

# ANALISIS KENAIKAN TEKANAN AIR PORI CLEAN SAND MENGUNAKAN METODE CYCLIC SHEAR-STRAIN CONTROLLED

Rini Kusumawardani, Lashari, Untoro Nugroho, Hanggoro Tri Cahyo A.

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)  
Gedung E4, Kampus Sekaran Gunungpati Semarang 50229, Telp. (024) 8508102. Email: rini.kusumawardani@gmail.com

**Abstract :** *Liquefaction phenomenon could be analysed using strain-controlled loading method where informations about sands pore water pressure build-up were presented. Maintaining small deformation values whenever the soil was subjected to cyclic loading, this non-destructive method presents clearly the information about the increasing sands pore water pressure. It is concluded that liquefaction occurs whenever the pore water pressure reaches the same value with the soil effective stress ( $\sigma'_v$ ). Strain-controlled loading method introduces a fundamental parameter for undrained cyclic loading tests on fully saturated sands: shear strain treshhold ( $\gamma_t$ ). This parameter divides the pore water pressure into two distinct zones, namely the constant pore water pressure and the increasing one. When cyclic shear strain amplitude ( $\gamma$ ) is set up lesser than  $\gamma_t$  then pore water pressure stays constant. Contrastly, a larger set up of  $\gamma$  than  $\gamma_t$  results the increasing pore water pressure. Laboratory test on clean sand using relative density ( $D_r$ ) 25%, 60 % and 80%, with effective pressure  $\sigma'_v = 100$  kPa and frequency ( $f$ ) applied 0.05 Hz and 0.1 Hz, shows that  $\gamma_t = 1,5 \cdot 10^{-2}$  %. Whilst other test using  $D_r = 60\%$  and  $f = 0.1$  Hz confirms that  $\gamma_t = 1,5 \cdot 10^{-2}$  % ( $50 \sigma'_v$  (kPa)  $100$ ) and  $\gamma_t = 5 \cdot 10^{-2}$  % ( $\sigma'_v = 200$ kPa). Last test using  $D_r = 60\%$  and  $f = 0.05$  Hz reveals  $\gamma_t = 1,2 \cdot 10^{-2}$  % ( $50 \sigma'_v$  (kPa)  $100$ ) and  $\gamma_t = 2 \cdot 10^{-2}$  % ( $\sigma'_v = 200$ kPa).*

**Keywords :** *threshold shear strain, dynamic loading, liquefaction, pore water pressure, sands*

**Abstrak :** Fenomena likuifaksi dapat dianalisis menggunakan metode strain-controlled loading method. Metode ini merupakan metode non destruktif pada benda uji yang dapat menyajikan seluruh informasi kenaikan tekanan air pori secara lengkap. Metode ini dilakukan dengan cara mempertahankan nilai small deformation ketika diterapkan pembebanan secara siklis. Dari hasil pengujian diperoleh hasil bahwa likuifaksi terjadi ketika tekanan air pori mencapai nilai sebanding tekanan efektif tanah ( $\sigma'_v$ ). Metode ini menghasilkan parameter cyclic shear strain treshhold ( $\gamma_t$ ). Parameter ini membagi grafik tekanan air pori menjadi dua zona yaitu zona konstan dan zona kenaikan tekanan air pori. Ketika amplitudo cyclic shear strain ( $\gamma$ ) lebih rendah dari  $\gamma_t$  maka tidak akan ditemui kenaikan tekanan air pori. Tetapi sebaliknya jika  $\gamma > \gamma_t$  maka akan muncul kenaikan tekanan air pori. Berdasarkan hasil pengujian pada pasir murni dengan kepadatan relatif ( $D_r$ ) sebesar 25%, 60% dan 80% dengan penerapan tekanan kekang sel  $\sigma'_v = 100$  kPa dan frekuensi pembebanan ( $f$ ) = 0.05 Hz dan 0,1 Hz tampak bahwa nilai  $\gamma_t$  sebesar  $1,5 \cdot 10^{-2}$  %. Uji lain dengan menggunakan kondisi batas  $D_r = 60\%$  dan  $f = 0.1$  Hz menghasilkan nilai  $\gamma_t$  sebesar  $1,5 \cdot 10^{-2}$  % ( $50 \sigma'_v$  (kPa)  $100$ ) dan  $\gamma_t = 5 \cdot 10^{-2}$  % ( $\sigma'_v = 200$ kPa). Serta pengujian dengan kondisi batas  $D_r = 60\%$  dan  $f = 0.05$  Hz menunjukkan hasil  $\gamma_t$  sebesar  $1,2 \cdot 10^{-2}$  % ( $50 \sigma'_v$  (kPa)  $100$ ) dan  $\gamma_t = 2 \cdot 10^{-2}$  % ( $\sigma'_v = 200$ kPa).

Kata kunci : threshold cyclic shear strain, pembebanan dinamislikuifaksi, tekanan air pori

## PENDAHULUAN

Massa tanah yang terbebani secara dinamis akan mempunyai perilaku yang berbeda dibanding ketika terbebani secara statis. Pada tanah dengan kondisi kenyang air, pembebanan secara dinamis akan mempengaruhi perilaku tekanan air pori terhadap waktu. Perubahan nilai tekanan air pori tergantung pada besaran beban

yang bekerja serta frekuensi pembebanan yang diterapkan. Secara teoritis, perubahan tekanan air pori di dalam massa tanah akan memberikan pengaruh terhadap kemampuan tanah dalam menumpu beban di atasnya. Secara teoritis, keduanya mempunyai hubungan terbalik sehingga apabila nilai tekanan air pori dalam tanah mengalami peningkatan maka dapat

diartikan juga bahwa tahanan tanah dalam menerima beban mengalami penurunan.

Penelitian mengenai perilaku kenaikan tekanan air pori pada tanah akibat beban siklis yang bekerja biasanya dikaitkan dengan peristiwa likuifaksi. Dalam kehidupan sehari-hari, beban siklis dapat direpresentasikan sebagai beban gempa, beban lalu lintas, beban akibat getaran pemancangan fondasi tiang ataupun beban akibat ombak (Ishihara, 1996). Pada umumnya penelitian mengenai likuifaksi menggunakan uji triaksial siklis di laboratorium mengacu pada parameter kenaikan air pori yang terjadi sebagai kunci penentu potensi tersebut muncul atau tidak (Ladd, et al., 1998; Erten, et al., 1995; Prakash, et al., 1992; Uchida, et al., 2001).

Ada beberapa metode uji triaksial siklis yang biasa digunakan oleh para peneliti yaitu cyclic shear-strain controlled, cyclic shear stress controlled dan konsep strain energy. Salah satu metode dari uji triaksial siklis yang mendasarkan analisisnya terhadap perilaku kenaikan air pori pada suatu massa tanah akibat beban siklis yang bekerja adalah metode cyclic shear-strain controlled. Parameter kunci yang dibutuhkan ketika menggunakan analisa likuifaksi menggunakan metode ini adalah threshold cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ). Dengan mengetahui parameter ini maka akan diketahui nilai minimum cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ) yang dapat diaplikasikan pada seluruh rangkaian pengujian likuifaksi sehingga memicu kenaikan tegangan air pori ketika beban siklis diterapkan pada tanah dengan kondisi kenyang air (fully saturated).

Hingga saat ini, para peneliti masih meneliti mengenai threshold cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ) untuk setiap jenis tanah. Beberapa literatur

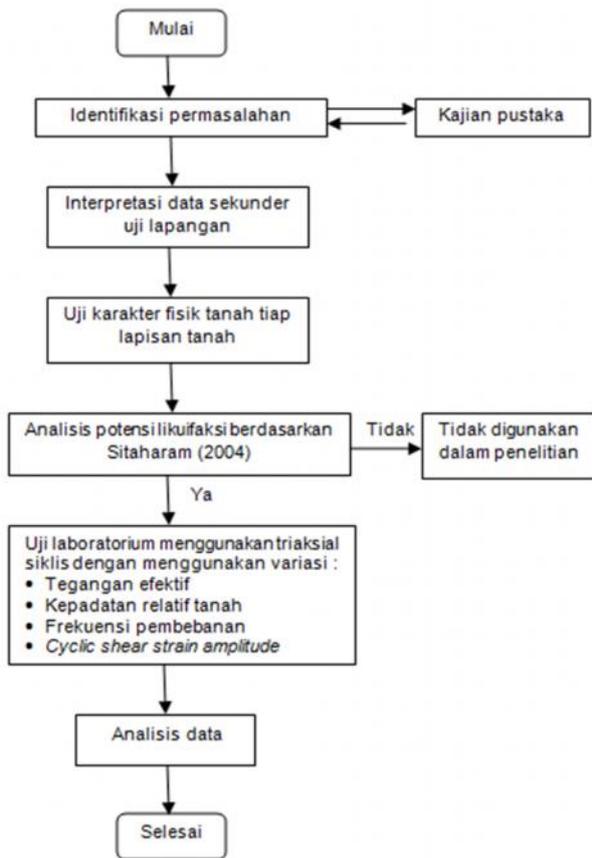
menyatakan bahwa setiap jenis tanah akan memberikan respon yang berbeda-beda apabila terbebani secara siklis pada kondisi jenuh air (Ladd, et al., 1989; Hsu, et al., 2006; Uchida, et al., 2001). Tabel 1 berikut ini merangkum hasil dari beberapa penelitian yang membahas mengenai nilai threshold cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ) untuk setiap jenis tanah yang berbeda. Nilai threshold cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ) untuk tanah kohesif cenderung lebih rendah dibandingkan pasir. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hsu (2006), terlihat bahwa pada tanah kohesif, nilai threshold cyclic shear strain ( $\gamma_c$ ) dipengaruhi oleh faktor indeks plastisitas tanah.

**Tabel 1.** Rangkuman beberapa penelitian mengenai  $\gamma_c$  pada berbagai jenis tanah

Penelitian oleh	Jenis tanah	Indeks plastisitas, PI (%)	Kisaran nilai threshold cyclic shear strain, $\gamma_c$ (%)	Alat yang digunakan
Ladd, et al., 1989	Pasir murni	NP	0,011	Undrained cyclic triaxial
Hsu, et al., 2006	Tanah kohesif	14 – 30	0,024 – 0,06	Direct simple shear
Uchida, et al., 2001	Pasir Toyoura	NP	-	Undrained monotonic triaxial

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data primer dan sekunder. Data sekunder digunakan sebagai acuan identifikasi kedalaman pengambilan tanah yang akan digunakan sebagai benda uji untuk seluruh rangkaian pengujian. Setelah dapat menetapkan kedalaman tanah yang akan digunakan maka dilaksanakan uji laboratorium menggunakan triaksial siklis dengan tujuan mendapatkan data primer pada pengujian inti. Secara garis besar pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada bagan alir penelitian seperti pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Bagan alir penelitian

Analisis data menggunakan nilai perubahan tekanan air pori selama pengujian berlangsung yang terekam secara kontinu menggunakan alat *Acquisition Data Unit (ADU)*. Pengoperasian alat selama uji berlangsung dikontrol oleh sebuah *software* melalui perintah yang diberikan pada sebuah *PC (Personal Computer)*. *Software* yang digunakan untuk menjalankan program ini dapat memberikan berbagai macam variasi perintah yang berkaitan dengan uji tanah secara otomatis. Seluruh pengujian ini menerapkan beberapa kondisi batas yaitu berupa variasi nilai tegangan efektif ( $\sigma'_v$ ), kepadatan relatif tanah ( $D_r$ ) dan frekuensi ( $f$ ) pembebanan.

Seluruh rangkaian pelaksanaan pengujian untuk mengetahui kisaran nilai *threshold cyclic shear strain* ( $\gamma_c$ ) pada pasir murni dengan ukuran

butiran medium menggunakan alat triaksial siklis yang dilengkapi khusus dengan tiga buah *controller*, yaitu *controller* beban aksial, *controller* tekanan kekang dan *controller* tekanan air pori. Benda uji yang digunakan adalah sampel tanah terusik (*disturbed sample*) dengan alasan untuk memudahkan dalam pembuatan spesimen benda uji.

### Pembuatan benda uji

Pada paragraf di bawah ini menjelaskan mengenai tahapan pembuatan benda uji sebelum pengujian inti dilaksanakan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam proses pembuatan benda uji dijelaskan seperti di bawah ini,

1. Metode yang digunakan dalam proses pembuatan benda uji adalah *dry pluviation*. *Mold* pembuatan benda uji memiliki ukuran diameter 50 mm dan tinggi 100 mm. Sebelum tanah dibentuk menjadi specimen, maka bagian sisi dalam *mold* telah terpasang membran karet serta batu pori di bagian bawah specimen. Kemudian disiapkan air dan tanah sesuai dengan nilai kepadatan relative ( $D_r$ ) yang dikehendaki yaitu sebesar 25%, 60% dan 80%. Jumlah air dikeluarkan secara perlahan melalui batu pori yang berada pada dasar alat uji triaksial dan kemudian tanah kering yang telah disiapkan siap dicetak dengan cara menaburkan ke dalam *mold*. Selama proses ini, tanah akan menyerap air secara perlahan-lahan. Setelah semua proses selesai dan specimen telah terbentuk maka specimen siap dipindahkan ke dalam sel triaksial. Sebelum memulai pengujian inti, setelah specimen berada di dalam sel triaksial dan sel triaksial telah terpasang

sesuai prosedur maka dialirkan air yang telah melalui proses *de-aered* dan *de-mineralised*.

2. Proses selanjutnya adalah diberikan kondisi batas pada specimen yaitu konsolidasi isotropik yang bertujuan untuk menyeragamkan tekanan pori yang ada di specimen. Proses ini dilaksanakan selama sehari semalam dengan menerapkan tekanan sel sebesar 50 kPa, 100 kPa dan 200 kPa. Proses ini dinyatakan selesai jika dianggap sudah tidak ada lagi perubahan volume pada specimen. Tahapan selanjutnya adalah proses penjenuhan.
3. Selama proses penjenuhan berlangsung, terdapat dua tekanan yang diterapkan dengan cara dinaikkan nilainya secara bertahap yaitu *back pressure* dan tekanan kekang sel hingga mencapai nilai *Skempton* lebih dari 0.95. Nilai *skempton* adalah parameter yang digunakan sebagai acuan untuk mengetahui dan menjamin bahwa specimen yang digunakan dalam pengujian telah berada dalam kondisi jenuh total.

### Penentuan parameter *threshold cyclic shear strain* ( $\gamma_t$ )

Penentuan nilai *threshold cyclic shear strain* (  $\gamma_t$  ) menggunakan metode yang diperkenalkan oleh Ladd et al. (1989) dengan tahapan pengujian siklis dalam kondisi tak terdrainasi sebagai berikut,

1. Pengujian dengan menggunakan regangan yang sangat kecil  
 Pada tahapan ini diterapkan nilai regangan yang sangat kecil ketika proses pengujian berlangsung, yaitu sebesar  $10^{-3} - 10^{-2}\%$ . Tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai tekanan air pori

residual. Pembebanan secara siklis diterapkan sebanyak 10 siklus kemudian dihentikan ketika hasil dari pengujian mencapai  $u_r = 0$ .

2. Pengukuran *threshold cyclic shear strain* (  $\gamma_t$  )  
 Pada tahap ini, selama pengujian berlangsung perlu dicatat secara detail nilai  $u$ . Jumlah siklus yang diterapkan pada pengujian ini sama seperti tahap sebelumnya yaitu sebanyak 10 siklus. Tetapi ketika diterapkan nilai sedikit lebih tinggi yaitu berkisar  $1.10^{-2}\% < \gamma_t < 2.10^{-2}\%$  menunjukkan adanya kenaikan  $u_r$  walaupun nilainya sangat kecil sekali.
3. Pengukuran  $\gamma_c > \gamma_t$   
 Nilai amplitudo *cyclic shear strain* (  $\gamma_c$  ) yang diterapkan pada tahapan ini lebih besar dari tahap 2. Jumlah siklus pembebanan siklis yang diterapkan sebanyak 100 siklus atau pengujian dapat dihentikan ketika tanah sudah mencapai kondisi likuifaksi awal. Pada tahap ini tampak bahwa nilai  $u_r$  akan naik secara signifikan.

### Kondisi batas pengujian

Sebelum memasuki pengujian inti, ada beberapa kondisi batas yang diterapkan untuk mencapai tujuan yang diharapkan. Beberapa kondisi batas tersebut adalah :

**Tabel 2.** Kondisi Batas Pengujian

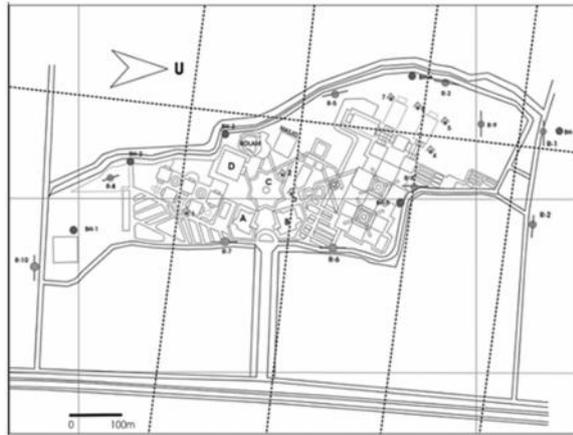
No	Variabel	Besaran nilai yang diterapkan
1	Kepadatan relatif ( $D_r$ )	25%, 60%, 80%
2	Saturation ( $S$ )	95 – 100%
3	Tekanan kekang sel	50 kPa, 100 kPa, 200 kPa
4	Frekuensi pembebanan ( $f$ )	0,05 Hz dan 0,1 Hz
5	Jumlah siklus pembebanan ( $N$ )	10 siklus

## HASIL DAN ANALISIS

### Tanah Yang Diuji

Sampel tanah yang akan diuji diambil di area lokasi ditemukannya adanya fenomena

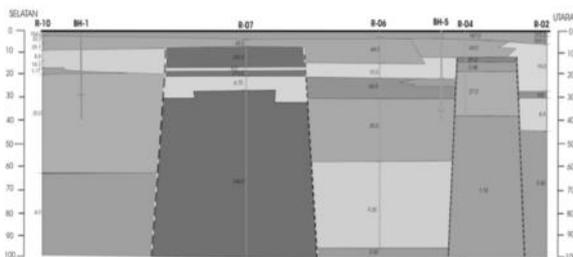
likuifaksi ketika gempa Yogyakarta 2006. Lokasi munculnya likuifaksi salah satunya ditemukan di area Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY) yang secara detail dapat dilihat pada Gambar 1.



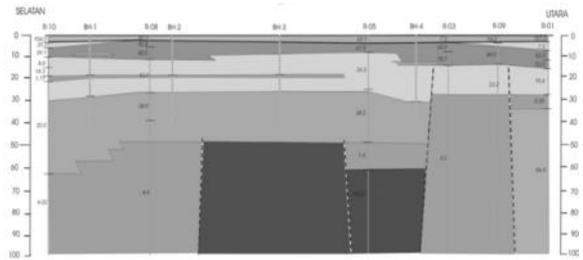
- BH-1 TITIK PEMBORAN BH-1
- R-1 TITIK PENGUKURAN GEOLISTRIK R-1
- TITIK LIQUIFAKSI GEMPA 27 MEI 2006
- ARAH RETAKAN BAWAH PERMUKAAN

**Gambar 2.** Peta lokasi ditemukannya likuifaksi di area Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY)

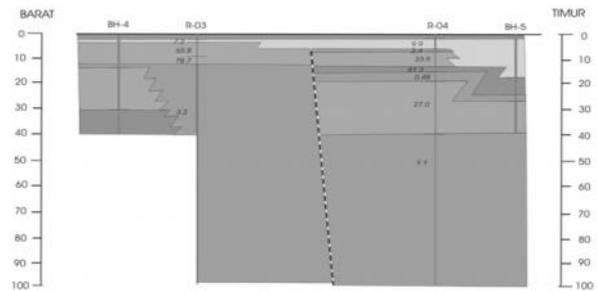
Pada gambar tersebut terlihat bahwa banyak sekali titik-titik kemunculan likuifaksi. Untuk detail stratifikasi tanah pada kawasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 sampai Gambar 5 Penelitian stratifikasi tanah di lapangan menggunakan uji geolistrik pada 9 titik dan pemboran menggunakan *Standard Penetration Test (SPT)* pada 6 titik.



**Gambar 3.** Penampang Geologi-1 area Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (sumber : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2011)



**Gambar 4.** Penampang Geologi-2 area Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (sumber : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2011)



**Gambar 5.** Penampang Geologi-3 area Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (sumber : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2011)

Keterangan :

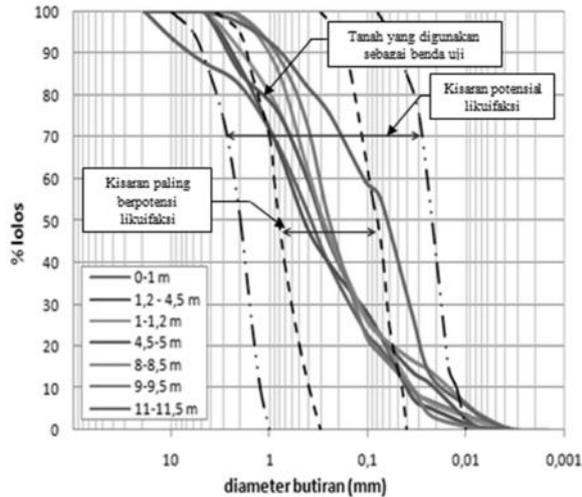
- tanah permukaan
- lempung
- breksi batuan beku
- pasir kadang berkerakal
- batu pasir berkerakal
- batu pasir berkerakal
- titik resistivity
- titik pemboran inti

Tanah yang digunakan sebagai sampel dalam penelitian ini adalah tanah di sekitar titik BH-4 dengan kedalaman 4 -4,5 meter di bawah permukaan tanah. Untuk mengetahui parameter fisik tanah yang diuji dilaksanakan serangkaian pengujian dasar di laboratorium yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini.

**Tabel 3.** Parameter fisik sampel tanah yang akan digunakan selama pengujian

No	Variabel	Unit	Hasil pengujian
1	Kadar air ( $w$ )	%	22.3
2	Kepadatan relative ( $D_r$ )	%	64
3	Specific gravity ( $G_s$ )	-	2.66
4	Angka pori ( $e$ )	-	0.59
5	Berat volume kering ( $\gamma_d$ )	gr/cm <sup>3</sup>	1.67
6	Berat volume basah ( $\gamma_b$ )	gr/cm <sup>3</sup>	1.92
7	Koefisien keseragaman ( $C_u$ )	-	4.34
8	Koefisien gradasi butiran tanah ( $C_c$ )	-	1.14
9	Atterberg Limit	-	Non plastic
10	Klasifikasi tanah (USCS)	-	SW

Secara garis besar berdasar hasil pengujian laboratorium, maka sampel tanah merupakan tanah granular dengan ukuran butiran medium yang dapat dilihat pada grafik distribusi ukuran butiran (Gambar 5). Pada gambar tersebut disimpulkan juga bahwa sampel tanah merupakan tanah yang sangat berpotensi mengalami likuifaksi berdasarkan grafik yang diusulkan oleh Sitharam (2004).

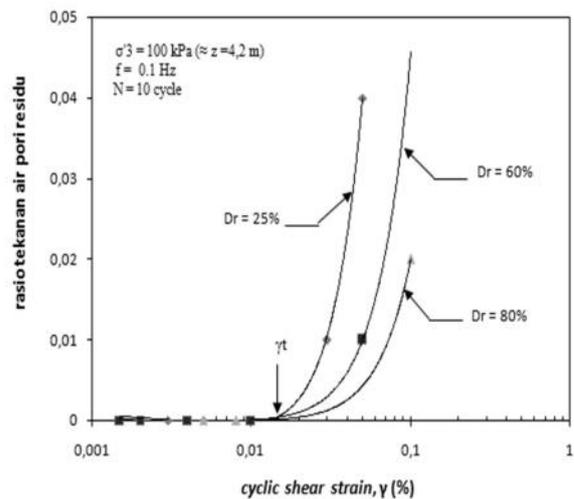


**Gambar 6.** Analisa potensi likuifaksi pada titik BH-4 pada beberapa kedalaman menggunakan diagram usulan Sitharam (2004).

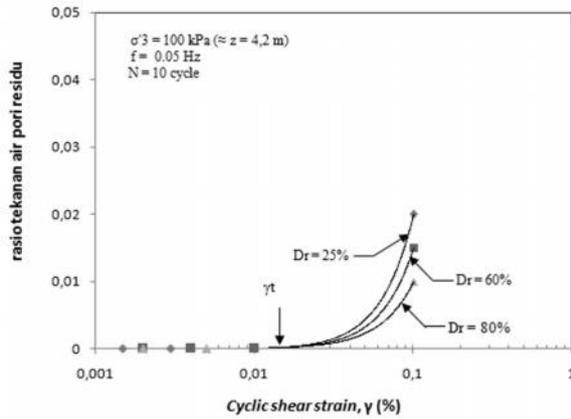
### Cyclic shear strain threshold ( $\gamma_t$ )

Seluruh rangkaian pengujian dilaksanakan dengan tujuan mendapatkan nilai *cyclic shear strain threshold* ( $\gamma_t$ ). Seluruh benda uji yang digunakan dalam kondisi jenuh ( $S_r = 100\%$ ) dan selama uji berlangsung dijaga agar pengujian dalam kondisi *undrained* dan menggunakan beberapa variabel sebagai kondisi batas yaitu, tegangan kekang efektif ( $\sigma'_3$ ), kepadatan relatif tanah ( $D_r$ ), frekuensi ( $f$ ) pembebanan serta variasi amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ). Hasil uji *cyclic shear strain threshold* dirangkum pada Gambar 7 hingga Gambar 10.

Pada Gambar 7 menunjukkan perilaku kenaikan tekanan air pori pada benda uji yang berupa *clean sand* ketika diterapkan frekuensi beban ( $f$ ) sebesar 0,1 Hz. Selama uji dilakukan, nilai rasio tekanan air pori dicatat secara detail dari awal hingga akhir uji. Untuk hasil pencatatan digunakan tekanan air pori residual ( $u_r$ ). Tekanan air pori residual ( $u_r$ ) menggambarkan komponen tekanan air pori yang tidak dipengaruhi oleh beban siklis yang diterapkan. Variasi nilai yang diterapkan pada benda uji mulai  $2 \cdot 10^{-3}\%$  hingga  $1 \cdot 10^{-1}\%$ . Pencatatan nilai untuk setiap amplitudo *cyclic shear strain*, kemudian dinormalisasi dengan tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ), akan didapatkan rasio tekanan air pori residual ( $u_r / \sigma'_3$ ). Nilai *cyclic threshold shear strain* ( $\gamma_t$ ), diperoleh dari grafik hubungan antara amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) dan rasio tekanan air pori residual ( $u_r / \sigma'_3$ ). Titik di mana mulai terjadi kenaikan rasio tekanan air pori residual dinyatakan sebagai *cyclic threshold shear strain* ( $\gamma_t$ ).



**Gambar 7.** Kenaikan tekanan air pori setelah  $N=10$  siklus untuk *clean sand* dengan variasi kepadatan relatif ( $D_r$ ) dengan kondisi batas  $\sigma'_3$  sebesar 100 kPa dan ( $f$ ) = 0,1 Hz.



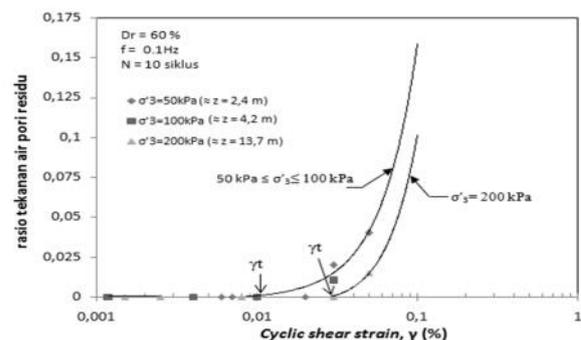
**Gambar 8.** Kenaikan tekanan air pori setelah  $N=10$  siklus untuk clean sand dengan variasi kepadatan relatif ( $D_r$ ) dengan kondisi batas  $\sigma'_3$  sebesar 100 kPa dan ( $f$ ) = 0,05 Hz .

Untuk Gambar 8 diperoleh dengan menerapkan kondisi pembebanan yang sama, perbedaannya hanyalah pada nilai frekuensi ( $f$ ) beban yaitu sebesar 0,05 Hz. Dari kedua gambar tersebut diperoleh kesimpulan bahwa besarnya amplitudo *cyclic threshold shear strain* ( $\gamma_t$ ) ketika diterapkan tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ) sebesar 100 kPa pada tiga jenis kondisi kepadatan tanah dengan nilai kepadatan relatif tanah ( $D_r$ ) yang berbeda yaitu 25%, 60% dan 80% untuk frekuensi pembebanan ( $f$ ) = 0,05 maupun 0,1 Hz mempunyai kisaran nilai yang sama yaitu antara  $1.10^{-2}$  % hingga  $2.10^{-2}$  %.

Dari Gambar 7 dan 8 disimpulkan jika diterapkan nilai  $\gamma < \gamma_t$ , maka tidak akan ada kenaikan tekanan air pori. Ketika nilai  $\gamma > \gamma_t$ , maka terlihat adanya pergerakan kenaikan tekanan air pori. Semakin besar nilai amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) yang diterapkan terhadap benda uji, maka akan semakin tinggi tekanan air pori yang terjadi. Parameter kepadatan relatif ( $D_r$ ) sangat mempengaruhi kenaikan tekanan air pori yang terjadi di dalam benda uji apabila amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) yang diterapkan selama pengujian lebih besar dari

*cyclic threshold shear strain* ( $\gamma_t$ ). Pernyataan tersebut dibuktikan dengan melihat grafik hubungan antara *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) dan tekanan air pori residu ( $u_r$ ). Dari grafik tersebut tampak bahwa penerapan amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) yang sama pada benda uji kondisi kepadatan benda uji yang berbeda akan menghasilkan pola kenaikan tekanan air pori yang berbeda. Berdasar kedua gambar tersebut menunjukkan ketika kepadatan relatif ( $D_r$ ) benda uji sebesar 25%, maka kenaikan tekanan air pori residu ( $u_r$ ) lebih besar dibandingkan benda uji dengan  $D_r$  sebesar 25%.

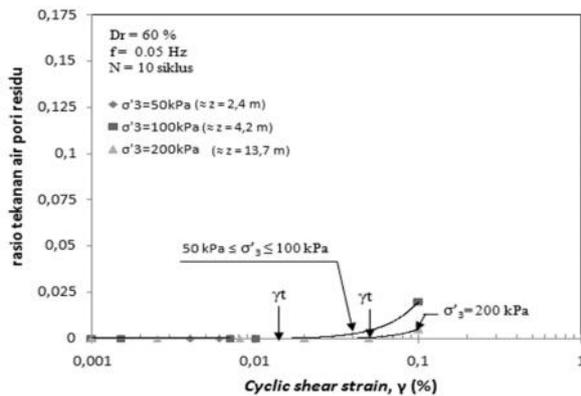
Untuk mengetahui pengaruh tegangan efektif sel terhadap karakteristik nilai *threshold cyclic shear strain* ( $\gamma_t$ ) pada *clean sand* dapat dilihat pada Gambar 9. Pada gambar tersebut tampak perilaku *clean sand* dengan nilai kepadatan tanah ( $D_r$ ) sebesar 60% dan frekuensi ( $f$ ) pembebanan sebesar 0,1 Hz, diberikan tegangan efektif sel sebesar 50 kPa hingga 100 kPa, maka akan diperoleh nilai  $\gamma_t$  sebesar 0,013% dan ketika tegangan efektif sel dinaikan menjadi 200 kPa, maka nilai  $\gamma_t$  juga akan bergeser naik menjadi 0,03%.



**Gambar 9.** Kenaikan tekanan air pori residu setelah  $N=10$  siklus untuk clean sand dengan variasi tegangan efektif sel pada frekuensi ( $f$ ) beban sebesar 0,1 Hz.

Pada Gambar 9 terlihat penggunaan *small deformation cyclic shear strain* dalam penentuan nilai batas *threshold cyclic shear*

$\gamma_t$  dengan menggunakan tegangan sel efektif ( $\sigma'_3$ ) berkisar antara 50 hingga 100 kPa tidak akan mempengaruhi  $\gamma_t$  yang diperoleh, karena dalam kisaran nilai tersebut akan mendapatkan nilai  $\gamma_t$  yang sama. Pada saat tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ) dinaikan menjadi 200 kPa, maka terlihat bahwa nilai  $\gamma_t$  akan bergeser mengalami peningkatan. Hal serupa juga terlihat untuk frekuensi ( $f$ ) pembebanan diubah menjadi 0,05 Hz (Gambar 10). Pada saat tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ) sebesar 50 hingga 100 kPa diterapkan, maka akan diperoleh nilai ambang batas  $\gamma_t$  sebesar 0,012% dan pada tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ) sebesar 200 kPa diperoleh nilai ambang batas  $\gamma_t$  sebesar 0,05%.

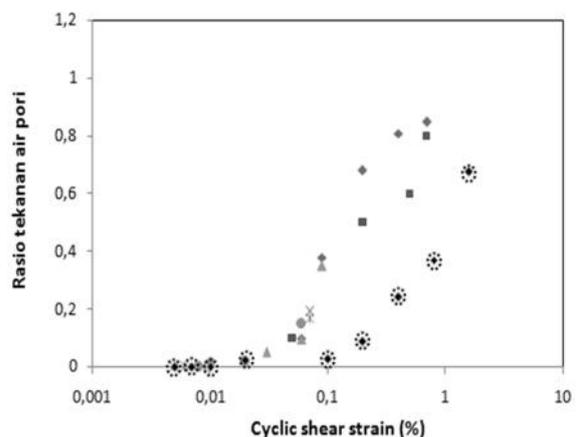


**Gambar 10.** Kenaikan tekanan air pori residu setelah  $N=10$  siklus untuk clean sand dengan variasi tegangan efektif sel pada frekuensi ( $f$ ) beban sebesar 0,05 Hz.

Nilai *threshold cyclic shear strain* ( $\gamma_t$ ) pada penelitian ini memiliki arti fisik yaitu ketika butiran-butiran tanah mulai tergelincir satu sama lain dari posisi awalnya sehingga butiran mengalami reposisi dan memadat. Ketika butiran mengalami reposisi berarti gaya normal butiran tanah mengalami perubahan menjadi lebih besar. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya kenaikan tekanan air pori yang merepresentasikan gaya perlawanan terhadap kenaikan gaya normal tersebut. Untuk variabel tegangan efektif sel ( $\sigma'_3$ ) pada dasarnya

merupakan presentasi keberadaan suatu elemen tanah pada kedalaman tertentu yang berperan memberikan kontribusi tambahan kekuatan tanah dalam menerima beban geser. Semakin besar nilai tegangan efektif sel dapat dikatakan pula bahwa suatu tanah mempunyai kekuatan yang lebih besar dalam menahan gaya yang bekerja untuk meruntuhkannya. Semakin dalam suatu massa tanah yang terbebani secara siklis maka akan diperlukan nilai amplitudo *cyclic shear strain* ( $\gamma$ ) yang lebih besar untuk bisa mengakibatkan kenaikan tekanan air pori. Penurunan level frekuensi ( $f$ ) pembebanan juga memberikan pengaruh berkaitan dengan waktu terjadinya kenaikan tekanan air pori residu yang cenderung lebih lama serta besaran nilai tekanan air pori residu. Semakin kecil nilai frekuensi pembebanan maka semakin sedikit pula kuantitas gelombang sinus beban yang bekerja sehingga kenaikan nilai tekanan air pori residu juga menjadi kecil.

Hasil penelitian ini kemudian dikompilasi dengan hasil penelitian lain dengan benda uji berupa *clean sand* dengan variasi tegangan keang efektif ( $\sigma'_3$ ) dan metode pembuatan benda uji yang telah dirangkum Ladd, et al. (1989) pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Variasi kenaikan tekanan air pori pada siklus  $N=10$  untuk berbagai jenis clean sand dan tegangan efektif sel.

Berdasar Gambar 11, tampak bahwa ketika benda uji berupa *clean sand* diberi beban dengan amplitudo *cyclic shear strain* (  $\gamma$  ) di bawah 0,01 % mempunyai kisaran nilai yang hampir sama atau dapat dikatakan bahwa tekanan air pori bernilai konstan. Sebaliknya jika diterapkan pembebanan dengan amplitudo *cyclic shear strain* (  $\gamma$  ) lebih besar dari 0,01%, tampak tekanan air pori pada *clean sand* penelitian ini menjadi jauh lebih kecil dibandingkan dengan *clean sand* penelitian lainnya apabila diterapkan nilai  $\gamma$  yang sama. Hal ini diakibatkan karena *clean sand* pada penelitian ini memiliki gradasi yang baik dan secara visual memiliki karakteristik permukaan butiran relatif tajam dan kasar. Karakteristik butiran padat yang tajam dan kasar memberikan pengaruh terhadap kekuatan tanah terhadap beban siklis yang bekerja terhadapnya. Sepanjang pembebanan berlangsung terjadi kenaikan air pori, tetapi permukaan yang tajam membuat pergerakan partikel-partikel menjadi tidak leluasa. Permukaan yang bersudut memberikan kontribusi membuat perilaku tanah cenderung lebih stabil dalam menerima beban dibandingkan dengan partikel yang mempunyai permukaan bulat.

## KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh rangkaian pengujian yang dilakukan dapat disimpulkan menjadi berikut : (1) Penerapan tegangan efektif sel (  $\sigma'_3$  ) sebesar 100 kPa pada tiga jenis kondisi kepadatan tanah dengan nilai kepadatan relatif tanah ( $D_r$ ) yang berbeda yaitu 25%, 60% dan 80% untuk frekuensi pembebanan ( $f$ ) = 0,05 maupun 0,1 Hz diperoleh kisaran nilai  $\epsilon_v$  sebesar  $1.10^{-2}\%$  hingga  $2.10^{-2}\%$ ; (2) Untuk *clean sand* dengan nilai kepadatan tanah ( $D_r$ ) sebesar 60%

dan frekuensi ( $f$ ) pembebanan sebesar 0,1 Hz apabila diterapkan  $\sigma'_3$  sebesar 50 kPa hingga 100 kPa maka akan diperoleh nilai  $\epsilon_v$  sebesar 0,013% dan ketika tegangan efektif sel dinaikan menjadi 200 kPa, maka nilai  $\epsilon_v$  juga akan bergeser naik menjadi 0,03%; (3) Hal serupa juga terlihat apabila frekuensi ( $f$ ) pembebanan diubah menjadi 0,05 Hz, pada saat tegangan efektif sel (  $\sigma'_3$  ) sebesar 50 hingga 100 kPa diterapkan akan diperoleh nilai ambang batas  $\epsilon_v$  sebesar 0,012% dan pada tegangan efektif sel (  $\sigma'_3$  ) sebesar 200 kPa diperoleh nilai ambang batas  $\epsilon_v$  sebesar 0,05%; (4) Pemberian beban pada *clean sand* dengan amplitudo *cyclic shear strain* (  $\gamma$  ) di bawah 0,01 % tampak bahwa tekanan air pori bernilai konstan. Sebaliknya jika diterapkan pembebanan dengan amplitudo *cyclic shear strain* (  $\gamma$  ) lebih besar dari 0,01%, tampak tekanan air pori pada *clean sand* penelitian ini menjadi jauh lebih kecil dibandingkan dengan *clean sand* penelitian lainnya apabila diterapkan nilai  $\gamma$  yang sama; (5) Karakteristik butiran padat yang tajam dan kasar memberikan pengaruh terhadap kekuatan tanah terhadap beban siklis yang bekerja terhadapnya. Permukaan yang bersudut memberikan kontribusi membuat perilaku tanah cenderung lebih stabil dalam menerima beban dibandingkan dengan partikel yang mempunyai permukaan bulat.

Saran yang dapat diberikan berdasarkan kesimpulan di atas antara lain: (1) penelitian dapat dikembangkan dengan membandingkan menggunakan metode lain seperti misalnya *stress controlled method* ataupun konsep *strain energy* untuk mengetahui potensi likuifaksi pada massa tanah; (2) Penelitian mengenai likuifaksi dapat menggunakan jenis alat uji siklis yang lain

seperti meja getar, uji geser langsung siklis, kolom resonansi atau uji sentrifugal lalu dikompilasi dengan hasil penelitian ini sehingga akan

Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,  
UMY

#### DAFTAR PUSTAKA

- Erten, D. and Maher, M.H., 1995, Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp. 115-143
- Hsu, C.C and Vucetic, M., "Threshold Shear Strain for Cyclic Pore Water Pressure in Cohesive Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No.10, pp 1325-1335 , October 2006
- Ishihara, K., 1996, *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press Inc., New York, USA.
- Ladd, R.S., Dobry, R., Dutko, P., Yokel, F.Y., and Chung, R.M., "Pore-Water Pressure Buildup in Clean Sands Because of Cyclic Straining," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 12 No.1, pp 77-86 , March 1989 .
- NRC, 1985, "Threshold Shear Strain for Cyclic Pore Water Pressure in Cohesive Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No.10, pp 1325-1335
- Prakash, S. and Sandoval, J.A., 1992, Liquefaction of low plasticity silts, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 373-379
- Sitharam, S.G., GovindaRaju, L., and Sridharan, A., 2004, Dynamics Properties and Liquefaction Potential of Soils, *Journal of Current Science* vol. 87, No. 10, pages 1370-1378
- Uchida, K. and Stedman, J.D., "Liquefaction Behavior of Toyura Sand Under Cyclic Strain Controlled Triaxial Testing," *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp 350-356 , June 2001 .
- Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2011, *Data geologi-geoteknik kawasan*