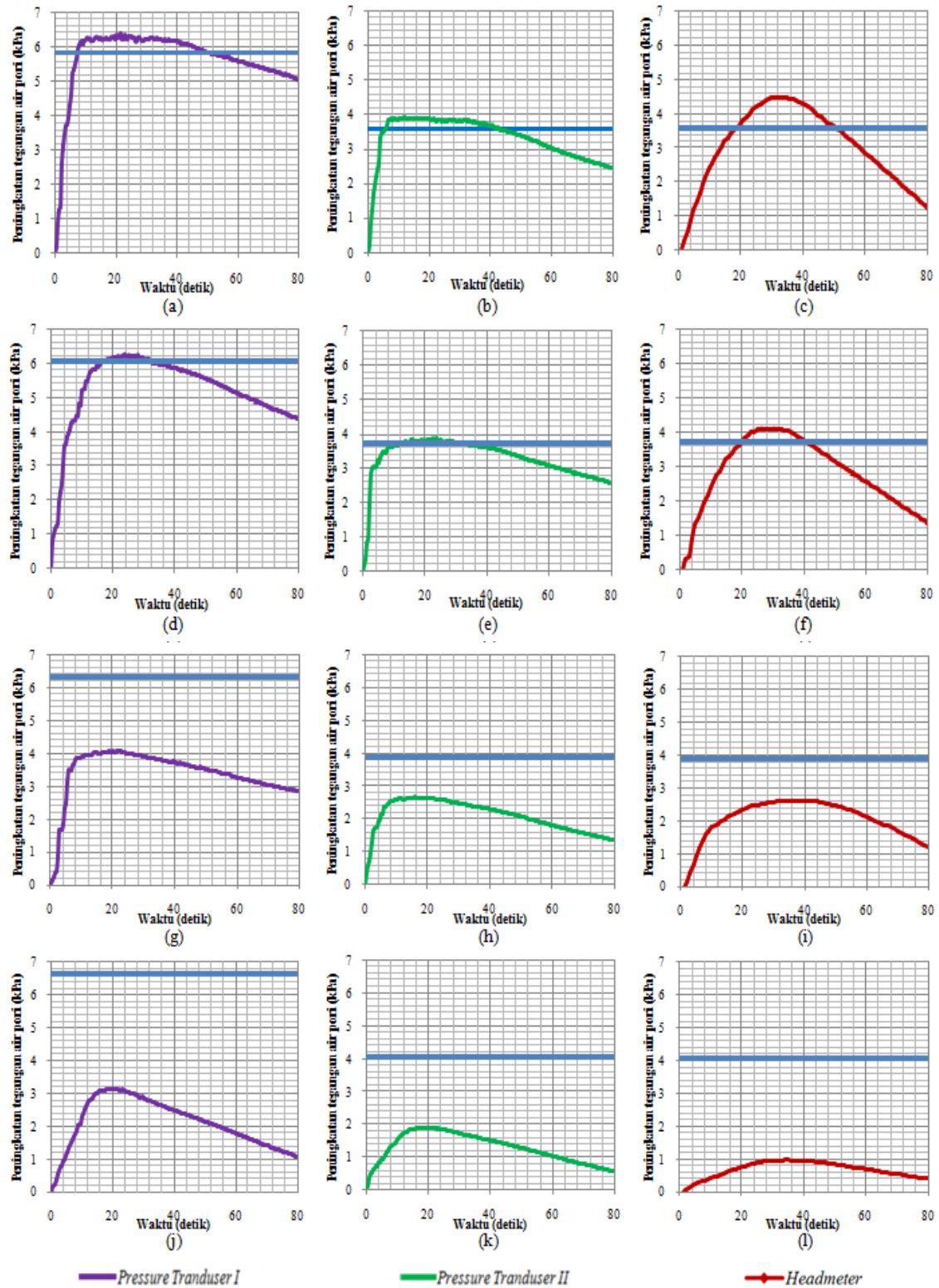
Hal ini juga diperkuat dengan hasil analisis peningkatan tegangan air pori yang menunjukkan akumulasi peningkatan tegangan air pori yang tidak menyentuh ambang batas tegangan efektif tanah ($r_u < 1$). Hasil analisis peningkatan tegangan air pori dapat terlihat pada Gambar 6.

Pengaruh Kerapatan Relatif Tanah Terhadap Mekanisme Likuifaksi

Kerapatan tanah pasir Kali Opak Pleret sangat mempengaruhi mekanisme likuifaksi, hal tersebut didasarkan pada hasil analisis yang menunjukkan bahwa rasio peningkatan tegangan air pori maksimum (r_{umaks}) yang tercatat semakin menurun nilainya seiring dengan meningkatnya kerapatan relatif tanah, seperti yang terlihat pada Gambar 5. Hal ini



Gambar 5. Pengaruh kerapatan relatif tanah (R_d) terhadap rasio peningkatan tegangan air pori maksimum (r_{umaks}) pada alat pembaca: (a) *pressure transducer* I (PT I); (b) *pressure transducer* II (PT II); (c) *headmeter* (HM)

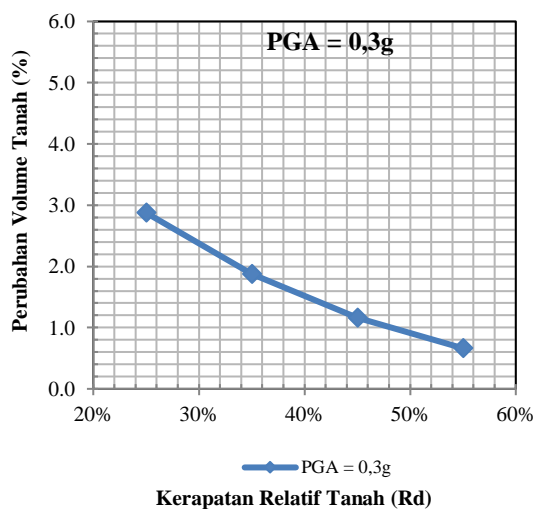


Gambar 6. Grafik peningkatan tegangan air pori pada pengujian dengan PGA 0,3g yang tercatat pada alat pada (a) $R_d = 25\%$, pressure transducer I; (b) $R_d = 25\%$ pressure transducer II; (c) $R_d = 25\%$ headmeter; (d) $R_d = 35\%$, pressure transducer I; (e) $R_d = 35\%$ pressure transducer II; (f) $R_d = 35\%$ headmeter; (g) $R_d = 45\%$, pressure transducer I; (h) $R_d = 45\%$ pressure transducer II; (i) $R_d = 45\%$ headmeter; (j) $R_d = 55\%$, pressure transducer I; (k) $R_d = 55\%$ pressure transducer II; (l) $R_d = 55\%$ headmeter

menunjukkan adanya kontribusi yang signifikan dari peningkatan kerapatan tanah terhadap akumulasi tegangan air pori yang terbentuk dalam tanah sehingga berdampak pada mekanisme likuifaksi.

Pengaruh Kerapatan Relatif Tanah (R_d) Terhadap Penurunan Muka Tanah (*Surface Settlement*)

Hasil analisis perubahan volume tanah yang ditunjukkan pada Gambar 7. mengindikasikan bahwa penurunan muka tanah akan cenderung berkurang seiring dengan meningkatnya kerapatan tanah relatif. Tanah dengan kerapatan yang lebih besar menunjukkan penurunan muka tanah yang lebih kecil jika dibandingkan dengan tanah pada kerapatan relatif yang lebih rendah untuk percepatan gempa yang sama.



Gambar 7. Grafik pengaruh kerapatan relatif tanah terhadap perubahan volume tanah (%)

Tanah yang digetarkan pada PGA 0,3g dengan kerapatan relatif tanah sebesar 50% menghasilkan penurunan muka tanah sebesar 0,53 cm yang menyebabkan berkurangnya volume tanah sebesar 0,66%, di sisi lain untuk PGA yang sama pada kerapatan relatif tanah sebesar 25% menghasilkan penurunan muka tanah yang lebih besar yakni 2,30 cm dan menyebabkan turunnya volume tanah sebesar 2,88% dari total keseluruhan volume tanah yang diuji. Hasil ini mengindikasikan bahwa tanah dengan kerapatan relatif 50% memiliki ketahanan yang lebih besar untuk

penurunan tanah, jika dibandingkan dengan kerapatan relatif tanah 25%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Berdasarkan hasil analisis gradasi pasir menurut Tsuchida (1970), tanah pasir Kali Opak Pleret dikategorikan sebagai tanah pasir paling berpotensi mengalami likuifaksi (*most liquefable soil*).
- Berdasarkan analisis gradasi butiran, tanah pasir Kali Opak Pleret terdeteksi sebagai tanah pasir dengan gradasi buruk, berdasarkan nilai koefisien gradasi (*coefficient of curvature*), (C_c) sebesar 1,63 dan koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*), (C_u) sebesar 2,44 yang mengindikasikan tanah pasir Kali Opak Pleret tersebut berpotensi mengalami likuifaksi.
- Berdasarkan hasil analisis potensi likuifaksi menggunakan alat *shaking table*, dapat diketahui bahwa kerapatan tanah pasir sangat mempengaruhi potensi likuifaksi. Tegangan air pori yang terjadi untuk kerapatan 25% dan 35% dapat melewati batas tegangan efektif yang menyebabkan tanah berpotensi likuifaksi, sedangkan untuk kerapatan 45% dan 55% tegangan air pori hanya dapat bergerak di bawah tegangan efektif dimana tanah tidak berpotensi likuifaksi.
- Kerapatan tanah pasir Kali Opak Pleret 25% dan 35% memiliki rasio tegangan air pori $r_u \geq 1$ yang dapat disimpulkan berpotensi likuifaksi, sebaliknya untuk kerapatan tanah pasir 45% dan 55% memiliki rasio tegangan air pori $r_u < 1$ yang menunjukkan bahwa untuk kerapatan tersebut tidak berpotensi likuifaksi. Semakin rendah kerapatan tanah pasir, semakin besar potensi likuifaksi dapat terjadi. Sebaliknya potensi likuifaksi akan berkurang secara signifikan seiring dengan semakin besar kerapatan tanahnya.
- Potensi penurunan muka tanah (*surface settlement*) akan semakin berkurang seiring dengan bertambah besarnya kerapatan relatif tanah.

Saran

Saran yang dapat diberikan melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Penelitian dengan metode pengujian *shaking table* dapat dilanjutkan dengan lokasi penelitian lainnya, khususnya disepanjang aliran Kali Opak.
- b) Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi kerapatan relatif tanah pada setiap lapisan tanah guna mengetahui pengaruhnya terhadap mekanisme dan potensi likuifaksi.
- c) Perlu dilakukan penelitian dengan variasi jenis tanah yang berbeda tiap lapisannya untuk mengetahui seberapa besar potensi likuifaksi yang mungkin terjadi.
- d) Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi durasi pembebanan dinamik untuk mengetahui potensi likuifaksi Kali Opak Pleret.
- e) Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi amplitudo dan frekuensi gempa untuk mengetahui potensi likuifaksi Kali Opak Pleret.
- f) Perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi ketinggian muka air tanah dan derajat kejenuhan tanah terhadap potensi likuifaksi Kali Opak Pleret.
- g) Perencanaan dan persiapan yang baik wajib dilakukan sebelum penelitian dimulai, guna menghindari kesalahan-kesalahan (*human error*) yang sangat mempengaruhi hasil penelitian secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

Adi, A.D., 2013, *Identifikasi Potensi Likuifaksi Tanah Untuk Penyiapan Pengembangan Lahan*, Proceeding 17th Annual Scientific Meeting, Indonesian Society For Geotechnical Engineering, pp. 211-216.

American Society for Testing Materials (ASTM), 2000, *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table (D 4253-00)*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, United States.

Barker, J.A., 1981, *Dictionary of Soil Mechanics and Foundation*

Engineering, Longman Group, United Kingdom.

Bolt, B.A., 1993, *Earthquakes*, W.H. Freeman and Company, USA.

Borgomeo, E., Di Capua, G., and Peppoloni, S., 2010, *An Overview of Earthquake Related Liquefaction Events in Italy*, Miscellanea INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma.

Boulanger, R.W., Kamai, R., and Ziotopoulou, K., 2013, *Liquefaction Induced Strength Loss and Deformation Simulation and Design*, Bulletin Earthquake Eng.

Cornforth, D.H., 2005, *Landslide in Practice: Investigation, Analysis and Remedial/Preventative Option in Soils*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Das, B.M., and Ramana, G.V., 2011, *Principles of Soil Dynamics, Second Edition*. Cengage Learning, Stamford, USA.

Day, R.W., 2002, *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York.

Elgamal, A. W., Dobry, R., and Adalier, K. (1989), *Study of Effects of Clay Layers on Liquefaction of Sand Deposits Using Small-Scale Models*, Proceedings 2nd US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, pp. 145-160.

Elnashai, A.S., and Di Sarno, L., 2008, *Fundamental of Earthquake Engineering*, A John Wiley and Sons, UK.

Fathani, T.F., Adi, A.D., Pramumijoyo, S., and Karnawati, D., 2008, *The Determination of Peak Ground Acceleration at Bantul Regency, Yogyakarta Province, Indonesia*, The Yogyakarta Earthquake 2006, hal. 12-1 - 12-15.

Ha, I.S, Olson, S.M., Seo, M.W., and Kim. M., 2011, *Evaluation Of Reliquefaction Resistance Using Shaking Table Tests*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering No. 31 pp. 682–691.

Harazika, H., Yasuhara, K., Hyodo, M., Karmokar, A.K., and Mitara, Y., 2008, *Mitigation Of Earthquake Induced*

- Geotechnical Disasters Using A Smart And Novel Geomaterial, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Cina.
- Ikhsan R., 2011, *Analisis Potensi Likuifaksi dari Data CPT dan SPT dengan Studi Kasus PLTU Ende Nusa Tenggara Timur*, Tugas Akhir, Fakultas Teknik, Program Studi Teknik, Universitas Indonesia.
- Ishihara, M., Okamura, M., and Ohshita, T., 2003, *Desaturating Sand Deposit by Air Injection for Reducing Liquefaction Potential*, 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering.
- Japan Society of Civil Engineers, 2007, *Instructions For Geotechnical Investigation and The Practical Utilization of its Results For Recovery and Reconstruction of Nias Island and For Disaster Prevention of North Sumatra and West Sumatra Province*.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Lopez, F.J., 2002, *Does Liquefaction Protect Overlying Structure From Ground Shaking*, Dissertation, Earthquake Engineering, Instituto Unversitario di Studi Superiori di Pavia.
- Mase, L.Z. 2013, *Analisis Potensi Likuifaksi Di Kali Opak Imogiri Daerah Istimewa Yogyakarta (Studi Eksperimental Dan Analisis Empiris)*, Tesis, Jurusan Teknik Sipil (Geoteknik) dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.
- Michigan Department of Transportation, 2009, *Uniform Field Soil Classification System (Modified Unified Description)*.
- New York Department of Transportation, 2007, *Geotechnical Design Procedure: Liquefaction Potential Of Cohesionless Soils*, Geotechnical Engineering Bureau.
- Özener, P.T., Özaydın, K., and Berilgen, M.M., 2009, *Investigation of Liquefaction and Pore Water Pressure Development in Layered Sands*, Journal Bulletin Earthquake Eng. No. 7, pp. 199–219.
- Prakash, S., 1981, *Soil Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, United States of America.
- Prakash, S., and Puri, V.K., 2003, *Liquefaction of Silts and Silt-Clay Mixtures*, Taiwan Workshop on Liquefaction.
- Pusat Mitigasi Bencana, 2005, *Laporan Kajian Awal Dan Survey Rekonesans Pasca Gempa bumi Nias 28 Maret 2005*, Lembaga Penelitian Dan Pemberdayaan Masyarakat, Institut Teknologi Bandung.
- SNI 1726-2012, 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*, Badan Standardisasi Nasional.
- Tsuchida, H., 1970, *Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits*, Abstract of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Yokosuka, Japan, pp. 3.1 - 3.33.
- Yogatama, B.A., 2012, *Analisis Potensi Likuifaksi di Kawasan Kabupaten Bantul dan Kota Yogyakarta*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.
- Zhang, J.M., and Wang, G., 2012, *Large Post-Liquefaction Deformation Of Sand, Part I: Physical Mechanism, Constitutive Description And Numerical Algorithm*, Journal Acta Geotechnica, No. 7, pp: 69–113.