

PERILAKU PARTIKEL BERPORI AKIBAT BEBAN SIKLIK *Behavior of Porous Particles Due to Cyclic Load*

Muhajirah*

*Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram, Jl Majapahit 62 Mataram
Email : muhajirah@unram.ac.id

Abstrak

Fenomena likuifaksi biasanya terjadi sesaat dan setelah gempa bumi. Gelombang seismik merambat melalui tanah dan menggerakkan partikel tanah jenuh. Akibat pergerakan ini, tekanan air pori mengalami peningkatan. Saat peningkatan tekanan air pori mencapai tekanan overburden, selanjutnya tanah akan kehilangan kekuatan gesernya dan berperilaku sebagai *viscous liquid*. Penelitian ini bertujuan mengetahui perilaku partikel berpori saat menerima beban seismik. Pengujian dilakukan dengan alat *shaking table*. Ada dua amplitudo beban siklik yang digunakan: 0,35g durasi 7 detik dan 0,38g durasi 20 detik. Untuk membuat model uji digunakan metode *dry pluviation* dengan kerapatan relatif 30%. Hasil uji *shaking table* menunjukkan bahwa fenomena likuifaksi tidak terjadi pada aplikasi kedua beban siklik. Akibat beban siklik, partikel *pumice* mengalami degradasi.

Kata kunci : *Pumice, Likuifaksi, Shaking table, Siklik.*

PENDAHULUAN

Beberapa peristiwa gempa bumi yang pernah terjadi di Indonesia mengakibatkan likuifaksi, diantaranya gempa bumi Yogyakarta (2006), gempa bumi Padang (2009), gempa bumi Lombok (2018) dan gempa bumi Palu (2018). Likuifaksi adalah suatu proses dimana sedimen yang berada di bawah muka air tanah tiba-tiba kehilangan kekuatannya dan berperilaku sebagai *viscous liquid*. Saat terjadi gempa bumi, gelombang seismik yang merambat melalui lapisan granuler jenuh akan menggerakkan partikel tanah dan menyebabkan kontak antar partikel tanah berkurang. Tekanan air pori di antara partikel tanah akan meningkat jika air pori tidak terdisipasi. Jika tekanan air pori meningkat hingga mencapai level tekanan overburden, lapisan granuler spontan akan berperilaku lebih menyerupai *viscous liquid* dibandingkan dengan material padat. Pada kondisi ini likuifaksi telah terjadi.

Beberapa faktor dapat berpengaruh pada kerentanan likuifaksi tanah. Berdasarkan penyelidikan lapangan dan hasil uji laboratorium, karakteristik likuifaksi pada tanah kurang kohesif dipengaruhi oleh: distribusi ukuran butiran dan tipe tanah, kerapatan relatif, tegangan efektif vertikal dan overkonsolidasi, umur tanah dan sumber tanah, derajat kejenuhan, dan ketebalan lapisan permukaan (*Geotechnical Design Procedure*, 2015). Bentuk partikel tanah juga berpengaruh pada potensi likuifaksi. Partikel tanah berbentuk *rounded* cenderung lebih mudah memadat dibandingkan partikel tanah yang berbentuk *angular*. Oleh karena itu, tanah dengan partikel berbentuk *rounded* lebih rentan terhadap likuifaksi dibandingkan dengan partikel tanah berbentuk *angular*.

Pada umumnya, penelitian pendahuluan terhadap fenomena likuifaksi berfokus pada distribusi ukuran butiran dan tipe tanah seperti kerikil, pasir dan jumlah kandungan lempung. Setelah peristiwa gempa bumi Hyogen-Nanbu (Kobe) Jepang tahun 1995 dan gempa bumi Canterbury New Zealand tahun 2010 hingga 2011, penelitian mengenai pengaruh partikel berpori terhadap potensi likuifaksi mulai dilakukan. Di Indonesia, penelitian terhadap likuifaksi gencar dilakukan pasca gempa bumi Yogyakarta tahun 2006.

Dibandingkan dengan gempa bumi Yogyakarta (2006), gempa bumi Padang (2009) dan gempa bumi Lombok (2018), fenomena likuifaksi yang terjadi saat gempa bumi Palu tahun 2018 sangat dahsyat. Pada tiga lokasi gempa bumi pertama, fenomena likuifaksi yang terjadi adalah lateral spreading, penurunan permukaan tanah dan sand boil. Namun saat gempa bumi Palu (2018), fenomena likuifaksi merupakan pergerakan dan perpindahan massa tanah dalam jumlah besar di dua desa yaitu desa Petobo dan desa Ballaroa. Dari empat lokasi ini, berdasarkan peta geologi, Yogyakarta dan Pulau Lombok terbentuk dari endapan vulkanik gunung berapi. Endapan vulkanik di Yogyakarta berasal dari erupsi gunung Merapi, sedangkan endapan vulkanik di Pulau Lombok berasal dari erupsi gunung Rinjani. Berdasarkan hasil penelitian Muhajirah, dkk. (2014), sebagian besar partikel tanah di Pulau Lombok merupakan partikel berpori yang dikenal sebagai pumice atau batu apung. Berbeda dengan endapan vulkanik di Pulau Lombok, endapan vulkanik di Yogyakarta merupakan partikel yang tidak berpori (Mase, 2017).

Untuk memahami fenomena likuifaksi yang pernah terjadi di Yogyakarta, Kusumawardani, et al. (2014) dan Mase (2017) melakukan penelitian dengan menggunakan pasir dari lokasi terdampak likuifaksi. Menurut Kusumawardani, clean sand dengan kerapatan relatif 25% dapat terlikuifaksi pada frekuensi beban 0,1 Hz. Mase menjelaskan bahwa pada kerapatan relatif lapangan (28,40%), pasir Kali Opak dapat terlikuifaksi pada percepatan gempa paling sedikit 0,3g. Foto SEM memperlihatkan partikel pasir yang digunakan oleh Mase (2017) merupakan partikel padat dan tidak memiliki pori dipermukaannya.

Pada pemodelan likuifaksi di laboratorium, gempa bumi sering dimodelkan dengan beban siklik atau beban harmonik. Menurut Ishihara, amplitudo akibat beban siklik sama dengan 65% dari tegangan geser maksimum akibat gempa bumi aktual. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui respon partikel berpori terhadap beban siklik. Pengujian dilakukan pada *pumice* atau batu apung berukuran pasir dengan menggunakan alat uji *shaking table*. Beban siklik yang digunakan berasal dari *time history* gelombang sinus. Amplitudo percepatan mewakili gempa maksimum yang berpotensi terjadi di Yogyakarta dan Pulau Lombok berdasarkan SNI 1726 tahun 2012.

TINJAUAN PUSTAKA

Definisi pumice

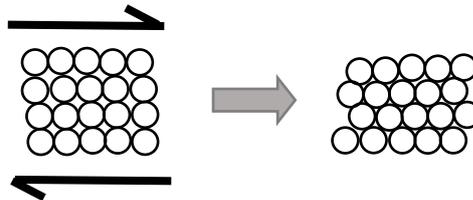
Menurut Wesley (2010), pumice merupakan tanah residual yang tidak keras. Material ini adalah tanah vulkanik, memiliki sifat-sifat yang tidak biasa dan merupakan produk dari erupsi rhyolitic. Karakteristik material pumice dapat dilihat dari bentuk partikelnya; setiap partikel mengandung jaringan lubang-lubang halus yang rapat, beberapa diantaranya saling berhubungan dan terbuka ke permukaan, sedangkan yang lainnya terisolasi secara keseluruhan di bagian dalam partikel (Gambar 1). Partikel pumice memiliki berat rendah, permukaannya sangat kasar dan mudah hancur, terutama jika dibandingkan dengan pasir berbutir keras yang tidak normal seperti pasir kuarsa.



Gambar 1. Rongga-rongga di dalam partikel pumice: 1. Material padat, 2. Rongga luar 3. Rongga dalam (Esposito and Guadango, 1998)

Mekanisme likuifaksi

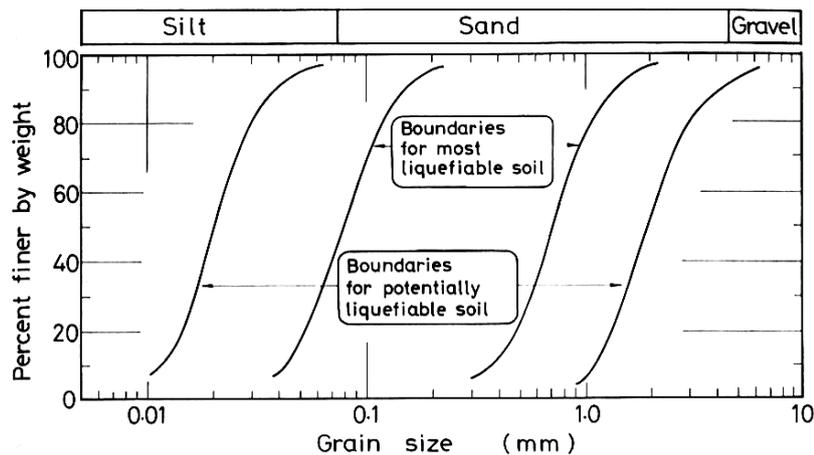
Uji laboratorium yang dilakukan pada sampel tanah memperlihatkan bahwa beban siklik menyebabkan partikel tanah berubah susunannya menjadi lebih memadat. Pemadatan tidak dapat terjadi jika tanah dalam kondisi jenuh dengan fluida yang tidak mampu mampat, karena fluida akan mencegah partikel tanah untuk bergerak atau berpindah posisinya. Gambar 2 memperlihatkan perubahan posisi partikel tanah akibat beban siklik. Saat terjadi pembebanan siklik, beban gravitasi akan ditransfer dari partikel tanah ke air pori. Pada kondisi ini, berkurangnya tegangan efektif mengakibatkan meningkatnya tekanan air pori. Oleh karena kekuatan dan kekakuan tanah berbanding lurus dengan tegangan efektif maka kemampuan tanah untuk menahan beban akan berkurang.



Gambar 2. Mekanisme pemadatan akibat beban siklik

Pengujian memperlihatkan bahwa tanah granuler jenuh (seperti beberapa lanau, pasir dan bahkan kerikil) paling rentan terhadap peningkatan tekanan air pori. Kandungan partikel halus yang lebih besar, kurang rentan terhadap peningkatan tekanan air pori karena plastisitas lempung atau butiran halus lainnya mencegah partikel untuk merubah susunannya. Material kasar memberikan kemudahan bagi tekanan pori untuk terdisipasi sehingga mencegah tekanan air pori membesar.

Tsucida pada tahun 1970 merangkum hasil dari analisa saringan yang dilakukan pada beberapa tanah endapan alluvial dan diluvial yang diketahui mengalami dan tidak mengalami likuifaksi selama terjadi gempa bumi. Selanjutnya Tsucida (1970) mengusulkan suatu kurva yang berhubungan dengan rentang ukuran butir dari tanah yang dapat dan tidak dapat mengalami likuifaksi seperti yang terlihat pada Gambar 3. Menurut Tsucida (1970), daerah yang berada di antara dua kurva yang lebih dalam pada gambar mewakili pasir dan pasir lanauan, yang menggambarkan tanah dengan tahanan likuifaksi paling rendah. Suatu tanah dengan kurva gradasi yang berada pada zona antara kurva yang terluar dan kurva terdalam adalah tanah yang kurang mengalami likuifaksi.



Gambar 3. Batas-batas kurva gradasi yang memisahkan tanah yang dapat dan tidak dapat terlikuifaksi (Tsuchida, 1970)

Salah satu faktor yang mempengaruhi laju peningkatan tekanan air pori pada tanah kurang kohesif adalah kepadatan relatif tanah dan besar regangan siklik. Pada pasir lepas, tekanan air pori meningkat cepat sehingga tanah dapat kehilangan tahanan geser awalnya. Pada pasir padat, tekanan air pori meningkat dengan laju yang lebih lambat, bahkan saat regangan akibat beban siklik dan regangan permanen berkembang, tanah masih dapat mempertahankan tahanan gesernya. Peningkatan tekanan air pori pada tanah jenuh juga dipengaruhi oleh amplitudo beban siklik. Beberapa penulis memperlihatkan bahwa terdapat ambang bawah regangan geser yang tidak menyebabkan densifikasi.

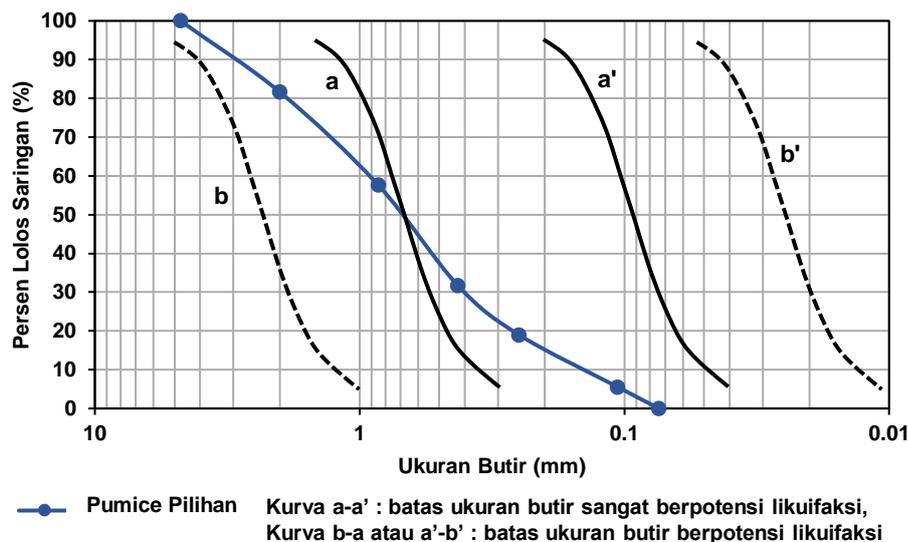
Pada tanah yang rentan mengalami peningkatan tekanan pori akibat beban siklik, tekanan air pori akan meningkat pada setiap siklus hingga nilai tekanan air pori mendekati atau sama dengan tegangan total yang bekerja pada tanah, tegangan efektif mendekati atau sama dengan nol. Saat kondisi ini pertama kali dicapai disebut initial liquefaction (Ishihara, 1996).

METODE PENELITIAN

Untuk memahami perilaku partikel pumice, beberapa uji pendahuluan dilakukan sebelum uji shaking table. Uji pendahuluan meliputi uji sifat fisik dan uji permeabilitas pumice. Foto SEM (Scanning Electron Microscope) dilakukan untuk mengetahui struktur rongga atau pori yang terdapat pada partikel pumice. Pumice sangat rapuh dalam kondisi basah. Untuk mengetahui tingkat degradasi pumice akibat beban siklik, analisis saringan dilakukan sebelum dan sesudah uji shaking table.

Bahan uji

Material pumice yang digunakan berasal dari Desa Kebon Talo Kecamatan Ampenan Utara Kota Mataram. Untuk mencapai tujuan penelitian, partikel pumice dirancang untuk berada pada zona berpotensi likuifaksi berdasarkan kurva gradasi Tsuchida (1970). Pada Gambar 1, distribusi ukuran butir pumice berada pada zona berpotensi likuifaksi hingga paling berpotensi likuifaksi (kurva b – a').



Gambar 4. Distribusi ukuran butir *pumice* yang digunakan pada penelitian, serta zona potensi likuifaksi berdasarkan kurva Tsucida 1970

Alat yang digunakan

1) Meja getar

Meja getar (*shake table*) yang digunakan merupakan meja getar tipe R-141 yang diproduksi oleh ANCO Engineers (boulder, Colorado, USA). Meja getar mempunyai berat kotor 1608,5 kg dimana bagian atas meja getar terbuat dari baja dengan dimensi 1,5 m x 1,5 m.

2) Alat *pluviator*

Metode yang digunakan untuk persiapan sampel tanah adalah *dry pluviation*. Prinsip metode ini adalah bahwa kerapatan relatif (D_r) sampel bergantung pada kecepatan jatuh dari partikel pasir atau jarak tinggi jatuh partikel, serta lubang bukaan penyaring. Alat *pluviator* didesain sehingga alat bisa keluar-masuk ke/dari dalam kotak sampel. Dimensi alas *pluviator* 0,34 m x 0,34 m, terdiri dari dua wadah penyaring dengan diameter lubang bukaan 10 mm, sedangkan jarak antar wadah penyaring 0,50 m. Pada jarak 0,40 m dari dasar *pluviator* terdapat bukaan yang terbuat dari plat besi berfungsi sebagai pintu untuk melewatkan pasir atau *pumice* kering.

3) Kotak sampel

Kotak sampel dibuat dari bahan *acrylic* dengan tebal 5 mm. Dimensi kotak sampel 0,40 m x 0,40 m x 0,65 m (panjang x lebar x tinggi), sedangkan tinggi sampel tanah 0,50 m. Pada dua sisi kotak sampel searah pergerakan meja getar, dibuat masing-masing tiga lubang sebagai tempat untuk memasang pipa air untuk penjenjuran dan tempat memasang alat pengukur tekanan air pori (*pore pressure transducer*).

4) Alat pembaca tekanan air pori

Alat pembacaan tekanan air pori yang digunakan adalah *pressure transducer*. *Pressure transducer* dipasang pada jarak 0,10 m, 0,25 m dan 0,40 m dari dasar kotak sampel. *Pressure transducer* dihubungkan dengan alat akuisisi data dan selanjutnya dihubungkan dengan laptop. Alat akuisisi data (*data acquisition*) yang digunakan adalah *data logger geodatalog series 6000*.

Prosedur uji *shaking table*

1) Persiapan model uji

Beberapa uji pendahuluan dilakukan untuk menentukan posisi pluviator sehingga diperoleh kerapatan relatif 30%. Untuk tujuan ini posisi dasar pluviator diusahakan berada pada jarak 0,40 m dari elevasi material yang akan dicurahkan. Material kering dibagi menjadi lima kantung untuk memperoleh kerapatan yang merata. Satu per satu kantung berisi pasir dimasukkan ke dalam kotak sampel dengan menggunakan metode *dry pluviation*.

2) Penjenuhan

Proses penjenuhan dilakukan dengan memasukkan air dari sisi kotak sampel. Ada tiga pipa kecil yang digunakan untuk menyalurkan air, masing-masing kran air berada pada jarak: 0,10 m, 0,25 m dan 0,40 m dari dasar kotak sampel.

3) Uji *shaking table*

Pada penelitian ini, beban siklik diaplikasikan untuk menghasilkan efek gempa bumi pada sampel tanah. Ada dua *input motion* yang digunakan: *time history* pertama adalah amplitudo percepatan sebesar 0,35g durasi 7 detik dan yang kedua 0,38g durasi 20 detik.

Peningkatan kelebihan tekanan air pori direkam oleh tiga *Pore Pressure Transducer* (PPT) yaitu pada PPT Atas (0,10 m dari dasar kotak), PPT Tengah (0,25 m dari dasar kotak) dan PPT Bawah (0,40m dari dasar kotak).

Nilai peningkatan tekanan air pori yang terekam oleh *transducer* harus dikalibrasi sesuai dengan nilai yang digunakan saat kalibrasi *transducer* dan *data logger*. Nilai tekanan air pori pada setiap *transducer* dan nilai rasio kelebihan tekanan air pori dihitung menggunakan *Excell 2013*. Gambar 2 memperlihatkan rangkaian alat uji *shaking table* yang digunakan pada penelitian.



Gambar 5. Alat *shaking table* di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik UGM

HASIL DAN PEMBAHASAN

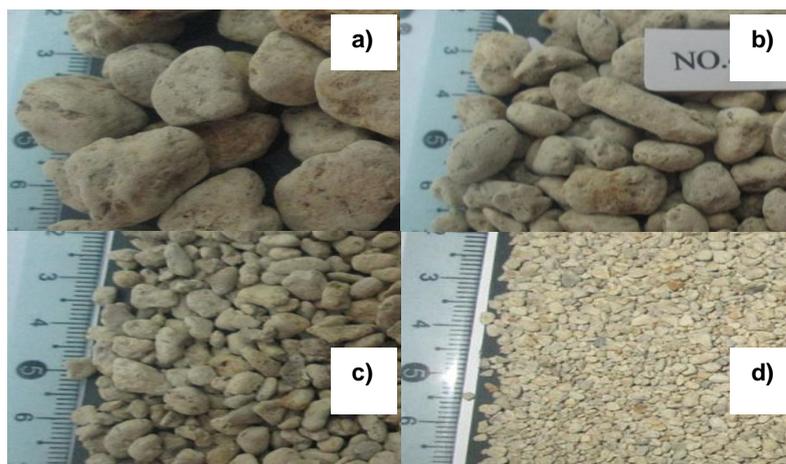
Hasil uji pendahuluan

Tabel 1 memperlihatkan sifat fisik partikel pumice. Hal unik yang dapat diketahui dari tabel tersebut adalah mengenai berat volume kering yang dimiliki pumice sebesar $0,54 \text{ gr/cm}^3$. Angka pori pumice (3,22) lebih besar dari angka pori pasir pada umumnya, hal ini menandakan bahwa rendahnya nilai berat volume kering pumice disebabkan oleh banyaknya rongga yang terdapat pada partikel pumice. Berat jenis pumice (2,28) tidak terlalu besar, hal ini diperkuat oleh kenyataan bahwa hanya sedikit saja butiran pumice yang dapat mengapung.

Tabel 1. Sifat fisik pumice

No.	Sifat fisik	Pumice
1.	Berat jenis tanah, G_s	2,28
2.	Kadar air tanah, w	(%) 114,37
3.	Analisa gradasi	
	• Kerikil	(%) 22,23
	• Pasir	(%) 69,75
	• Lanau dan lempung	(%) 8,02
	• D_{50}	(mm) 1,2
	• Koefisien keseragaman, C_u	23,53
	• Koefisien gradasi, C_c	0,32
4.	Klasifikasi tanah menurut USCS	SP-SM
5.	Berat isi tanah kering, γ_d	(gr/cm^3) 0,54
6.	Berat isi tanah basah, γ_h	(gr/cm^3) 1,16
7.	Angka pori, e	3,22

Klasifikasi *pumice* berdasarkan sistem USCS (*Unified Soil Classification System*) adalah SP-SM yaitu pasir bergradasi buruk dengan lanau dan kerikil (*well-graded sand with silt and gravel*). Menurut deskripsi yang digambarkan oleh Mitchell (1976), bentuk partikel pasir pumice adalah subrounded hingga subangular seperti yang terlihat pada Gambar 3.

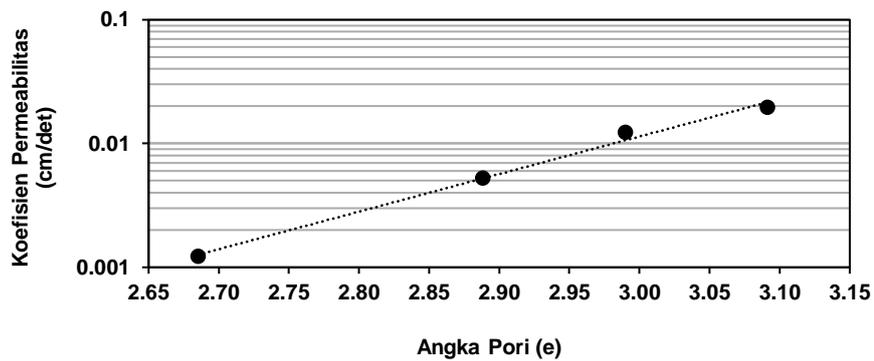


Gambar 6. Bentuk partikel *pumice* dengan diameter butiran yang berbeda: a) $9,52 < D < 19 \text{ mm}$, b) $4,75 < D < 9,52 \text{ mm}$, c) $2,00 < D < 4,75 \text{ mm}$, d) $0,85 < D < 4,75 \text{ mm}$

Menurut Zhang (2001), kerentanan likuifaksi tanah dipengaruhi oleh permeabilitas tanah. Tanah dengan permeabilitas tinggi dapat mencegah akumulasi peningkatan tekanan air pori dan likuifaksi. Permeabilitas tanah bergantung pada kerapatan relatif (D_r) tanah atau angka pori tanah (e). Pumice memiliki berat volume kering yang rendah seperti yang terlihat pada Tabel 1. Hal ini disebabkan

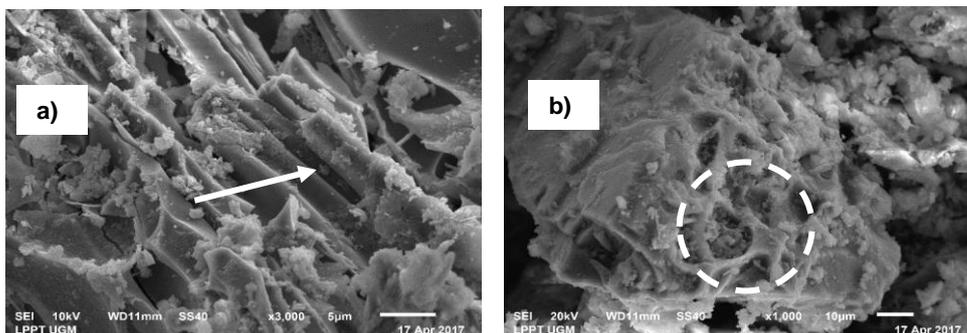
banyaknya rongga yang terdapat di dalam partikel pumice. Untuk mengetahui pengaruh kerapatan relatif terhadap permeabilitas pumice, uji permeabilitas Constant head dilakukan pada empat sampel pumice dengan kerapatan relatif yang berbeda ($D_r = 40\%, 50\%, 60\%$ dan 80%).

Hasil uji permeabilitas untuk empat kerapatan relatif yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar ini, kerapatan relatif (D_r) diwakili oleh angka pori (e) sampel, semakin besar angka pori sampel maka semakin besar juga permeabilitasnya (k). Menurut Lambe dan Whitman (1969), permeabilitas sampel pumice untuk rentang angka pori ini berada pada kategori permeabilitas sedang atau *medium permeability* (10^{-3} hingga 10^{-1} cm/det). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun partikel pumice memiliki banyak rongga, namun air tidak mudah melewati semua rongga yang berada di dalam partikel pumice.



Gambar 7. Pengaruh angka pori (e) terhadap permeabilitas pumice

Untuk foto SEM pumice, partikel yang digunakan adalah material yang tertahan saringan No. 10 (diameter butir $2,00 < D < 4,75$ mm) dan material tertahan saringan No. 200 (diameter butir $0,074 < D < 0,106$ mm). Hasil foto SEM pumice dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar 5a memperlihatkan adanya rongga di dalam partikel pumice, rongga tersebut terlihat seperti saluran memanjang (tanda panah) dan terdapat pula rongga yang tidak terhubung dengan rongga-rongga lainnya (rongga yang terisolasi). Gambar 5b memperlihatkan suatu bentuk partikel yang merupakan hasil pecahan butiran pumice yang berukuran lebih besar, dan adanya kawah-kawah kecil yang merupakan ujung dari rongga terisolasi (lingkaran putih putus-putus).



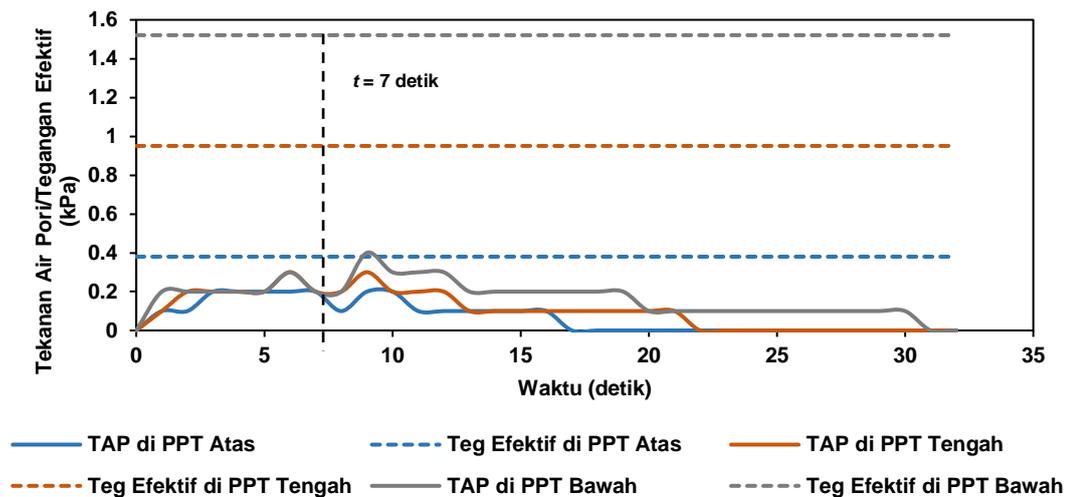
Gambar 8. Foto SEM partikel pumice: a) partikel tertahan saringan No. 10 dan perbesaran 3000x, b) partikel tertahan saringan No. 200 dan perbesaran 1000x.

Hasil uji shaking table

Gambar 6 memperlihatkan peningkatan tekanan air pori pada model uji pumice. Sesaat setelah uji dimulai, PPT Bawah merekam peningkatan tekanan air pori sebesar 0,2 kPa, selanjutnya disusul oleh

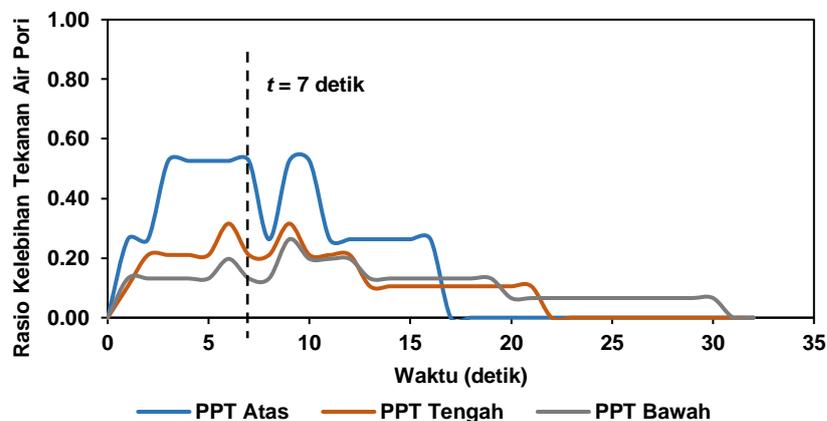
PPT Tengah dan PPT Atas dengan nilai tekanan air pori yang sama. PPT Atas relatif stabil merekan nilai tekanan air pada posisi ini hingga terdispasi setelah durasi pengujian berakhir. Selanjutnya tekanan air pori meningkat lagi selama 2 detik, kemudian turun pada nilai 0,1 kPa dan 0 kPa pada $t = 17$ detik hingga akhir pengukuran.

PPT Tengah merekam kenaikan tekanan air pori sebesar 0,3 kPa pada $t = 6$ detik dan $t = 9$ detik, selanjutnya terdispasi setelah $t = 13$ detik. Pada $t = 22$ detik dari awal pengujian, tekanan air pori berkurang menjadi 0 kPa hingga akhir pengukuran. PPT Bawah merekam peningkatan tekanan air pori maksimum sebesar 0,4 kPa pada $t = 9$ detik atau 2 detik setelah durasi pengujian berakhir, terdispasi setelah $t = 20$ detik, dan kembali ke 0 kPa setelah $t = 31$ detik.



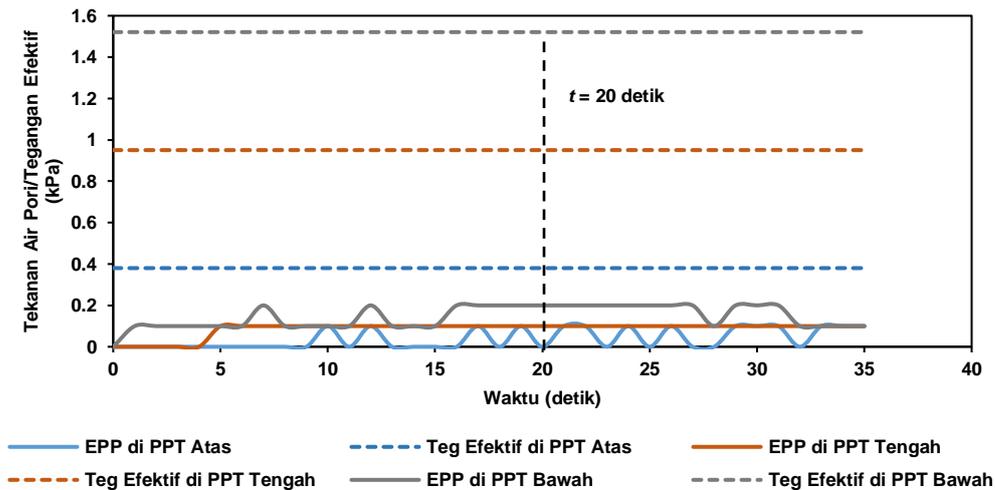
Gambar 6. Peningkatan tekanan air pori pada model uji *pumice* ($D_r = 30\%$, $a_{maks} = 0,35g$ durasi 7 detik)

Pada Gambar 6, tekanan air pori maksimum yang direkam oleh ketiga *transducer* belum mencapai nilai tegangan efektif pada masing-masing kedalaman dimana *transducer* ditempatkan. Nilai tegangan efektif untuk PPT Atas, PPT Tengah dan PPT Bawah adalah 0,38 kPa, 0,95 kPa dan 1,52 kPa. Hal yang sama juga terlihat dari Gambar 7, nilai rasio kelebihan tekanan air pori pada level ketiga *transducer* belum ada yang mencapai angka satu. Rasio kelebihan tekanan air pori maksimum diperoleh pada PPT Atas sebesar 0,53. Berdasarkan Gambar 6 dan 7, hasil analisa rekaman tekanan air pori pada ketiga *transducer* belum memperlihatkan fenomena likuifaksi

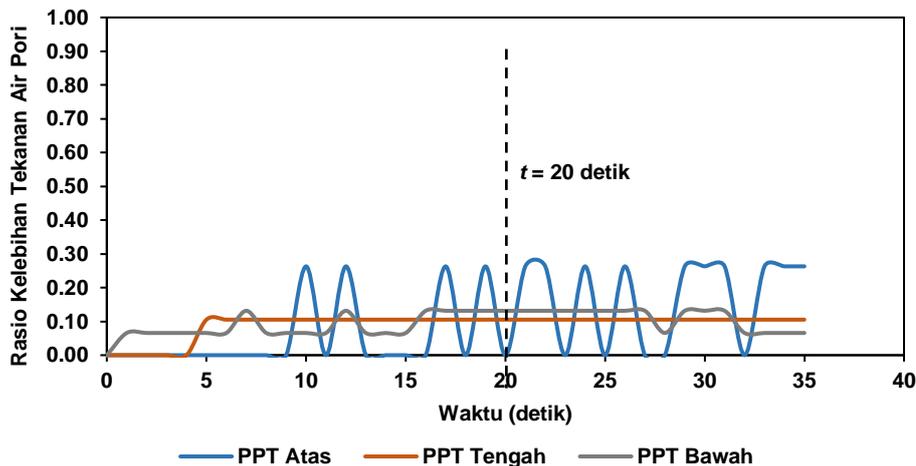


Gambar 7. Rasio kelebihan tekanan air pori pada model uji *pumice* ($D_r = 30\%$ dan $a_{maks} = 0,35g$ durasi 7 detik)

Gambar 8 memperlihatkan rekaman peningkatan kelebihan tekanan air pori *pumice* yang diuji *shaking* pada percepatan 0,38g durasi 20 detik. Dari gambar ini, peningkatan kelebihan tekanan air pori tidak terlalu signifikan. Peningkatan tekanan air pori maksimum pada PPT Atas dan PPT Tengah hanya sampai pada 0,10 kPa, sedangkan PPT Bawah merekan peningkatan tekanan air pori maksimum sampai pada 0,20 kPa. Kondisi likuifaksi tidak terekam pada model uji ini, tekanan air pori maksimum ketiga *transducer* tidak mencapai tegangan efektif di setiap level kedalaman *transducer* ditempatkan. Tegangan efektif PPT Atas, PPT Tengah dan PPT Bawah adalah 0,38 kPa, 0,95 kPa dan 1,52 kPa. Gambar 9 juga menjelaskan kondisi bahwa likuifaksi tidak terjadi pada model uji ini. Rasio kelebihan tekanan air pori (r_u) maksimum hanya sampai pada nilai 0,26 yang terjadi pada PPT Atas.



Gambar 8. Peningkatan tekanan air pori pada model uji *pumice* ($D_r = 30\%$ dan $a_{maks} = 0,38g$ durasi 20 detik)

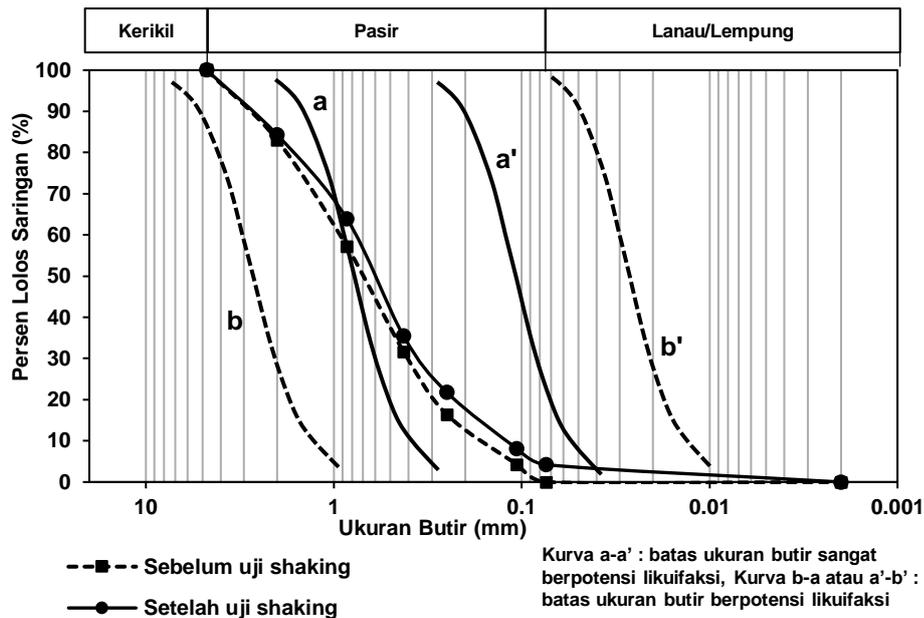


Gambar 9. Rasio kelebihan tekanan air pori pada model uji *pumice* ($D_r = 30\%$ dan $a_{maks} = 0,38g$ durasi 20 detik)

Degradasi pumice

Hasil analisis saringan sebelum dan sesudah uji *shaking* table dapat dilihat pada Gambar 10. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat adanya peningkatan dan pengurangan persentase jumlah partikel sesuai dengan diameter lubang saringannya. Rentang ukuran partikel 0,425 mm – 0,85 mm,

0,106 mm – 0,25 mm dan partikel berukuran lebih kecil dari 0,074 mm masing-masing mengalami peningkatan sebesar 3,0%, 1,5% dan 4,2%. Rentang ukuran partikel: 2,00 mm – 4,75 mm, 0,85 mm – 2,00 mm, 0,25 mm – 0,425 mm dan 0,074 – 0,106 mm masing-masing mengalami penurunan sebesar: 1,3%, 5,5%, 1,6% dan 0,4%. Peningkatan persentase jumlah partikel pada rentang ukuran tertentu menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan bentuk partikel pada partikel yang berukuran lebih besar dari rentang partikel yang ditinjau, sedangkan penurunan persentase jumlah partikel untuk rentang tertentu menunjukkan adanya perubahan bentuk partikel pada rentang tersebut menjadi partikel berukuran lebih kecil.



Gambar 10. Perubahan gradasi pada model uji pumice

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

1. Berat volume kering pumice lebih rendah dari berat volume kering pasir pada umumnya, yaitu 0,54 gr/cm³. Hasil ini diperkuat oleh angka pori yang besar (3,22) dan foto SEM yang menunjukkan adanya rongga pada partikel pumice.
2. Nilai koefisien permeabilitas pumice menunjukkan partikel tanah ini termasuk kategori permeabilitas sedang.
3. Apalikasi kedua beban siklik pada uji shaking table menunjukkan bahwa pumice tidak mudah mengalami likuifaksi. Nilai rasio kelebihan tekanan air maksimum pada amplitude 0,35g adalah 0,53 sedangkan pada amplitude 0,38g diperoleh nilai 0,26.
4. Perubahan kurva gradasi sebelum dan sesudah uji shaking table menunjukkan bahwa partikel pumice mengalami degradasi akibat beban siklik.

Saran

Untuk penelitian berikutnya, gradasi pumice yang digunakan sebaiknya berada pada zona paling berpotensi likuifaksi. Pada uji shaking table, sebaiknya menggunakan time history gempa yang pernah terjadi seperti gempa bumi Loma Prieta (1989) atau Kobe (1995).

DAFTAR PUSTAKA

- Geotechnical Design Procedure GDP-9. (2015). Liquefaction Potential of Cohesionless Soils, Revision #3, Geotechnical Engineering Bureau, Department of Transportation. State of New York. August 2015.
- Hakam, A. (2012). Soil Liquefaction in Padang due to Padang Earthquake 30 September 2009. *Civil Engineering Dimension*, 14(2), 64-68, ISSN 1410-9530 print / ISSN 1979-570X online.
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnical*. Oxford University Press Inc. New York.
- Ishihara, K. (2006). Liquefaction of Subsurface Soils during Earthquake. *Journal of Disaster Research*, 1(2).
- Kusumawardani, R, Suryolelono, K.,B, Suhendro, B, dan Rifa'i, A. (2014). The Loading Frequency Effects of Yogyakarta's sand Under Cyclic Triaxial Testing *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, IJCEE-IJENS, 14(02): 7-12.
- Liu, L, Orense, R., P, and Pender, M., J. (2015). Crushing-induced Liquefaction Characteristics of Pumice Sand. *NZSEE Conference*.
- Marks, S, Larkin, T., J, and Pender, M., J. (1998). The Dynamic Properties of A Pumiceous Sand. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 31(2), 86-102.
- Mase, L., Z. (2017). Experimental Liquefaction Study of Southern Yogyakarta Using Shaking Table. *Jurnal Teknik Sipil*, 24(1), 11-18
- Muhajirah, Prabowo, A, dan Ashari, I. (2013). Evaluasi Awal Potensi Likuifaksi di Kota Mataram. Lembaga Penelitian Universitas Mataram, DIPA Universitas Mataram Tahun Anggaran 2013 No. 023.04.2.415278/2013.
- Muhajirah, Prabowo, A, dan Ashari, I. (2014), Evaluasi Awal Potensi Likuifaksi di Kota Mataram. Lembaga Penelitian Universitas Mataram, DIPA Universitas Mataram Tahun Anggaran 2014 No. 216X/SPP-AUPT-BOPTN/H18.12/PL/2014.
- Muntohar, A., S. (2014). Research on Earthquake Induced Liquefaction in Padang City and Yogyakarta Areas. *Jurnal Geoteknik HATTI IX*, 1(2014), 1-9, ISSN 0853 – 4810.
- Orense, R., P, Pender, M., J, and O'Sullivan, A., S. (2012). Liquefaction Characteristics of Pumice Sands. *EQC Project 10/589*. March 2012.
- Orense, R., P, Asadi, M., S, Rouholamin, M, and Bhattacharya, S. (2017). Comparison of The Post-liquefaction Behaviour of Hard-grained and Crushable Pumice Sands. *Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium*. Eds. GJ Alexander & CY Chin. Napier.
- Prasad, S., K, Towhata, I, Chandradhara, Nanjundaswamy, P. (2004). Shaking Table Tests in Earthquake Geotechnical Engineering, Special Section: Geotechnics and Earthquake Hazards, *CURRENT SCIENCE*, 87(10), 1398-1404.
- Soebowo, E, Tohari, A, dan Sarah, D. (2007). Studi Potensi Likuifaksi di Daerah Zona Patahan Opak Patalan-Bantul Jogjakarta. *Prosiding Seminar Geoteknologi Kontribusi Ilmu Kebumihan Dalam Pembangunan Berkelanjutan*, Bandung, 3 Desember 2007.
- Wesley, L., D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. John Wiley & Sons. Inc.