



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERILAKU TANAH RESIDUAL DEPOK YANG  
DIPADATKAN AKIBAT BEBAN SIKLIK SATU-ARAH  
PADA KONDISI TERKONSOLIDASI TAKTERDRAINASI**

**DISERTASI**

**DAMRIZAL DAMOERIN**  
**840201401Y**

D  
00935

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JANUARI 2009**





**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERILAKU TANAH RESIDUAL DEPOK YANG  
DIPADATKAN AKIBAT BEBAN SIKLIK SATU-ARAH  
PADA KONDISI TERKONSOLIDASI TAKTERDRAINASI**

**DISERTASI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor dalam bidang Ilmu Teknik**

**DAMRIZAL DAMOERIN  
840201401Y**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
KEKHUSUSAN GEOTEKNIK  
DEPOK  
JANUARI 2009**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Damrizal Damoerin**

**NPM : 840201401Y**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 5 Januari, 2009**

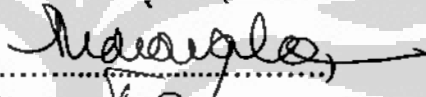
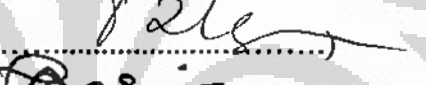


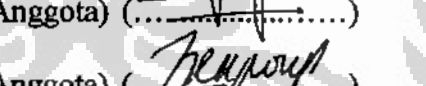



## HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : Damrizal Damoerin  
NPM : 840201401Y  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Disertasi : Perilaku Tanah Residual Depok Yang Dipadatkan  
Akibat Beban Siklik Satu-Arah  
Pada Kondisi Terkonsolidasi Takterdrainasi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Budi Susilo Soepandji (.....)   
Kopromotor : Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas M.Eng (.....)   
: Dr. Ir. Sigit P. Hadiwardoyo, DEA (.....)   
Tim Penguji : Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA (Anggota) (.....)   
: Ir. Widjojo Adi Prakoso, Ph.D. (Anggota) (.....)   
: Dr. Ir. Heru Purnomo (Anggota) (.....)   
: Ir. Herr Soeryantono, M.Sc., Ph.D. (Anggota) (.....)   
: Prof. Ir. Chaidir A. Makarim, Ph.D. (Anggota) (.....) 

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 5 Januari, 2009

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, karunia dan rahmat-Nya, akhirnya saya dapat menyelesaikan Disertasi ini. Penulisan Disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor dalam bidang Ilmu Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Prof.Dr.Ir. Budi Susilo Soepandji selaku Promotor, yang telah memberikan pengarahan, diskusi, bimbingan dan dorongan serta persetujuan sehingga Disertasi ini dapat selesai dengan baik.

Penulis juga mengucapkan terima kasih yang takterhingga kepada Prof.Dr.Ir. Tommy Ilyas M.Eng. selaku Ko-Promotor I, yang telah banyak menyediakan waktu untuk memberikan pengarahan, diskusi, bimbingan dan dorongan serta persetujuan sehingga Disertasi ini dapat selesai dengan baik.

Penulis juga mengucapkan terima kasih yang takterhingga kepada Dr.Ir.Sigit P.Hadiwardoyo, DEA, selaku Ko-Promotor II, yang telah banyak meluangkan waktu untuk diskusi, bimbingan, memberikan pengarahan pengujian laboratorium dan dorongan serta persetujuan sehingga Disertasi ini dapat selesai dengan baik.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan Kelompok Ilmiah Geoteknik yang juga merupakan anggota Tim Penguji, Dr.Ir. Wiwik Rahayu, DEA dan Ir. Widjojo A. Prakoso, Ph.D. yang telah meluangkan waktu untuk diskusi dan pengarahan dalam pengujian laboratorium, sehingga Disertasi ini dapat selesai dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada anggota Tim Penguji yang lain, Dr.Ir. Heru Purnomo, Ir. Herr Soeryantono, M.Sc., Ph.D dan Prof. Ir. Chaidir A. Makarim, M.S.C.E., Ph.D, yang telah menyediakan waktu untuk diskusi dan memberikan saran-saran, sehingga Disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ketua Departemen Teknik Sipil, Prof. Dr. Ir. Irwan Katili dan rekan-rekan Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil lainnya yang tidak mungkin disebutkan satu persatu, yang selama ini telah memberikan bantuan, saran-saran,

dukungan moril dan semangat yang bersifat positive sejak awal penelitian sampai diselesaikannya Disertasi ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua Laboran Laboratorium Mekanika Tanah dan Karyawan Departemen Teknik Sipil lainnya yang tidak mungkin disebutkan satu persatu, atas bantuan dan waktunya yang telah diberikan selama ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr.Ir. Hendra Jitno, M..ASc. yang telah banyak membantu dalam pengarahan penelitian pada saat awal penelitian sampai penelitian 1. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada ibunda tercinta, istri dan anak-anak tercinta, kakak, adik-adik dan saudara-saudara tercinta, sahabat-sahabat serta semua pihak yang tak mungkin penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan moril dan semangat terus menerus selama penelitian.

Semoga Allah S.W.T. dapat membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu selama ini di kemudian hari. Semoga Disertasi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya dan khususnya dalam bidang Geoteknik.

Depok, 5 Januari 2009.

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Damrizal Damoerin  
NPM : 840201401Y  
Program Studi : Geoteknik  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Disertasi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PERILAKU TANAH RESIDUAL DEPOK YANG DIPADATKAN  
AKIBAT BEBAN SIKLIK SATU-ARAH  
PADA KONDISI TERKONSOLIDASI TAKTERDRAINASI**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok.....

Pada tanggal : 5 Januari, 2009.....

Yang menyatakan

( Damrizal Damoerin. )

## ABSTRAK

Nama : Damrizal Damoerin  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Disertasi : Perilaku Tanah Residual Depok Yang Dipadatkan Akibat Beban Siklik Satu-Arah Pada Kondisi Terkonsolidasi Takterdrainasi

Penelitian di laboratorium dilakukan untuk meneliti pengaruh perbedaan kecepatan pembebanan dan perbedaan kadar air terhadap Perilaku Tanah Residual Depok Yang Dipadatkan Akibat Beban Siklik Satu-Arah Pada Kondisi Terkonsolidasi Takterdrainasi dengan menggunakan alat triaxial sistim otomatis dan dengan pengontrolan tegangan dan dalam kondisi takterdrainasi. Pemadatan pada contoh uji dilakukan sesuai standar *Proctor* (T-99) dengan kadar air awal masing-masing 40, 45 & 50 %. Contoh uji sebelum pengujian dijenuhkan terlebih dulu sampai koefisien  $B > 0,97$ . Pengujian dilakukan dengan kecepatan pembebanan 0,05 dan 0,50 %/menit, dengan tekanan lateral pada contoh uji, 50 kPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa delta regangan terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan yang tinggi sedangkan tekanan air pori terbesar terjadi pada kadar air yang mendekati optimum, 45 % dan terkecil pada kadar air maximum, 50 %.

Kata kunci :

Triaxial, beban siklik, kadar air, tanah residual, regangan, tekanan air pori, tegangan deviator, kekuatan geser, koefisien B.



## ABSTRACT

Name : Damrizal Damoerin  
Department : Civil Engineering  
Title : Behavior Of Compacted Depok Residual Soils Under One-Way Cyclic Loading On Consolidated Undrained Condition

A laboratory research has been conducted to investigate the loading rate and varies water content effect on Behavior of Compacted Depok Residual Soils Under One-Way Cyclic Loading on Consolidated Undrained Condition by using triaxial automated system apparatus under stress controlled and under undrained condition. The samples were compacted using Standard Proctor (T-99) at water content of 40, 45 and 50 % respectively and saturated until its reached coefficient B higher than 0,97. The tests were carried out at loading rate of 0,05 and 0,5 %/min. and performed a confining pressure of 50 kPa. The test results indicate that the largest delta-strain occurred at peak loading rate and the largest excess pore water pressure occurred to the samples which have water content close to optimum of 45 % and the smallest excess pore water pressure occurred to the samples which have maximum water content of 50 %.

**Key words:**

Triaxial, cyclic loading, water content, residual soils, strain, pore water pressure, deviator stress, shear strength, B coefficient.

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Penelitian Awal Contoh Tanah Uji	5
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN KEPUSTAKAAN & RUMUSAN PENELITIAN	8
2.1 Pendahuluan	8
2.2 Studi Berdasarkan Uji Laboratorium	8
2.3 Ringkasan	34
2.4 Tinjauan Pembebanan Statik	36
2.5 Tinjauan Pembebanan Siklik	39
2.6 Rumusan Penelitian	43
2.7 Hipotesa	43
2.8 Batasan Penelitian	44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	45
3.1 Pendahuluan	45

3.2	Persiapan Contoh Uji	45
3.3	Peralatan	46
3.4	Diagram Alir Penelitian	47
3.5	Program Pengujian	50
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL PENGUJIAN &amp; ANALISIS</b>	<b>51</b>
4.1	Pendahuluan	51
4.2	Pengujian Statik	51
4.3	Pengujian Siklik 1 – Contoh Uji B (w = 40%)	59
4.4	Pengujian Siklik 2 – Contoh Uji C (w = 45%)	63
4.5	Pengujian Siklik 3 – Contoh Uji A (w = 50%)	67
4.6	Pengujian Siklik Gabungan V1	72
4.7	Pengujian Siklik Gabungan V2	76
4.8	Interpretasi Mikroskopik	82
4.9	Foto Hasil Uji	83
<b>BAB IV</b>	<b>KESIMPULAN</b>	<b>88</b>
	<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>91</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	<b>93</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Kondisi tegangan dan garis keruntuhan pada pengujian triaxial (Punmia, 1975)	36
<b>Gambar 2.2</b>	Variasi tipe perilaku elastoplastik (Bardet, 1997)	37
<b>Gambar 2.3</b>	Idealisasi perilaku yang umum digunakan dalam mekanika tanah (Bardet, 1997)	38
<b>Gambar 2.4</b>	Hubungan Kurva Tegangan – Regangan Uji Triaxial Takterkonsolidasi Takterdrainasi (Holtz et al., 1981)	38
<b>Gambar 2.5</b>	Tipe pengujian pembebanan dinamik	39
<b>Gambar 2.6</b>	Effek pembebanan berulang pada kekuatan takterdrainasi Pasir lepas jenuh (Lambe et al., 1979)	40
<b>Gambar 2.7</b>	Hubungan Tegangan Deviator dengan Regangan Axial (Das, 1993)	41
<b>Gambar 2.8</b>	Data Tegangan-Regangan Untuk Uji Triaxial Siklik pada Contoh Stabil & Runtuh dengan $N = 10$ & $200$ (Miller et al., 2000)	41
<b>Gambar 2.9</b>	Hubungan antara Tegangan Deviator dengan Regangan (Salvati et al, 2006)	42
<b>Gambar2.10</b>	Hubungan Tegangan Deviator dengan Regangan dan Tegangan effektive (Bouferra et al, 2007)	42
		Halaman
<b>Gambar 3.1</b>	Alat Triaxial dan contoh tanah terpasang	46
<b>Gambar 3.2</b>	Alat Triaxial dan load cell terpasang	47
<b>Gambar 4.1</b>	Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji D ( $w=40\%$ )	52

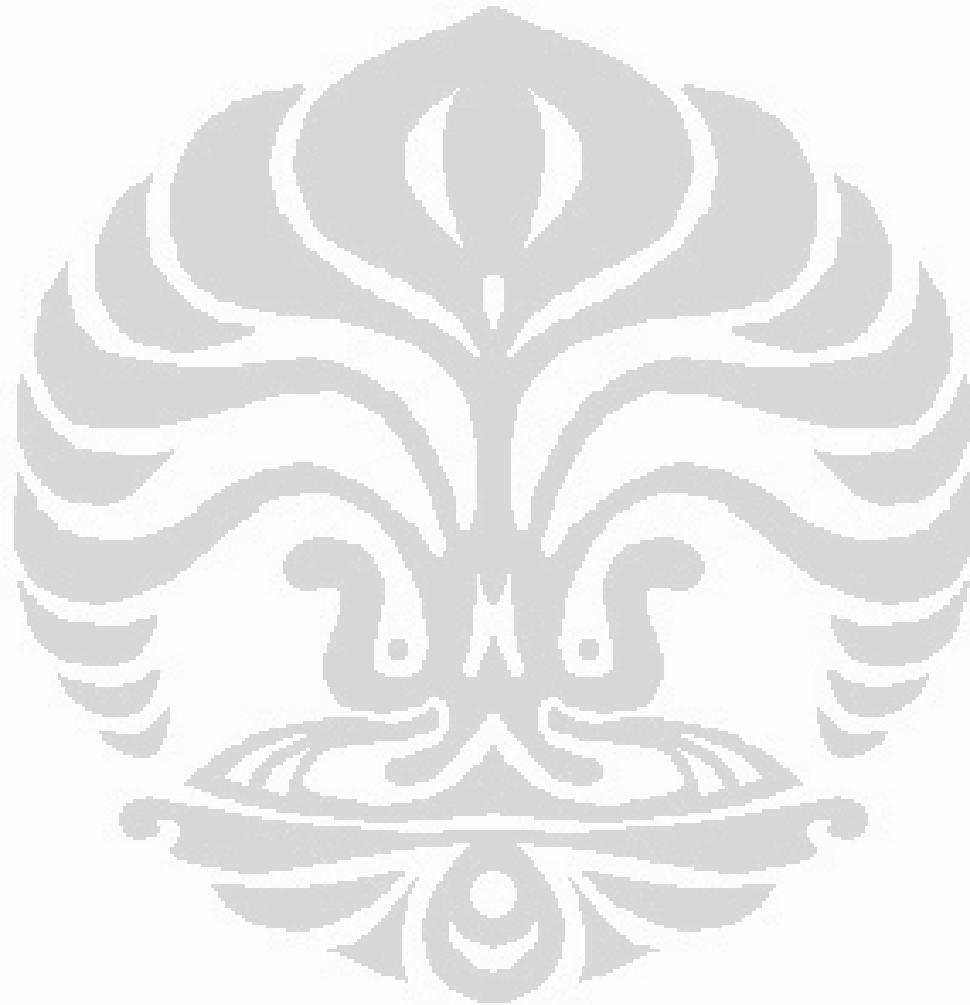
<b>Gambar 4.2</b>	Hubungan antara tekanan air pori dan regangan akibat beban statik pada contoh uji D ( $w = 40\%$ )	52
<b>Gambar 4.3</b>	Hubungan antara tegangan deviator ( $q$ ) dengan tegangan total ( $p$ ) akibat beban statik pada contoh uji D ( $w = 40\%$ )	55
<b>Gambar 4.4</b>	Hubungan antara tegangan deviator ( $q'$ ) dengan tegangan effektive ( $p'$ ) akibat beban statik pada contoh uji D ( $w = 40\%$ )	56
<b>Gambar 4.5</b>	Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji diameter besar & kecil ( $w = 40\%$ )	57
<b>Gambar 4.6</b>	Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji diameter besar & kecil ( $w = 40\%$ )	58
<b>Gambar 4.7</b>	Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40\%$ )	59
<b>Gambar 4.8</b>	Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40\%$ )	60
<b>Gambar 4.9</b>	Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40\%$ )	60
<b>Gambar 4.10</b>	Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40\%$ )	61
<b>Gambar 4.11</b>	Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45\%$ )	63
<b>Gambar 4.12</b>	Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45\%$ )	64
<b>Gambar 4.13</b>	Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45\%$ )	64

<b>Gambar 4.14</b>	Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45\%$ )	65
<b>Gambar 4.15</b>	Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50\%$ )	67
<b>Gambar 4.16</b>	Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50\%$ )	68
<b>Gambar 4.17</b>	Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50\%$ )	68
<b>Gambar 4.18</b>	Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50\%$ )	69
<b>Gambar 4.19</b>	Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,05\%$ /menit	72
<b>Gambar 4.20</b>	Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,05\%$ /men.	73
<b>Gambar 4.21</b>	Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,05\%$ /men.	73
<b>Gambar 4.22</b>	Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,05\%$ /menit	74
<b>Gambar 4.23</b>	Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,5\%$ /menit	77
<b>Gambar 4.24</b>	Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,5\%$ /men.	78
<b>Gambar 4.25</b>	Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,5\%$ /men.	78

<b>Gambar 4.26</b>	Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus akibat beban siklik dengan kecepatan $v = 0,5$ %/menit	79
<b>Gambar 4.27</b>	SEM Contoh Tanah Bersifat Lepas	82
<b>Gambar 4.28</b>	SEM Contoh Tanah Yang Dipadatkan	83
<b>Gambar 4.29</b>	SEM Contoh Tanah Yang Dipadatkan dan Sudah Mengalami Beban Siklik dengan $v = 0,05$ %/menit	83
<b>Gambar 4.30</b>	Contoh Uji 2 - Statik ( $w = 40$ %)	84
<b>Gambar 4.31</b>	Contoh Uji 3 - Statik ( $w = 40$ %)	84
<b>Gambar 4.32</b>	Contoh Uji 4 - Siklik ( $w = 40$ %)	85
<b>Gambar 4.33</b>	Contoh Uji 5 - Siklik ( $w = 45$ %)	85
<b>Gambar 4.34</b>	Contoh Uji 6 - Siklik ( $w = 50$ %)	85
<b>Gambar 4.35</b>	Contoh Uji 7 - Siklik ( $w = 40$ %)	86
<b>Gambar 4.36</b>	Contoh Uji 8 - Siklik ( $w = 45$ %)	86
<b>Gambar 4.37</b>	Contoh Uji 9 - Siklik ( $w = 50$ %)	87

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 3.1</b> Program Pengujian	50
<b>Tabel 4.1</b> Nilai tekanan air pori dan tegangan deviator maximum.	54
<b>Tabel 4.2</b> Nilai Af untuk Jenis-Jenis Tanah (Holtz et al., 1981)	54
<b>Tabel 4.3</b> Nilai tekanan air pori pada regangan maximum	57





## DAFTAR NOTASI

$w$	= kadar air	$LL$	= batas cair
$\epsilon$	= regangan	$N$	= jumlah siklus
$\sigma_c$	= tekanan sell		
$\sigma_d$	= tegangan deviator	$OCR$	= rasio terkonsolidasi berlebih
$\phi_e$	= sudut geser efektif		
$\phi_u$	= sudut geser takterdrainasi	$P_c$	= tekanan prakonsolidasi
		$P_e'$	= tekanan prakonsolidasi efektive
$\gamma_{dry\ max}$	= berat isi kering maximum	$PI$	= indeks plastis
$\Delta$	= delta	$P_o$	= tekanan awal
$\tau_{cyc}$	= kekuatan geser siklik	$P_o'$	= tekanan awal efektif
$C_c$	= indeks kompresi	$q$	= tegangan deviator
$C_e$	= kohesi effective	$q_{max}$	= tegangan deviator maximum
$C_r$	= indeks rekompresi	$q_{min}$	= tegangan deviator minimum
$CSR$	= cyclic stress ratio	$q_{uf}$	= tegangan deviator runtuh
$C_u$	= kohesi takterdrainasi	$S_r$	= tingkat kejenuhan
$D_r$	= kepadatan relative	$t$	= waktu
$e_o$	= angka pori	$w_i$	= kadar air awal
$E_u$	= modulus elastisitas tak	$u$	= tekanan air pori
$f$	= frekwensi		
$G_s$	= berat jenis spesifik		

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> : Wilayah Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan perioda ulang 500 tahun (BSN, 2001)	93
<b>Lampiran 2</b> : Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan axial - %/menit (Taylor, 1943)	94
<b>Lampiran 3</b> : Kurva pemadatan tanah material uji	95
<b>Lampiran 4</b> : Hasil uji konsolidasi-1	96
<b>Lampiran 5</b> : Hasil uji konsolidasi-2	97
<b>Lampiran 6</b> : Hasil uji distribusi ukuran butir	98
<b>Lampiran 7</b> : Hasil uji kimia tanah merah A	99
<b>Lampiran 8</b> : Hasil uji kimia tanah merah B	100

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Daerah Depok terletak disebelah Selatan Jakarta yang berjarak sekitar 20 km dari pusat kota. Bila dilihat dari peta Geologi Jakarta – Bogor (Direktorat Jendral Pertambangan, "Peta Geologi Jakarta – Bogor", 1980), maka tanah daerah Depok adalah merupakan tanah residual sebagai bagian dari hasil pelapukan fasies Gunung Api yang membentang dari Bogor sampai daerah Jakarta bagian Selatan yang dikenal sebagai tanah berwarna merah (*laterite soil*).

Berdasarkan pengujian laboratorium yang pernah dilakukan selama 15 tahun lebih pada waktu belakangan ini oleh Laboratorium Mekanika Tanah FTUI terhadap tanah tidak terganggu yang diambil sampai kedalaman 20 m, pada umumnya tanah residual Depok merupakan tanah terkonsolidasi berlebih (*over consolidated*) dengan OCR (*Over Consolidated Ratio*) antara 2.0 s/d 8.0. Sedangkan berdasarkan uji sifat fisik dijumpai lebih dominan fraksi lanau (*silt*) dari pada pasir dan fraksi lempung (*clay*). Nilai batas cair terdapat antara 50 s/d 90 (%) sedangkan nilai index plastis antara 30 s/d 50 (%).

Sampai saat ini pengujian laboratorium untuk mengetahui perilaku tanah residual Depok hanyalah dengan beban statik saja dan sangat langka menggunakan beban siklik, bila ada tentu sedikit sekali yang telah dilakukan. Ini disebabkan karena masih langkanya peralatan Triaxial Siklik yang tersedia dan juga masih sedikitnya minat untuk melakukan penelitian akibat beban siklik terhadap perilaku tanah residual kohesive yang terhampar di wilayah Jabodetabek

### 1.2 Permasalahan

#### 1.2.1 Material Timbunan

Untuk menunjang pembangunan infrastruktur di wilayah Jabodetabek yang akan berkembang pesat pada tahun-tahun mendatang, dibutuhkan material timbunan yang banyak dan berkualitas baik untuk penggunaan a.l. timbunan oprit jembatan, peninggian badan jalan, pembuatan bendung/tanggul tanah penahan banjir,

penimbunan rawa atau pantai untuk kebutuhan fasilitas pelabuhan, perumahan atau areal rekreasi. Tanah residual Depok yang berwarna merah memenuhi syarat sebagai material timbunan atau untuk lapisan subgrade jalan raya, yang secara umum memiliki nilai CBR terendam  $> 5 \%$ , IP  $< 30 \%$ , pengembangan rendah (tidak expansive), walaupun untuk pelaksanaan di lapangan masih dibutuhkan pengujian secara lebih rinci.

### 1.2.2 Aspek Kegempaan.

Indonesia termasuk sebagai salah satu daerah gempa bumi yang berbahaya didunia. Gempa bumi tidak dapat dihindari dan sampai sekarang ini belum dapat diperkirakan waktu akan terjadinya dan besaran intensitas kekuatannya.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), SNI-03-1726-2002, Indonesia dibagi dalam 6 wilayah gempa yaitu wilayah gempa 1 adalah wilayah dengan kegempaan paling rendah dan wilayah gempa 6 dengan kegempaan paling tinggi. Pembagian wilayah gempa ini didasarkan atas percepatan puncak batuan dasar akibat pengaruh Gempa Rencana dengan periode ulang 500 tahun, dengan percepatan antara 0,10 g – 0,30 g. Sedangkan percepatan puncak muka tanah untuk masing-masing wilayah gempa didasarkan pada masing-masing jenis tanah dengan 3 kategori yaitu tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak, dengan ketebalan maksimum 30 m, yang ditentukan kriterianya berdasarkan kecepatan rambat gelombang geser, nilai N-SPT dan kekuatan geser takterdrainasi. Wilayah Jakarta dan sekitarnya (Jabodetabek) termasuk dalam wilayah gempa 3 dengan percepatan puncak batuan dasar sebesar,  $a = 0,15 \text{ g}$  (BSN, 2001).

Bila ditinjau secara umum, wilayah Jakarta bagian Utara dapat dikategorikan dalam jenis tanah lunak dengan kedalaman tanah keras ( $q_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ ) lebih dari 25 m, sedangkan wilayah Jakarta bagian Selatan dapat dikategorikan dalam jenis tanah sedang dengan kedalaman tanah keras ( $q_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ ) kurang lebih, 20 m.

Peta wilayah gempa dapat dilihat pada Lampiran.

### 1. 2.3 Pengujian Beban Siklik

Penelitian terhadap perilaku tanah kohesive akibat beban siklik telah banyak dilakukan di negara-negara maju seperti Jepang, Amerika Serikat, Inggris dan Perancis. Penelitian lebih banyak dilakukan terhadap lempung terkonsolidasi normal (*Normally Consolidated Clay*) akibat beban siklik bila dibandingkan terhadap lempung terkonsolidasi berlebih (*Over Consolidated Clay*).

Demikian juga referensi yang tersedia sangat sedikit mengenai hubungan terhadap pemulihan kekuatan (*strength recovery*) akibat beban siklik monotonik pasca beban siklik.

Yang termasuk beban siklik atau dinamik a.l. dapat berupa beban gempa, beban mesin generator/ turbin, beban ombak, beban traffic kendaraan bermotor, beban jalan kereta api, beban impak akibat pemancangan tiang atau ledakan.

Bentuk gelombang getaran dari sumber getaran dapat bentuk harmonik atau non harmonik, yang bersifat terus menerus seperti gelombang ombak atau sementara (*transient*) seperti beban gempa.

Pasir lepas yang jenuh air akan lebih mudah mencair (*liquefied*) akibat beban siklik seperti gempa atau mesin kompressor atau generator/ turbin, bila dibandingkan terhadap lempung yang tidak mudah runtuh (*Yasuhara et al., 1992*).

Beban Siklik pada umumnya dapat dibagi dalam 2 bagian yaitu beban siklik-satu arah (*one-way cyclic loading*) dan beban siklik-dua arah (*two-way cyclic loading*). Beban siklik dapat mempunyai pulsa tegangan yang simetris maupun tidak simetris.

Beban siklik-satu arah (*one-way cyclic loading*), hanya menimbulkan tegangan tekan saja tanpa tegangan tarik (*stress reversal*). Kondisi ini banyak dijumpai akibat beban traffic seperti kendaraan bermotor, jalan kereta api, pemadatan dan gempa. Beban siklik-dua arah (*two-way cyclic loading*), menimbulkan tegangan tekan dan tegangan tarik (*stress reversal*). Kondisi ini banyak dijumpai a.l. akibat beban gempa, pondasi mesin, pemancangan tiang dan ledakan.

Penelitian untuk mengevaluasi kekuatan lempung pada suatu timbunan tanah akibat gempa telah dilakukan oleh Seed & Chan, 1966 (dalam Das, 1993), dengan cara melakukan beberapa pengujian triaxial dinamik. Salah satu pengujiannya dilakukan terhadap suatu timbunan tanah lempung kelanauan yang mengalami beban gempa. Beban konsolidasi terus menerus dilapangan disimulasikan dengan memberikan beban statik sampai mencapai regangan, 5 %, setelah itu disimulasikan beban gempa dengan memberikan beban siklik satu-arah dengan pulsa tegangan yang simetris sebanyak 100 siklus, yang mengakibatkan terjadinya tambahan regangan, 11 %, walaupun demikian kekuatan statik tidak pernah terlampaui (Das, 1993).

Perilaku tanah dinamik (*dynamic of soil behavior*) akibat beban siklik atau dinamik sangat penting untuk diteliti karena pada umumnya beban bergerak yang bekerja pada lapisan tanah adalah merupakan beban siklik atau dinamik. Disamping itu Indonesia termasuk dalam wilayah gempa yang rawan, yang tidak mungkin menghindar dari bahaya gempa. Yang perlu dilakukan adalah mempelajari karakteristik beban gempa yang merupakan beban siklik atau dinamik dan pengaruhnya terhadap perilaku kekuatan geser tanah, dalam upaya untuk mengurangi potensi kerusakan pada infrastruktur dan mengurangi bahaya yang akan ditimbulkan oleh gempa terhadap kehidupan manusia.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Untuk mengantisipasi permasalahan yang mungkin timbul pada pembangunan infrastruktur di wilayah Jabodetabek yang akan berkembang pesat dimasa mendatang, yang mana salah satunya adalah masalah timbunan tanah, maka dipandang perlu untuk melakukan penelitian tentang masalah timbunan tanah dari aspek potensi kegempaan dan beban siklik.

Berdasarkan permasalahan yang ada tersebut maka penulis mencoba untuk melakukan penelitian mengenai perilaku tanah residual Depok yang dipadatkan akibat beban siklik satu-arah (*one-way cyclic loading*), yang mensimulasikan kondisi suatu lapisan tanah terkonsolidasi di lapangan pada timbunan tanah

dengan memiliki kadar air berbeda, yang kemudian mengalami beban gempa, yang mana kondisi yang hampir serupa tersebut telah dilakukan sebelumnya oleh Seed & Chan, 1966 (dalam Das, 1993) terhadap timbunan tanah lempung kelanauan.

Penelitian di laboratorium akan dilakukan untuk menyelidiki Perilaku Tanah Residual Depok Yang Dipadatkan Akibat Beban Siklik Satu-Arah Pada Kondisi Terkonsolidasi Takterdrainasi.

Adapun Tujuan dari Penelitian ini adalah untuk meneliti Pengaruh Perbedaan Kecepatan Pembebanan & Perbedaan Kadar Air pada Perilaku Tanah Residual Depok Yang Dipadatkan Akibat Beban Siklik Satu-Arah Pada Kondisi Terkonsolidasi Takterdrainasi, dalam hal hubungan karakteristik antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, dengan cara mensimulasikan kondisi suatu lapisan tanah terkonsolidasi di lapangan pada timbunan tanah yang mempunyai kadar air berbeda, kemudian mengalami beban gempa dengan mensimulasikannya dengan beban siklik satu-arah.

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam bidang ilmu pengetahuan khususnya bidang geoteknik yang mempunyai aspek geologi lokal seperti tanah residual Depok.

#### 1.4 Penelitian Awal Contoh Tanah Uji

Untuk menunjang Penelitian yang akan dilakukan maka terlebih dulu dilakukan Penelitian Awal pada Contoh Tanah Uji. Contoh tanah uji terganggu, yang diambil di area Fakultas Teknik U.I. dengan kedalaman antara 1.50 – 2.00 m. Tanah tersebut kemudian dipadatkan sesuai dengan Standar *Proctor (T-99)* (ASTM D-698), sehingga diperoleh :

$$\omega_{\text{optimum}} = 46,00 \%$$

$$\gamma_{\text{dry}_{\text{max}}} = 11,10 \text{ kN/m}^3$$

Kurva pemadatan tanah material uji, dapat dilihat pada Lampiran. Sebagai tahap awal, tanah dengan kadar air, 40%, dilakukan pengujian laboratorium berupa uji

triaxial terkonsolidasi takterdrainasi (*Consolidated Undrained*), uji konsolidasi dan sifat fisik serta uji unsur kimia dengan hasil sbb:

$C_u$	(kPa) :	72,41	
$\phi_u$	(o) :	11,54	
$C_e$	(kPa) :	77,113	
$\phi_e$	(o) :	12,06	
$E_u$	(kPa) :	5000,00	
$S_r$	(%) :	100,00	
$w_i$	(%) :	40,00	
$e_o$	:	1,65	; 1,65
$P_o$	(kPa) :	25,375	; 25,375
$P_c$	(kPa) :	164,07	; 109,99
OCR	:	6,47	; 4,34
$C_r$	:	0,05	; 0,50
$C_c$	:	0,50	; 0,49
$G_s$	:	2,75	
LL	:	90,00	
PI	:	30,00	
Pasir	(%) :	1,00	
Lanau	(%) :	57,00	
Lempung	(%) :	42,00	
$SiO_2$	(%) :	43,48	; 43,43
$TiO_2$	(%) :	1,73	; 1,69
$Al_2O_3$	(%) :	37,50	; 38,09
$Fe_2O_3$	(%) :	15,55	; 15,47
CaO	(%) :	0,178	; 0,0618
dll.	(%) :	1,562	; 1,2582

Hasil rinci uji konsolidasi, uji distribusi ukuran butir, uji kimia tanah merah, dapat dilihat pada Lampiran.



Sebelum pengujian statik dan siklik, contoh uji terlebih dulu dijenuhkan sampai mencapai nilai  $B \geq 0,98$ . Tanah yang diuji termasuk dalam kondisi terkonsolidasi berlebih (*over consolidated*) sebagaimana yang ditunjukkan oleh nilai OCR antara 4,34 – 6,47. Untuk kebutuhan pengujian triaxial siklik satu-arah, dipersiapkan contoh uji yang dipadatkan dengan kadar air sekitar 40 %, 45 % & 50 %, dengan ukuran contoh,  $d = 10$  cm dan  $h = 20$  cm.

## 1.5 Sistematika Penulisan

- BAB I PENDAHULUAN**  
diuraikan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, penelitian awal contoh tanah uji dan sistematika penulisan.
- BAB II TINJAUAN KEPUSTAKAAN DAN RUMUSAN PENELITIAN**  
diuraikan tentang studi kepustakaan oleh peneliti terdahulu, yang melakukan studi terhadap tanah lempung terkonsolidasi normal, tanah yang dipadatkan, tanah yang distabilisasi dan pasir, ringkasan tinjauan kepustakaan, tinjauan pembebanan statik & siklik, rumusan penelitian, hipotesa dan batasan penelitian.
- BAB III METODOLOGI PENELITIAN**  
diuraikan mengenai pendahuluan, persiapan contoh uji, peralatan, diagram alir dan program pengujian.
- BAB IV HASIL PENGUJIAN & ANALISIS**  
diuraikan mengenai hasil pengujian statik terhadap contoh uji dengan kadar air 40 (%) dan pengujian beban siklik satu-arah terhadap contoh uji dengan kadar air 40, 45, 50 (%) akibat 2 kecepatan pembebanan yaitu 0,05 & 0,5 (%/menit). Selain itu juga diuraikan hasil foto SEM dan foto hasil uji.
- BAB V KESIMPULAN**  
diuraikan mengenai kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis.

## BAB II

### TINJAUAN KEPUSTAKAAN DAN RUMUSAN PENELITIAN

#### 2.1 Pendahuluan

Tujuan dari tinjauan kepustakaan ini adalah untuk membahas penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, yang berkaitan dengan pengujian triaxial siklik satu arah maupun dua arah pada tanah lempung, pasir maupun lanau, di laboratorium dan di lapangan.

Rumusan Penelitian disarikan setelah mempertimbangkan dan mempelajari apa saja yang telah dilakukan peneliti sebelumnya dan apa yang akan dilakukan oleh peneliti sendiri pada saat ini. Untuk mencapai tujuan dan apa yang diinginkan, direncanakan suatu seri uji contoh tanah mendekati kadar air optimum dan dibawah optimum.

#### 2.2 Studi Berdasarkan Uji Laboratorium

##### 2.2.1 Tanah Asli

Jitno et al. (1991) telah melakukan studi pada lempung laut tidak terganggu (*Cloverdale clay*) yang terkonsolidasi normal. Contoh lempung yang diambil berbentuk blok pada penggalian terbuka, yang mempunyai nilai  $W_n = 51\%$ ,  $LL = 51\%$ , dan  $PI = 27\%$ . Semua contoh dikonsolidasikan dengan tekanan hidrostatis sebesar tegangan sel efektif,  $\sigma_c = 200$  kPa, sebelum pembebanan siklik. Pembebanan siklik yang diterapkan menggunakan '*symmetric two-way sinusoidal deviator stress pulse*' pada frekuensi 0,10 Hz. Dibawah setiap level tegangan siklik, pembebanan siklik dibatasi bila suatu besaran regangan axial maksimum sudah dicapai.

Ratio kekuatan tak terdrainasi tekan  $\frac{S_{uc}}{\sigma_c} = 27$  dan tarik  $\frac{S_{uc}}{\sigma_c} = 0,24$ .

Menurut Jitno et al. 1991) yang mengutip dari Andersen (1975); Azzouz et al. (1989); Fisher et al. (1976) dan Takashi et al. (1980), menyatakan bahwa pengembangan regangan axial maximum dengan jumlah siklus dibawah variasi

level tegangan siklik, yang ditentukan sebagai  $\frac{\tau_{cyc}}{S_{uc}}$ , untuk lempung yang diuji adalah sama seperti yang telah dilaporkan untuk lempung yang lain.

Amplitudo regangan axial dan regangan radial meningkat keduanya sesuai jumlah siklus pada suatu nilai  $\frac{\tau_{cyc}}{S_{uc}}$  yang telah ditentukan dan terhadap sejumlah siklus yang diberikan akan meningkatkan tegangan siklik. Tekanan pori yang dihasilkan karena pembebanan siklik mengakibatkan pengurangan tegangan effective lempung terkonsolidasi normal.

Menurut Jitno et al. (1991) yang mengutip dari Andersen (1975) dan Koutsoftas (1978), menyatakan bahwa ini telah seringkali diperhatikan sebagai hal serupa yang terjadi akibat kesamaan efek konsolidasi berlebih yang disebabkan oleh sejarah pengurangan beban yang nyata .

Terhadap lempung *Cloverdale* yang dibebani siklik maka 'lintasan tegangan efektif monotonik pasca-siklik' menyerupai tegangan lempung terkonsolidasi berlebih, pada suatu kesamaan yang disebabkan ratio konsolidasi berlebih dalam kondisi tekan dan tarik.

Ratio konsolidasi berlebih yang disebabkan karena beban siklik pada prinsipnya senilai (4.97 – 5.85). Sedangkan perilaku tegangan lempung terkonsolidasi berlebih dengan OCR = 4.97, juga ditunjukkan sebagai perbandingan dengan perilaku pasca siklik. Tegangan lempung terkonsolidasi berlebih adalah lebih kuat bila dibandingkan dengan konsolidasi berlebih yang disebabkan oleh beban siklik karena rendahnya level tegangan amplitudo tegangan siklik.

Dari studi yang telah dilakukan oleh Jitno et al. didapat beberapa hasil sbb. :

- beban siklik menyebabkan suatu penurunan kekakuan yang kuat dan kehilangan kekuatan pada suatu lempung terkonsolidasi normal pasca siklik.
- kehilangan dalam kekakuan adalah dihubungkan yang tidak hanya amplitudo regangan maksimum yang disebabkan karena beban siklik.

- kehilangan dalam kekuatan tak terdrainasi pasca siklik adalah suatu fungsi keduanya dari regangan maksimum dan level tegangan siklik.
- tekanan air pori yang dihasilkan karena pembebanan siklik mengakibatkan pengurangan tegangan efektif lempung terkonsolidasi normal.

Yasuhara et al. (1992), telah melakukan studi mengenai 'Efek beban siklik terhadap kekuatan geser tak terdrainasi dan kompresibilitas dari tanah lempung Ariake terkonsolidasi normal'.

Mereka berpendapat bahwa secara umum sudah diakui tanah lempung mempunyai tahanan yang lebih besar terhadap beban siklik bila dibandingkan dengan pasir. Pasir lepas yang jenuh akan menjadi mencair (*liquefied*) akibat beban siklik sedangkan lempung tidak mudah runtuh akibat beban siklik atau beban sementara (*transient*).

Keadaan ini benar terutama untuk lempung dalam kasus akibat beban siklik jangka pendek seperti gempa. Bagaimanapun juga suatu kejadian beban siklik yang diterapkan pada lempung dan kemudian berlanjut untuk periode jangka panjang, situasi menjadi berbeda. Dalam kasus ini periode drainasi antara rangkaian beban siklik tak terdrainasi mungkin terjadi.

Menurut Yasuhara et al. (1992) yang mengutip dari Brown et al. (1977) dan Matsui et al (1978), menyatakan bahwa berdasarkan studi yang telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan peralatan triaxial dan juga mengutip dari Andersen et al.(1976); Ohara et al. (1986, 1988); Yasuhara et al. (1987, 1988, 1989a, 1989c) menyatakan bahwa menggunakan peralatan geser sederhana, beban siklik dengan periode drainasi dapat memperbaiki terhadap tahanan beban siklik selanjutnya untuk lempung terkonsolidasi normal melalui kenaikan regangan (*strain hardening*) tapi ini tidak selalu untuk lempung terkonsolidasi berlebih.

Beban siklik jangka panjang takterdrainasi untuk keduanya terkonsolidasi normal dan terkonsolidasi berlebih, mungkin menunjukkan keruntuhan siklik karena pengembangan tekanan pori berlebihan dan siklik mengakibatkan regangan geser.

Perilaku lempung akibat beban siklik takterdrainasi adalah lebih kompleks dari pada pasir, sebab ketergantungannya pada suatu faktor seperti waktu (*time-*

*dependent*), rangkak (*creep*) dan lamanya prakonsolidasi (*preconsolidation periods*) yang dapat diabaikan pada perilaku siklik pasir. Walaupun disini terdapat banyak kasus sejarah pada lempung yang diperhatikan berhubungan dengan penurunan dan stabilitas, yang disebabkan oleh situasi beban siklik seperti : gempa bumi, struktur lepas pantai akibat aksi gelombang dan perkerasan jalan, atau lapisan subgrade jalan kereta akibat situasi beban trafik, “sedikit riset-riset sistematik yang telah dilakukan”.

Menurut Yasuhara et al. (1992) yang mengutip dari Andersen et al (1988), menyatakan bahwa tidak cukupnya pengetahuan tentang beban siklik terhadap lempung telah terakumulasi untuk memberikan prosedur desain untuk pondasi diatas lempung akibat situasi beban siklik, dengan catatan pengecualian pekerjaan baru-baru ini.

Dari suatu survei kepustakaan mengenai perilaku uji siklik pada lempung, yang meliputi 20 tahun yang lalu, yang berikut ini telah diakui sebagai hal yang penting bilamana mempertimbangkan beban siklik pada tanah lempung sbb. :

- Pengurangan kekakuan siklik (*cyclic stiffness*)
- Penurunan siklik (*cyclic displacement*)
- Keruntuhan siklik atau fatik (*cyclic or fatigue failure*)
- Perilaku geser statik takterdrainasi pasca siklik (*post-cyclic undrained static shearing behaviour*).
- Efek drainasi pada perilaku siklik.

Prosedur keseluruhan untuk uji triaxial siklik, dibagi dalam 2 kategori yaitu beban siklik jangka pendek dan jangka panjang. Selama beban siklik tak terdrainasi jangka pendek seperti akibat gempa bumi, suatu contoh mungkin mengalami keruntuhan siklik melebihi level tegangan geser tertentu atau jumlah siklus beban tertentu. Dalam kasus pasir jenuh air, keruntuhan jenis ini disebut liquifaksi.

Hasil uji triaxial siklik takterdrainasi ditunjukkan dalam hubungan antara regangan dan regangan ,rasio tegangan siklik, regangan axial dengan jumlah siklus beban dengan kurva satu arah dan dua arah. Sedangkan dari uji triaxial

statik pasca siklik yang diikuti drainasi, ditunjukkan titik keruntuhan dalam hubungan  $p' - q$  ruang.

Dari studi yang telah dilakukan oleh Yasuhara et al. berdasarkan uji Triaxial Siklik pada lempung Ariake terkonsolidasi normal, mengenai perilaku kekuatan dan deformasi selama dan sesudah beban siklik, diperoleh hasil sbb. :

- untuk mengetahui perilaku lempung terkonsolidasi normal akibat beban siklik, perlu memperhitungkan tentang keruntuhan siklik, kekuatan statik tak terdrainasi pasca siklik, penurunan akibat dibebani lagi pasca siklik dan kekuatan tak terdrainasi pasca siklik dengan drainasi .
- kekuatan geser takterdrainasi lempung menurun, karena beban siklik tanpa drainasi.
- Terjadi regangan volume rekompresi , selama dissipasi tekanan pori berlebihan akibat beban siklik tak terdrainasi.

Hyde et al. (1993), telah melakukan studi pada lempung laut terkonsolidasi normal, plastis tinggi, lempung Arieke, dengan pengujian triaxial takterdrainasi siklik satu arah. Mengamati pengembangan tekanan air pori selama beban siklik., yang merupakan peristiwa tergantung waktu dan tidak tergantung pada frekwensi.

Telah banyak penelitian mengenai beban siklik pada tanah yang menggunakan pengujian triaxial satu arah, yang mana tegangan deviator adalah tekan yang merupakan tegangan utama dan tidak terjadi tegangan sebaliknya.

Menurut Hyde et al. (1993) yang mengutip dari Yamanouchi et al. (1975) dan Hyodo et al. (1988), menyatakan bahwa walaupun tipe beban ini tidak cocok untuk pemodelan situasi dimana tegangan tarik terjadi seperti dibawah struktur gravitasi lepas pantai akibat beban gelombang, banyak permasalahan rekayasa yang dapat diselesaikan berdasarkan data beban satu arah yang disederhanakan. Ini dapat termasuk lapisan subgrade jalan raya dan kereta api, pondasi mesin yang berat dan konstruksi penahan gelombang.

Menurut Hyde et al. (1993) yang mengutip dari Wilson et al. (1974) dan Lee et al. (1976), menyatakan bahwa telah ditunjukkan bahwa pergerakan tekanan air pori akibat beban siklik secara prinsip merupakan suatu proses yang tergantung

pada regangan sebagaimana. Menurut Hyde et al. (1993) yang mengutip dari Hyde et al. (1976) dan Singh et al. (1968), menyatakan bahwa Hyde et al. mengembangkan pekerjaan dari Singh et al. pada rangkai takterdrainasi lempung untuk menetapkan suatu hubungan antara kecepatan regangan dan waktu untuk beban berulang satu arah pada lempung berlanau:

$$\varepsilon = at^\lambda$$

dimana,

- $\varepsilon$  = regangan per unit waktu
- $t$  = waktu
- $a$  = kecepatan regangan pada unit waktu
- $\lambda$  = konstanta *decay* kecepatan regangan

Menurut Hyde et al. (1993) yang mengutip dari Hyde et al. (1985), menyatakan bahwa juga menunjukkan bahwa tekanan air pori meningkat akibat beban siklik takterdrainasi, contoh yang awalnya terkonsolidasi normal menjadi terkonsolidasi berlebih dan runtuh pada kondisi yang sama seperti contoh yang mulanya terkonsolidasi berlebih tinggi. Proses konsolidasi berlebih ini mengijinkan pengembangan kriteria runtuh pada beban siklik, melalui definisi untuk batasan lintasan tegangan efektif siklik.

Jumlah contoh uji pada lempung Arieke sebanyak 23 buah. Contoh dibuat dengan diameter = 35 mm dan tinggi = 80 mm, yang diambil dari suatu cetakan lempung yang telah dikonsolidasikan dengan kondisi  $K_0$  dari suatu tempat konsolidasi yang besar dengan tekanan vertikal 59 kPa.

Sebelum uji triaxial dilakukan, contoh dikonsolidasikan isotropis selama 24 jam dengan tekanan lateral masing-masing sebesar 100, 200 dan 300 kPa.

Setelah konsolidasi isotropis, contoh dibebani beban siklik tekan satu arah dengan amplitudo konstan, dengan menggunakan sistem beban pneumatik pengontrolan tegangan (*stress-controlled*).

Tegangan deviator bervariasi secara sinusoidal dari nol sampai nilai puncak. Pengujian dilakukan pada frekwensi 0,1, 1 dan 3 Hz. Waktu pengujian contoh

bervariasi antara 20 menit sampai 20 hari, dengan mayoritas contoh diuji selama 1 jam untuk frekuensi 1 Hz.

Dari studi yang telah dilakukan oleh Hyde et al. terhadap lempung laut terkonsolidasi normal, diperoleh hasil berikut:

- pengujian pada lempung Ariake dengan plastisitas tinggi, menunjukkan pengembangan air pori dan regangan akibat beban berulang axial satu arah adalah tidak tergantung pada frekuensi beban dan pada umumnya merupakan peristiwa rangkai yang tergantung pada waktu.
- total regangan axial dan tekanan air pori yang dinormalisasikan adalah suatu fungsi waktu dan level tegangan geser yang dinormalisasikan.
- proyeksi garis kondisi kritis (*critical state line*) dalam ruang  $\frac{q}{p_e}$  dan  $\frac{p'}{p_e}$ , dapat ditentukan sebagai kriteria keruntuhan tegangan efektif untuk beban berulang.
- contoh yang memiliki lintasan tegangan efektif puncak yang berpindah terhadap garis ini melampaui regangan 5 %, dipertimbangkan menjadi runtuh.

Konrad et al. (1993), telah melakukan studi laboratorium untuk menyelidiki perilaku campuran lanau silika dan lempung kaolin terkonsolidasi takisotropis terhadap tegangan tekan triaxial siklik takterdrainasi tanpa tegangan geser tarik. Campuran tanah antara kandungan 100 % lanau sampai 40 % lempung.

Efek kecepatan regangan pada pengujian triaxial siklik menginduksi distribusi tekanan pori yang tidak seragam. Efek tekanan pori yang tidak seragam yang dihubungkan terhadap kecepatan regangan siklik resultan rata-rata, sementara parameter kekuatan dinamik dihubungkan terhadap kecepatan regangan siklik maximum.

Pengujian dilakukan pada 20 contoh dengan tekanan lateral sebesar 300 kPa dan tekanan balik sebesar 240 kPa, untuk menjamin kejenuhan contoh dan pengukuran tekanan pori berlebihan selama geser takterdrainasi dengan nilai  $B > 0,98$ . Frekwensi beban siklik yaitu 0,5, 0,2 & 0,05 Hz.



Hasil pengujian triaxial siklik tanpa tegangan tarik pada umumnya disajikan dalam bentuk hubungan antara beban kerja dengan regangan axial tekan, tekanan pori dengan jumlah siklus dan regangan axial tekan dengan jumlah siklus. Semua pengujian siklik menunjukkan perilaku yang sama. Beban yang bekerja pada semua pengujian selalu lebih besar nol yang berarti contoh tanah tidak mengalami tegangan geser tarik.

Menurut Konrad et al. (1993) yang mengutip dari Bishop et al. (1962), menyatakan bahwa suatu distribusi tekanan pori yang takseragam adalah kemungkinan hasil dari takseragam dalam tegangan karena penahanan ujung dalam pelaksanaan uji triaxial. Perluasan untuk terjadinya persamaan tekanan pori tergantung pada permeability, ukuran dan kecepatan pengujian.

Diamati perbedaan maksimum antara tekanan pori yang diukur pada tengah dan dasar pada contoh dengan campuran 20 % lempung dan 80 % lanau pada kecepatan regangan yang berbeda.

Dari hasil studi yang telah dilakukan oleh Konrad et al. terhadap perilaku campuran lanau silika dan lempung kaolin yang terkonsolidasi takisotropis akibat tegangan tekan triaxial siklik, diperoleh hasil berikut:

- regangan tekan residual yang besar dan regangan siklik yang kecil, menonjol pada pengujian-pengujian siklik takisotropis tanpa tegangan geser tarik untuk semua contoh antara kandungan campuran 100 % lanau sampai dengan 40 % lempung.
- pengaruh kecepatan regangan pada pengujian triaxial siklik mungkin menyebabkan distribusi tekanan pori takseragam dalam suatu contoh dan mempengaruhi posisi penutup keruntuhan dinamik (*dynamic failure envelope*).
- untuk contoh dengan campuran lempung 20% dan lanau 80%, kecepatan regangan siklik rata-rata berhubungan terhadap rasio tegangan siklik

$$CSR = \frac{\sigma'_{dc}}{2\sigma_c}$$

dan rasio tegangan yang menyebabkan tegangan geser statik.

Yasuhara (1994), telah melakukan studi terhadap tanah kohesive Arieke, Fukushima, Crown, Higashi Osaka, Keuper marl, Drammen, Bootlegger dan gambut Akita. Menurut Yasuhara (1994), yang mengutip dari Thiers et al. (1969); Okumura (1971, 1978); Brown et al. (1975); Castro et al. (1976); Andersen et al. (1976); Koutsoftas (1978); Matsui et al. (1980, 1992); Yasuhara et al. (1983b, 1992); Yasuhara (1985); Hyde et al. (1986); Jitno et al. (1991), menyatakan bahwa suatu periode yang singkat dari beban siklik tanpa drainasi pada tanah kohesive yang menyebabkan penurunan dalam tegangan efektif seperti kerusakan struktur partikel tanah dan ini mungkin menunjukkan penurunan dalam kekuatan takterdrainasi dan modulus elastisitas (*stiffness*).

Dalam situasi waktu yang lama (*long-term*) seperti beban gelombang lautan, periode drainasi mungkin termasuk diantara rangkaian beban siklik tak terdrainasi. Ini memperbaiki tahanan terhadap beban siklik selanjutnya. Menurut Yasuhara (1994), yang mengutip dari Andersen et al (1976); Brown et al (1977); Sangrey (1977); Matsui et al. (1978); Yasuhara et al. (1983a); Ohara et al. (1987); Yasuhara et al. (1991), menyatakan bahwa khususnya sifat-sifat tanah terkonsolidasi normal dapat diperbaiki.

Terjadi penurunan kekuatan (*strength degradation*) tak terdrainasi pasca siklik yang diprediksi dengan uji geser triaxial siklik terdrainasi, diamati pada lempung Arieke, Crown & Fukushima.

Menurut Yasuhara (1994), yang mengutip dari Matsui et al. (1980, 1992); Yasuhara et al. (1983, 1985, 1992); Oikawa et al. (1977) dan Bahr (1991), menyatakan bahwa sangat sedikit referensi dalam hubungan terhadap pemulihan kekuatan (*strength recovery*) karena drainasi setelah beban siklik dari pada terhadap penurunan kekuatan kecuali yang telah dilakukan oleh Matsui et al.; Yasuhara et al.; Oikawa et al. dan Bahr.

Dari studi yang telah dilakukan oleh Yasuhara pada tanah terkonsolidasi normal didapat beberapa hasil berikut :

- beban siklik terdrainasi juga memperbaiki kekuatan tak terdrainasi lempung lebih dari pada beban siklik takterdrainasi yang diikuti dengan drainasi.

- parameter experimental,  $A_0$ ,  $C_c$  &  $C_s$ , termasuk dalam methoda yang diusulkan yang ditentukan dari suatu hubungan empiris yang diberikan sebagai fungsi dari index plastis.

Pradhan et al. (1999), berpendapat bahwa penelitian mengenai kekuatan geser takterdrainasi siklik pada lempung sedikit mendapat perhatian, sebab tanah lempung dipercaya menunjukkan kerusakan tidak drastis bila dibandingkan dengan liquifaksi pasir selama gempa bumi.

Bagaimanapun juga, pada beberapa gempa bumi sebelumnya seperti Alaska, Niigata (1964), Michiocan (1985), Sagueney (1987) dan Kushiro-oki (1993), kerusakan pada lapisan lempung seperti penurunan, deformasi lateral atau keruntuhan pondasi telah dilaporkan dan keinginan untuk menentukan kekuatan geser tak terdrainasi siklik pada lempung telah menjadi penting.

Walaupun kerusakan yang besar selama gempa bumi Michiocan di Mexiko tahun 1985 telah dianggap sebuah yang ekstrim, menurut Pradhan et al. (1999) yang mengutip dari Mendoza et al. (1987), menyimpulkan bahwa banyak gedung yang dimobilisasi oleh kehilangan daya dukung pondasi ditemukan pada lempung kota Mexiko yang sangat lunak dan plastisitas tinggi.

Sebuah contoh yang lain menyingung pada kerusakan yang dipicu oleh gempabumi dihubungkan terhadap tanah berbutir halus, menurut Pradhan et al. (1999) yang mengutip dari Stark et al. (1998), menyatakan bahwa melakukan investigasi ulang terhadap kekuatan puncak dan residual pada lempung Bootlegger sensitive untuk memastikan apakah kerusakan terhadap lereng lempung sensitive dipicu oleh liquifaksi pasir atau kehilangan kekuatan lempung sensitive.

Penyelidikan yang sama dilakukan terhadap dermaga perikanan di San Fransisco selama gempabumi Ioma Prieta (1986), menurut Pradhan et al. (1999) yang mengutip dari Boulenger et al. (1998), menyatakan bahwa melakukan uji triaxial pasca siklik pada lanau plastis yang dilandasi pasir dan disimpulkan bahwa perpindahan lateral tanah telah disebabkan oleh perlemahan siklik dari lanau plastis.

Kasus-kasus yang telah disinggung diatas telah disarankan untuk kebutuhan penyelidikan lebih lanjut yang tidak hanya pada kekuatan geser tapi juga kekakuan siklik tanah berbutir halus (*the cyclic stiffness of fine-grained soils*).

Suatu pengujian Round Robin (*Round Robin Test – RRT*), untuk menentukan kekuatan geser triaxial takterdrainasi siklik terhadap lempung Fujimori di Jepang, yang didukung oleh 27 laboratorium.

Ditunjukkan hubungan antara rasio tegangan siklik  $\frac{\sigma_d}{2\sigma_c'}$  dengan jumlah siklus

beban dan index plastis antara tegangan deviatorik ( $q$ ) dengan tegangan prinsipal rata-rata efektif ( $p'$ ) dan regangan vertikal ( $\epsilon_a$ ).

Dari hasil studi yang telah dilakukan oleh Pradhan et al. didapat hasil sbb. :

- dicapai regangan maximum axial, 15 % akibat beban statik dan 10 % akibat beban siklik.
- kekuatan geser siklik takterdrainasi, meningkat dengan kenaikan index plastis.
- kekuatan geser siklik dapat diestimasi dari kekuatan geser statik :

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma_c'} = 0,588 \frac{S_u}{\sigma_c'}$$

$$\frac{\sigma_d}{2S_u} = \frac{\tau_d}{S_u} = 0,428 N_c^{-0,428}$$

kekuatan geser tak terdrainasi statik  $S_u = 0,5 q_{max}$

tekanan konsolidasi efektif awal  $\sigma_c'$

tekanan geser siklik  $\tau_d$

Masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut, untuk mencari hubungan yang lebih teliti antara kekuatan tak terdrainasi siklik dengan index plastis, pada lempung tak terganggu yang berbeda.

Miller et al. (2000), telah melakukan penelitian tentang kekuatan geser siklik pada lapisan dasar lunak suatu jalan kereta api. Studi laboratorium telah dilakukan untuk meneliti perilaku tanah lempung lunak yang dipadatkan. Selain itu juga telah dilakukan studi yang komprehensif di lapangan pada suatu bagian dari

lokasi uji untuk mengetahui kualitas jalan dan penyelesaian permasalahan yang disebabkan oleh beban sumbu berat.

Tujuan dari studi ini adalah untuk menentukan besaran perilaku hubungan Tegangan – Regangan ( $\sigma - \epsilon$ ) suatu tanah subgrade yang tak jenuh akibat suatu rentang simulasi kondisi di lapangan akibat lalu lintas kereta api.

Perilaku penggeseran siklik pada lempung yang jenuh telah dibicarakan dalam publikasi-publikasi yang banyak, menurut Miller et al. (2000) yang mengutip dari Brown et al. (1975); Castro et al. (1976); Van Eekelen et al. (1978); Raymond et al. (1979); Matsui et al. (1980); Yasuhara et al. (1992), menyatakan bahwa tetapi sebagai perbandingan relative sedikit yang telah diuji kekuatan geser siklik pada tanah tidak jenuh.

Studi ini berkeinginan untuk mengetahui kekuatan geser *subgrade* lempung lunak yang tak jenuh air (*unsaturated*) akibat beban berulang. Pendekatan dengan menggunakan suatu uji triaxial siklik yang mana getaran (pulsa) tegangan mensimulasikan beban dari kereta api yang sedang berjalan.

Menurut Miller et al. (2000) yang mengutip dari Bishop et al. (1962), menunjukkan bahwa kecepatan regangan sangat rendah (*very slow strain*) dibutuhkan untuk menghasilkan tekanan air pori yang seragam dalam sebuah contoh triaxial tak jenuh selama penggeseran, umumnya kurang dari 1% regangan axial perjam.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Miller et al. terhadap perilaku tanah subgrade lunak akibat beban siklik didapat hasil sbb. :

- Suatu tanah yang dibebani berulang, rasio tegangan siklik kritis atau kekuatan geser siklik yang dinormalisasikan, terdapat diatas pada saat tanah akan mengalami keruntuhan geser.
- Untuk tanah lempung dengan plastisitas tinggi yang diuji, kekuatan geser siklik yang dinormalisasikan, sensitiv terhadap tingkat kejenuhan awal dalam rentang yang relatif pendek, yang ditemui dengan  $S_r$  antara 90 dan 100 %.
- Untuk uji yang dilakukan dengan bidang drainasi terbuka dengan contoh

- tidak jenuh pada kadar air natural, kekuatan geser siklik yang dinormalisasikan menurun, sesuai kenaikan tingkat kejenuhan awal atau merupakan fungsi tingkat kejenuhan.
- Untuk uji pada tanah yang dijenuhkan dengan tekanan balik (*back pressure*) dengan bidang drainasi tertutup, kekuatan geser siklik tak terdrainasi yang dinormalisasikan antara 0,50 - 0,79, sedangkan kekuatan geser tak terdrainasi yang dinormalisasikan dari uji statik pada tekanan sell yang sama adalah 0,89.

Koike et al. (2002) telah melakukan penelitian terhadap perilaku tiga jenis tanah berbeda yang dipadatkan akibat beban siklik. Adapun tujuannya adalah untuk mensimulasikan fenomena dinamik tanah yang terjadi di lapangan dengan cara percobaan di laboratorium., sehingga akan memberikan sumbangan data terhadap perilaku tanah dinamik. Didapat suatu hubungan antara rasio amplitudo tegangan, berat isi, kadar air tanah dan tekanan air pori serta jumlah beban dan regangan awal.

Bahan uji yang digunakan berupa 3 jenis tanah, yaitu : lempung plastisitas tinggi (CH), lanau plastisitas rendah (ML), dan lanau berpasir (SM) – non plastis. Ketiga jenis tanah tersebut dipadatkan sesuai peraturan uji Jepang (Japanese Test Code) dengan 3 lapis pemadatan yang memperoleh 25 pukulan masing-masing lapis yang menghasilkan energi  $1,74 \text{ kJ/m}^3$ , sehingga diperoleh kadar air optimum masing-masing sebesar 25,29 dan 20 %.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Koike et al. didapat beberapa hasil sbb.:

- Dari hasil uji triaxial takterdrainasi takterkonsolidasi pada 3 jenis tanah (CH, ML & SM), tidak terdapat harga puncak pada kurva  $\sigma$ - $\epsilon$ .
- Penurunan dan tekanan air pori akibat exitasi sinusoidal menunjukkan sangat ketergantungan pada frekwensi yang diterapkan.
- Hubungan antara jumlah beban siklik dan tekanan air pori, bertemu pada level yang spesifik dengan kenaikan jumlah beban siklik. Secara bersamaan tekanan air pori tumbuh pada kenaikan kecepatan jumlah beban siklik

Thammathiwat et al. (2004), telah melakukan studi mengenai perilaku kekuatan geser siklik dan karakteristik tekanan pori dari lempung lunak Bangkok dengan menggunakan alat triaxial siklik, pada kondisi kontrol tegangan dan takterdrainasi. Dan berpendapat bahwa studi tentang perilaku deformasi siklik akibat beban trafik yang dilakukan dengan alat yang lebih kompleks seperti uji triaxial siklik, akan dapat mensimulasikan kondisi dilapangan dan pengukuran tekanan air pori berlebih sehingga hasilnya dapat lebih diterima dari hasil yang lain.

Contoh uji takterganggu diambil pada kedalaman 7,50 – 8 m, yang terletak di Fakultas Teknik Universitas Thammasat. Hasil uji disajikan dalam bentuk grafik-grafik yang menunjukkan hubungan antara regangan axial, tekanan air pori, modulus geser & rasio redaman dengan jumlah siklus (N) dan antara modulus geser & rasio redaman dengan regangan axial.

Dari hasil studi yang telah dilakukan oleh Thammathiwat et al., didapat beberapa hasil berikut:

- regangan axial & dissipasi tekanan air pori, keduanya meningkat dengan kenaikan jumlah siklus dalam semua kasus.
- kekuatan siklik cenderung meningkat sesuai dengan kenaikan amplitudo rasio tegangan siklik.
- kekuatan siklik meningkat sesuai dengan kenaikan frekwensi beban untuk suatu tegangan lateral yang diberikan tetapi tekanan air pori berlebihan menurun dengan kenaikan frekwensi beban.
- modulus geser menurun dengan kenaikan frekwensi beban.
- modulus geser menurun dengan kenaikan rasio tegangan tetapi rasio redaman naik dengan kenaikan rasio tegangan.

Matthew et al. (2004), telah melakukan studi mengenai pengujian triaxial beban berulang yang dilakukan pada suatu rentang lapisan *subgrade* berbutir halus, yang disiapkan dalam sejumlah keadaan untuk mengevaluasi parameter pada kondisi perencanaan yang bervariasi.

Pondasi perkerasan pada umumnya direncanakan menggunakan *California Bearing ratio (CBR)* untuk menggolongkan material *subgrade*, *capping* dan

*subbase*. CBR dipakai sebagai suatu ukuran dari kekuatan material (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*). Menurut Matthew et al. (2004) yang mengutip dari Brown (1996), menyatakan bahwa walaupun penggunaan CBR sebagai parameter hasil adalah diakui secara luas seperti tidak seluruhnya memuaskan.

Tujuan dari pengujian adalah untuk menambah pengertian hasil perilaku subgrade lempung dan mencoba untuk menghubungkannya dalam suatu spesifikasi yang digabungkan antara perencanaan analitis dan pengujian lapangan.

Menurut Matthew et al. (2004) yang mengutip dari Seed et al. (1962), menyatakan bahwa modulus elastik resilien tanah kohesive berbutir halus akibat beban berulang akan menurun secara nonlinier dengan kenaikan tegangan yang bekerja, bilamana semua faktor lain dijaga konstan. Juga menurut Matthew et al. (2004) yang mengutip dari Cheung (1994), menyatakan bahwa tekanan air pori negative telah memperlihatkan mempunyai modulus resilien lebih tinggi, menunjukkan kekakuan merupakan variabel tiga tegangan: tegangan lateral, tegangan axial dan *matrix suction of materials*.

Pengujian *repeated load triaxial test* (RLTT) mutakhir pada contoh yang berinstrumentasi telah dikembangkan untuk menduga kekuatan dan deformasi tetap dari perilaku tanah lempung.

Ukuran contoh yaitu diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Contoh diuji dengan tekanan sel = 20 kPa, untuk mensimulasi tegangan lateral dibawah roda tipikal suatu struktur perkerasan akibat tegangan axial 5 kPa.

Jumlah siklus tegangan deviator adalah 1000 dengan frekwensi 2 Hz. Beban siklik dihentikan pada regangan tetap kumulatif sebesar 5 % dan kemudian contoh dibebani secara monotonik sampai runtuh.

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik-grafik antara tegangan deviator dengan regangan tetap, modulus resilient dan kekakuan.

Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh Matthew et al. diperoleh beberapa hasil berikut :

- penerapan pendekatan yang berdasarkan hasil untuk perencanaan pondasi perkerasan, suatu uji dibutuhkan untuk mengukur modulus resilien



subgrade pada kondisi keseimbangan yang diperkirakan. Metoda *RLTT* menjadi sangat cocok.

- modulus resilien pada tegangan deviator sebesar  $0,5 q_{max}$  adalah ditunjukkan merupakan pendekatan minimum. Saran ini hanya untuk material berbutir halus yang mana regangan permeability menjadi tidak stabil dan kecenderungan menjadi harga yang tetap.
- pendekatan perencanaan yang sederhana adalah disarankan untuk tegangan subgrade yang dibatasi berdasarkan pada tegangan permulaan (*threshold*).

Prakasha et al. (2005), telah melakukan studi terhadap tanah marina India yang merupakan campuran pasir dan lempung dengan proporsi variasi yang luas. Perilaku tekniknya belum distudi secara sistimatis dan komprehensiv. Studi yang dilakukan terdiri dari uji konsolidasi satu dimensi, uji triaxial statik dan siklik. Studi menawarkan suatu interpretasi perilaku yang berdasarkan pada angka pori efektif (*effective void ratio - EVR*), suatu parameter baru yang didefinisikan sebagai rasio volum pori terhadap volum efektif fraksi tanah.

Keinginan untuk melakukan eksplorasi dan produksi minyak dan gas dari lepas pantai membutuhkan bangunan anjungan, konstruksi pengeboran dll. di laut. Pondasi struktur dan tanahnya adalah ditemukan mengalami beban operasi statik dan beban gelombang siklik. Beban gelombang siklik memungkinkan memicu bahaya terhadap tanah seperti longsor lumpur dan takstabilnya lantai laut. Sehingga dibutuhkan untuk mengetahui perilaku campuran lempung pasir laut akibat beban statik dan siklik.

Menurut Prakasha et al. (2005) yang mengutip dari Lambe et al. (1979), menyatakan bahwa yang telah ditetapkan itu ada kesamaan yang menyolok antara perilaku pasir lepas dan lempung terkonsolidasi normal, pasir padat dan lempung terkonsolidasi berlebih, dan pasir lepas dan lempung sensitive. Juga menurut Prakasha et al. (2005) yang mengutip dari Poulos (1988), menyatakan bahwa tingkat tegangan siklik dibutuhkan untuk menimbulkan keruntuhan adalah lebih tinggi untuk lempung dari pada pasir, dissipasi tekanan pori yang dibangkitkan dalam pasir lebih tinggi dari pada lempung. Dan juga menurut Prakasha et al.

(2005) yang mengutip dari Georgiannou et al. (1990), menyatakan bahwa hasil uji triaxial siklik pada pasir kelempungan menunjukkan bahwa lintasan tegangan efektif tak terdrainasi monotonik dalam tekan dan tarik membentuk penutup terikat untuk beban siklik.

Pengujian triaxial siklik takterdrainasi dilakukan dengan cara pengontrolan tegangan (*stress controlled*) terhadap contoh tanah yang telah dikonsolidasikan dengan tegangan vertikal efektif 200 kPa pada kondisi Ko. Pengujian dilakukan

pada 6 campuran yang berbeda dengan rasio tegangan siklik  $\frac{\tau_{cy}}{\sigma_{vc}}$  sebesar 0,187;

0,147; 0,112 dan 0,086 yang direncanakan pada tingkat tegangan 3, 2, 1 dan 0.

Menurut Prakasha et al. (2005) yang mengutip dari Seed et al. (1971) dan Narasimhan et al. (1998), menyatakan bahwa pengujian dibatasi sampai 148 siklus yang mana jumlah siklus ini setara untuk 100 tahun badai di lepas pantai India, juga yang mengutip dari Andersen et al. (1986), menyatakan bahwa atau ketika regangan tetap atau rata-rata, 15 %, telah dicapai, yang mana ini didefinisikan sebagai runtuh. Regangan rata-rata didefinisikan sebagai regangan rata-rata dari maximum dan minimum selama siklus diberikan. Semua pengujian siklik dilakukan dengan periode 10 detik dengan beban sinusoidal - 2 arah.

Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh Prakasha et al. didapat beberapa hasil berikut:

- perbandingan hasil percobaan antara campuran lempung-pasir dengan perilaku tipikal lempung dan pasir, dapat ditarik kesimpulan bahwa memasukkan butiran pasir pada lempung akan menunjukkan pengurangan angka pori, menaikkan friksi dan tanggapan tekanan pori yang menghasilkan penurunan tegangan geser. Demikian pula bila memasukkan lempung pada pasir akan menghasilkan penurunan angka pori.
- pendekatan dengan metoda sejarah tegangan dan sifat teknik yang dinormalisasikan (*SHANSEP*) dan angka pori efektif (*EVR*), merupakan suatu cara yang menjanjikan untuk menggolongkan perilaku lempung berpasir (*sandy clays*).

### 2.2.2 Tanah Stabilisasi

Wardani SPR (2001), telah melakukan penelitian tentang perilaku deformasi dari stabilisasi tanah lanau dengan semen dan abu terbang (*fly ash*) akibat beban siklik tak terdrainasi (*undrained cyclic loading*).

Dua macam uji laboratorium yang dilakukan yaitu kondisi pertama dengan melakukan *2 way cyclic loading* tanpa menggunakan sejarah pembebanan (*loading history*) dan kondisi kedua dengan menggunakan sejarah pembebanan yang terlebih dulu dilakukan *1 way cyclic loading* sebelum dilakukan *2 way cyclic loading*.

Contoh tanah yang akan diuji dicampur dengan semen (2%) dan abu terbang (4%), yang kemudian dipersiapkan dalam kondisi pengeringan standar dan diuji dalam keadaan jenuh.

Tujuan utama dari studi ini adalah untuk meneliti perilaku deformasi selama beban siklik tak terdrainasi (*undrained cyclic loading*) pada tanah lanau dengan campuran semen dan abu terbang.

Suatu permasalahan yang biasa pada konstruksi jalan di Asia Tenggara adalah lapisan subgrade lempung kelanauan lunak (*soft silty clay*). Masalah terburuk bila muka air tanah mempengaruhi lapisan subgrade jalan, yang banyak terjadi pada tempat-tempat yang mempunyai musim hujan yang panjang.

Menurut Wardani SPR (2001) yang mengutip dari Furguson (1983); Indraratna et al. (19985) dan Naik et al (1997), menyatakan bahwa penggunaan campuran semen dan abu terbang memungkinkan membawa keuntungan ekonomi dan lingkungan yang berarti dan telah dipublikasikan oleh sejumlah peneliti-peneliti tersebut. Banyak peneliti telah melakukan studi perilaku *naturally cemented soils* atau *artificially cemented soils* akibat beban siklik, tapi sangat terbatas penelitian tentang kekakuan (*stiffness*) dengan menggunakan beban siklik.

Material Uji yaitu tanah asli yang dipadatkan sesuai *Standard Proctor Test (AASHTO – T 99)* diperoleh kadar air optimum sebesar 15% dan berat isi kering =  $1,755 \text{ gr/cm}^3$ . Kemudian Tanah asli distabilisasikan dengan semen (2% dari berat kering) dan abu terbang (4% dari berat kering).

Menurut Wardani SPR (2001) yang mengutip dari Lo et al. (1998), menyatakan bahwa teknik persiapan contoh uji telah dipublikasikan, dan contoh yang sesuai dapat dihasilkan dengan teknik yang telah dipakai. Keseimbangan tekanan air pori dikontrol selama beban siklik. Contoh uji dijenuhkan sampai mencapai  $B \geq 98\%$  dengan menggunakan air hampa udara (*de-aired water*).

Contoh uji mula-mula dikonsolidasikan terlebih dulu dengan tegangan awal sebesar  $q_0$  dan  $\sigma_{ro}$ . Beban pengujian yang diberikan yaitu :  $q_{max} = (0,3 - 0,6)q_{uf}$  ; dimana :

$q_{uf}$  = tegangan deviator saat runtuh pada uji pembebanan monotonik tak terdrainasi

$q_{min} = -(0,2 - 0,6)q_{max}$

[ $q_{min}$  dipilih dari harga terkecil dari  $q_{max}$ ]

$\Delta q = q_{max} - q_{min}$

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Wardani tentang perilaku deformasi dari stabilisasi lanau dengan semen & abu terbang untuk suatu lapisan subgrade akibat beban siklik diperoleh hasil sbb. :

- *Hysteresis loop* Tegangan – Regangan ( $q - \epsilon_a$ ) dalam kondisi *2 way cyclic loading* dengan tingginya  $q_{max}$  dan  $q_{min}$ , akan meningkat sesuai dengan jumlah siklus.
- dengan menaikkan tegangan sel ( $\sigma_3$ ), regangan axial ( $\epsilon_a$ ) meningkat lebih cepat dalam daerah tarik
- pemberian terlebih dulu *1 way cyclic loading history*, mempunyai efek pada perilaku kemudian akibat *2 way cyclic loading*. Contoh akan menjadi sedikit lebih *stiff* dan kuat.

### 2.2.3 Pasir

Salvati et al. (2006), telah melakukan studi laboratorium tentang Perilaku Pasir Akibat Ketergantungan Pada Kecepatan Beban Siklik.

Pengujian dilakukan pada pasir kering *Monterey No. 0/30*, dengan frekwensi 0,1 & 0,5 Hz, dengan suatu rentang dalam tekanan lateral, tegangan siklik dan level

tegangan puncak. Frekwensi beban yang dilakukan mempunyai efek pada regangan, yang diukur selama pengujian akibat beban tertentu.

Hasil pengujian siklik triaxial dilakukan pada pasir kering dengan fekwensi beban yang berbeda dan juga menguji pengaruh kecepatan beban terhadap respon material berbutir ini.

Menurut Salvati et al. (2006) yang mengutip dari Hardin et al.(1972); Drnevich et al.(1979) dan Youd (1972), menyatakan bahwa pekerjaan pendahuluan dilapangan oleh peneliti-peneliti tersebut menunjukkan bahwa frekwensi regangan atau beban (dalam perkiraan dengan rentang antara 0,1 sampai 200 Hz) tidak mempengaruhi kekakuan regangan kecil (*the small strain stiffness*) dari pasir. Juga menurut Salvati et al. (2006) yang mengutip dari Lade (1994); Tatsuoka et al. (1999) ; DiBenedetto et al. (2002) dan Tatsuoka et al. (2002), menyatakan bahwa bagaimanapun pekerjaan terbaru yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti tersebut, telah menunjukkan bahwa perilaku pasir tergantung kecepatan pembebanan. Dan juga menurut Salvati et al. (2006) yang mengutip dari DiBenedetto et al. (1997) menyarankan bahwa phenomena kekakuan yang tergantung kecepatan ini adalah sama untuk tipe tanah yang berbeda termasuk pasir dan lempung. Pada pengujian ini material yang diuji dengan kecepatan regangan yang lebih tinggi adalah kurang mengerut (*contractive*) dan lebih kaku dari pada material yang diuji dengan kecepatan regangan yang lebih rendah.

Material yang digunakan adalah pasir *Monterey No. 0/30*, yang merupakan pasir pantai agak bundar dengan sedikit modifikasi dikeluarkan partikel dengan diameter lebih kecil dari 0,075 mm, yang kemudian digunakan untuk pengujian.

Koefisien keseragaman ( $C_u$ ) = 1,29 dan  $G_s = 2,64$ . Ukuran contoh uji  $d = 70$  mm (2,8 inch) dan  $h = 150$  mm (5,9 inch). Nilai *density relative* ( $D_r$ ) = 86 – 89 %. Pengujian yang dilakukan adalah pengontrolan tegangan (*Stress-Controlled Triaxial Tests*). Contoh dibebani secara monotonik dengan kecepatan 50 kPa/min, untuk memberikan tegangan geser rata-rata ( $q_{mean}$ ) dengan jumlah siklus ( $N$ ) adalah 100 pada saat pembebanan / tanpa pembebanan (*loading / unloading*) dengan frekwensi 0,1 Hz dan 1,5 Hz.

Pada pengujian ini digunakan pasir kering sehingga kemungkinan efek kekentalan (*viscous*) dari air pori dapat dihindari. Pemasangan intenal *LVDT* diikat dengan cincin sekeliling contoh yang digunakan untuk mengukur perpindahan (*displacement*).

Dari hasil uji, pada gambar kedua ditunjukkan bahwa pada pengujian dengan  $\sigma_3 = 100$  kPa untuk nilai siklus ( $N$ ) tertentu, regangan axial yang terjadi lebih besar pada frekwensi lebih kecil ( $f_1 = 0,1$  Hz) bila dibandingkan terhadap frekwensi lebih besar ( $f_2 = 1,5$  Hz).

Dan juga pada gambar keempat ditunjukkan bahwa pada pengujian dengan  $\sigma_3$  yang lebih kecil ( $\sigma_3 = 65$  kPa), regangan yang terjadi lebih besar bila dibandingkan dengan  $\sigma_3 = 100$  kPa pada frekwensi yang sama.

Untuk menjelaskan perilaku ketergantungan pada kecepatan (*rate-dependent behavior*) ini secara mekanisme, maka pergerakan partikel pasir secara individual harus dipertimbangkan. Pada awalnya contoh berubah secara elastis dan kemudian partikel tergelincir, lalu menyusun kembali (*rearrange*) pada suatu deformasi yang tidak dapat diubah (*irreversible*).

Berdasarkan studi laboratorium yang telah dilakukan oleh Salvati et al. pada pasir kering *Monterey No.0/30* akibat beban siklik diperoleh beberapa hasil berikut:

- Contoh yang dibebani pada frekwensi rendah, partikel-partikel nya mempunyai keuntungan untuk menyusun kembali (*rearrange*) dirinya, dengan demikian menimbulkan suatu rangkaian jaringan distribusi yang lebih, yang menghasilkan nilai regangan yang besar.
- Contoh yang dibebani pada frekwensi tinggi, rangka tanah (*soil skeleton*) mungkin menyerap lebih deformasi tanpa menyusun kembali dirinya sehingga menghasilkan nilai regangan yang lebih rendah.

Sharma et al. (2006), telah melakukan studi laboratorium melalui suatu seri pengujian triaxial monotonik dan siklik terhadap 2 (dua) tanah *calcareous Goodwyn (GW)* dan *Ledge Point (LP)*. Dua tanah ini dipilih sebab mewakili dua kondisi formasi yang berbeda. Penelitian experimental yang dilakukan termasuk pengujian tekan isotropik pada level tegangan yang tinggi, pengujian geser

monotonik takterdrainasi, pengujian geser siklik takterdrainasi akibat pembebanan satu-arah dan dua-arah.

Berdasarkan hasil pengujian analisa butiran, tanah *GW* termasuk pasir berlanau dan tanah *LP* termasuk pasir. Sedangkan hasil pengujian yang lain disajikan dalam foto *Scanning Electron Microscope (SEM)*, dan dalam bentuk grafik-grafik a.l. lintasan tegangan efektif, hubungan antara : tegangan ( $\sigma$ ) dengan regangan ( $\epsilon$ ), regangan ( $\epsilon$ ) dengan jumlah siklus ( $N$ ), tekanan air pori ( $\Delta u$ ) dengan jumlah siklus ( $N$ ), respon tipikal siklik satu-arah dan dua-arah.

Berdasarkan studi laboratorium yang telah dilakukan oleh Sharma et al. pada pasir berlanau (*GW*) dan pasir (*LP*), diperoleh beberapa hasil sbb. :

- respon pengujian geser monotonik terhadap tanah *GW* dan *LP*, sama dengan pasir siliceous. Sudut geser puncak tanah *GW* dan *LP* relative tinggi dari pasir silika dan membutuhkan kekuatan tinggi untuk memobilisasi regangan axial yang besar.
- pada kondisi pembebanan siklik satu-arah ditunjukkan regangan sisa besar yang diikuti regangan siklik sangat kecil, sedangkan keruntuhan terjadi karena regangan yang besar. Akibat pembebanan siklik dua-arah ditunjukkan akumulasi regangan siklik yang besar.
- kekuatan geser siklik kedua tanah *GW* dan *LP*, tergantung pada relative density ( $D_r$ ) dan tegangan sell ( $P_o'$ ) serta tipe pengujian geser siklik. Kekuatan geser akibat beban siklik satu-arah lebih tinggi dari akibat beban siklik dua-arah.

Boulanger et al. (2006), telah melakukan studi untuk merekomendasikan suatu kriteria baru untuk memperbaiki kelemahan analisa liquifaksi sebelumnya pada lanau dan lempung jenuh, yang didasarkan pada mekanisme perilaku tegangan – regangan dan memberikan petunjuk yang diperbaiki untuk prosedur rekayasa yang terseleksi untuk memperkirakan potensi kehilangan regangan dan kekuatan selama beban seismik. Kriteria yang direkomendasikan adalah untuk membedakan antara tanah berbutir halus yang menunjukkan perilaku seperti pasir (*sand-like behavior*) sehingga terjadi liquifaksi (*liquefaction*) dan perilaku seperti lempung (*clay-like behavior*) sehingga terjadi perlemahan siklik (*cyclic*

*softening*), dengan merekomendasikan yang berhubungan untuk prosedur rekayasa yang paling cocok untuk perkiraan perilaku masing-masing.

Perilaku pasir jenuh akibat beban siklik takterdrainasi, digambarkan pada hubungan tegangan deviator dengan regangan (%) dan tegangan efektif prinsipal rata-rata.

Sedangkan perilaku lempung akibat beban siklik takterdrainasi, ditunjukkan dalam hubungan antara tegangan geser yang dinormalisasikan  $\frac{\tau_n}{\sigma_{vc}}$  dengan

regangan (%) dan rasio kekuatan geser tak terdrainasi  $\frac{S_u}{\sigma_{vc}}$ .

Sedangkan perilaku tanah berbutir halus yang berperilaku seperti pasir (*sand-like*) dan seperti lempung (*clay-like*), digambarkan pada hubungan antara tegangan deviator yang dinormalisasikan dengan regangan (%) dan tegangan rata-rata yang dinormalisasikan, tekanan air pori yang dinormalisasikan dengan regangan (%), rasio tegangan siklik dengan regangan (%), jumlah siklus (N) dan jumlah siklus ekuivalen ( $N_{eq}$ ).

Pengujian sifat fisik seperti batas-batas *Atterberg*, analisa ukuran butir dan kadar air, diperlukan untuk membedakan perilaku tanah seperti lempung (*clay-like*) dan seperti pasir (*sand-like*).

Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh Boulanger et al. pada tanah berbutir halus yang dapat berperilaku seperti pasir atau seperti lempung, diperoleh beberapa hasil sbb. :

- Kekuatan siklik dapat dievaluasi berdasarkan informasi dari pengujian lapangan, laboratorium dan korelasi empiris. Untuk tanah berbutir halus berperilaku mendasar seperti pasir, kekuatan siklik mungkin lebih tepat diestimasi dalam kerangka yang ada seperti SPT dan CPT, yang didasarkan pada korelasi likuifaksi.
- Untuk tujuan praktis, tanah berbutir halus dapat diperkirakan meyakinkan dengan menunjukkan berperilaku seperti lempung, bila mempunyai  $PI > 7$ . Kriteria ini memberikan interpretasi sedikit konservatif pada



kemungkinan interval transisi dan memasukkan semua tanah CL dengan definisi. Tanah berbutir halus dengan PI antara 3 – 6, menunjukkan perilaku menengah (*intermediate*).

- Diharapkan bahwa kriteria kelemahan liquifaksi yang direkomendasikan dan prosedur analisis perlemahan siklik akan memberikan suatu kerangka untuk pengembangan dan perbaikan kemudian.

Bouferra et al. (2007), telah melakukan studi laboratorium tentang pengaruh penjeuhan pada pasir *Hostun-RF* dan pengaruh prapembebanan pada tahanan pasir terhadap liquifaksi. Studi tentang perilaku tanah akibat beban siklik tak terdrainasi adalah penting dalam bidang rekayasa geoteknik dan gempa. Itu adalah melalui studi tentang tanah jenuh dengan menggunakan keduanya yaitu pengamatan setelah gempa dan uji laboratorium.

Menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Martin et al. (1978), menyatakan bahwa telah digunakan model matematik untuk meneliti pengaruh penjeuhan terhadap potensi liquifaksi tanah. Hasilnya menunjukkan bahwa tahanan tanah terhadap liquifaksi meningkat secara nyata dengan pengurangan tingkat kejenuhan. Juga menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Yoshimi et al. (1989), menyatakan bahwa menetapkan hasil ini pada dasar uji triaxial yang ditunjukkan pada pasir *Toyoura*. Dan juga menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Grozic et al (1999) dan Fourie et al. (2001) yang menyatakan bahwa pada waktu terakhir berita ini menguntungkan dengan adanya suatu perhatian yang meningkat terutama untuk pasir bergas (*gassy sand*) dan pasir *tailing*. Hasil eksperimen jelas menunjukkan bahwa adanya gas yang besar mempengaruhi perilaku tanah akibat beban tak terdrainasi. Itu menaikkan tahanan yang berarti terhadap liquifaksi dari tanah yang bergas (*gassy soils*), sedangkan pada pasir *tailing* (*tailing sands*) kelihatannya menjadi suatu yang lebih kompleks.

Makalah ini memasukkan suatu sumbangan pada data eksperimen. Itu memberikan hasil uji triaxial siklik yang dilakukan pada pasir *Hostun-RF* untuk variasi harga koefisien tekanan pori Skempton. Analisa hasil eksperimen memberikan pengertian dalam yang dapat dinilai pada pengaruh penjeuhan terhadap perilaku akibat beban siklik tak terdrainasi.

Menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Finn et al. (1970), menyatakan bahwa telah dilakukan studi tentang pengaruh sejarah pembebanan pada tahanan pasir terhadap liquifaksi. Mereka telah menunjukkan bahwa kenaikan tahanan ini ketika contoh sebelumnya diberikan beban siklus kecil yang diikuti dengan drainasi. Juga menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Ishihara et al. (1982), menyatakan bahwa telah dilakukan studi tentang pengaruh pemberian distorsi pada tahanan pasir terhadap liquifaksi.

Mateial yang digunakan dalam pengujian adalah pasir *Hostun-RF* yang merupakan pasir halus seragam dengan ukuran butir rata-rata  $D_{50} = 0,47$  mm dan keoffisien keragaman  $U = 2,26$ , dengan  $e_{max} = 0,943$  dan  $e_{min.} = 0,575$ . Gambar pertama, menunjukkan distribusi ukuran butir dari pasir antara 0,08 s/d 5 mm.

Pada pengujian siklik takterdrainasi seri pertama, dilakukan dengan 3 nilai koefisien tekanan pori Skempton yaitu  $B = 0,92; 0,85 \& 0,36$ .

Liquifaksi adalah suatu phenomena takstabil, dimana kehilangan kekuatan geser sangat besar. Phenomena ini dapat terjadi selama penerapan beban yang cepat pada media berbutir yang jenuh.

Dari hasil percobaan dengan nilai  $B = 0,92$  seperti yang disajikan pada Gambar ketiga, yang menunjukkan bahwa beban siklik menyebabkan kenaikan tekanan pori terutama selama siklik pertama. Peristiwa liquifaksi penuh terjadi pada siklus 27, dengan kenaikan tekanan air pori yang menyebabkan pengurangan tekanan lateral effektive yang berarti, sehingga menunjukkan kehilangan yang serius dalam hal kekakuan dan tahanan contoh dengan regangan melampaui 5 %.

Pada contoh dengan  $B = 0,85$ , liquifaksi penuh dicapai pada siklus 33 dengan regangan melampaui 5 %. Sedangkan dengan  $B = 0,36$ , dengan siklus berturut-turut tidak menyebabkan kenaikan regangan axial maximum yang berarti, yang tetap stabil pada regangan 0,4 % setelah siklus 50.

Menurut Bouferra et al. (2007) yang mengutip dari Yoshimi et al.(1989) dan Grozic et al.(1999), menyatakan bahwa hasil ini menetapkan penemuan experimen, yang menunjukkan bahwa penurunan kejenuhan tanah akan

menyebabkan suatu kenaikan yang berarti dalam tahanan tanah terhadap beban siklik tak terdrainasi.

Pada pengujian siklik takterdrainasi seri kedua, dilakukan terhadap 3 contoh dengan masing-masing kondisi, tanpa prapembebanan, dengan prapembebanan tekan dan prapembebanan tarik. Beban siklik takterdrainasi diberikan pada saat tegangan deviator,  $q = 0$  dan drainasi ditutup. Hasil pengujian ditunjukkan masing-masing pada Gambar ketujuh, kedelapan dan kesembilan.

Pada contoh dengan kondisi tanpa prapembebanan, kenaikan tekanan air pori menyebabkan pengurangan yang berarti pada tekanan lateral efektif, yang mengakibatkan kehilangan yang serius pada tahanan dan kekakuan dari contoh, yang ditunjukkan dengan terjadinya liquifaksi penuh pada siklus 6.

Sedangkan pada contoh dengan prapembebanan tekan, terjadi regangan kecil pada tahap awal pembebanan (0,25 %), setelah itu terjadi kenaikan yang besar (-8 %) pada tahap tanpa beban, kemudian tekanan air pori naik sepanjang siklus beban sehingga pada siklus 2 terjadi liquifaksi.

Pada contoh dengan prapembebanan tarik, terjadi kenaikan regangan axial akibat beban siklus 1 dan mencapai nilai yang besar yaitu 4 % dalam tahap pembebanan dan -1,75 % dalam tahap tanpa beban, kemudian terjadi liquifaksi pada siklus 4.

Berdasarkan studi laboratorium yang telah dilakukan oleh Bouferra et al. pada pasir *Hostun-RF* akibat beban siklik takterdrainasi diperoleh beberapa hasil berikut:

- Hasil uji seri pertama akibat beban siklik takterdrainasi pada pasir *Hostun-RF* menunjukkan bahwa pengurangan koefisien tekanan pori Skempton ( $B$ ), menunjukkan pengurangan yang berarti dalam kecepatan pengembangan air pori dan ini mengakibatkan perbaikan pada tahanan tanah terhadap beban siklik tak terdrainasi.
- Hasil uji seri kedua menunjukkan bahwa suatu prapembebanan yang besar akan mengakibatkan pengurangan tahanan terhadap liquifaksi. Pengurangan tahanan dengan prapembebanan tekan lebih baik dari pada yang diakibatkan dengan prapembebanan tarik.

## 2.3 Ringkasan

Dari tinjauan kepustakaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

(1) Tentang perilaku tanah kohesive terkonsolidasi normal :

- Jitno et al. (1991) berpendapat bahwa beban siklik menyebabkan penurunan kekakuan dan kekuatan geser.
- Yasuhara et al. (1992) berpendapat bahwa tekanan air pori karena beban siklik mengakibatkan pengurangan tegangan effektive.
- Hyde et al. (1993) berpendapat bahwa pengembangan air pori dan regangan akibat beban berulang satu-arah, tidak tergantung pada frekwensi tetapi pada waktu.
- Konrad et al. (1993) berpendapat bahwa kecepatan regangan akibat beban siklik, mungkin menyebabkan distribusi tekanan pori takseragam.
- Pradhan et al. (1999) berpendapat bahwa regangan maximum axial sebesar 10 % - 15 %, akibat beban siklik.
- Thammathiwat et al. (2004) berpendapat bahwa regangan axial dan tekan air pori berlebihan keduanya meningkat dengan jumlah siklus dan juga kekuatan siklik cenderung meningkat sesuai kenaikan amplitudo dan frekwensi beban.

(2) Tentang perilaku tanah kohesive yang dipadatkan :

- Miller et al. (2000) berpendapat bahwa kekuatan geser siklik sensitive terhadap tingkat kejenuhan awal antara 90 – 100 (%) dan tekanan air pori tumbuh secara bersamaan dengan kenaikan jumlah beban siklik.
- Koike et al. (2002) berpendapat bahwa penurunan dan tekanan air pori akibat beban siklik sinusoidal sangat tergantung pada frekwensi.

(3) Tentang perilaku tanah kohesive yang distabilisasi, Wardani et al. (2001) berpendapat bahwa:

- hubungan tegangan – regangan akibat beban siklik dua-arah, akan meningkat sesuai dengan jumlah siklus.

- pemberian prapembebanan siklik satu-arah sebelum beban siklik dua-arah, akan membuat contoh lebih kaku dan kuat.

(4) Tentang perilaku pasir :

- Salvati et al. (2006) berpendapat bahwa pasir kering yang dibebani beban siklik satu-arah, menimbul regangan yang lebih besar pada frekwensi rendah bila dibandingkan dengan pada frekwensi tinggi.
- Sharma et al. (2006), berpendapat bahwa :
  - kekuatan geser siklik kedua tanah GW dan LP, tergantung pada relative densiti ( $D_r$ ) dan tegangan sell ( $P_o'$ ) serta tipe pengujian geser siklik.
  - kekuatan geser akibat beban siklik satu-arah lebih tinggi dari akibat beban siklik dua-arah.
- Bouferra et al. (2007) berpendapat bahwa :
  - pengurangan koefisien tekanan air pori Skempton (B) akan mengakibatkan perbaikan pasir terhadap beban siklik dua-arah takterdrainasi.
  - pemberian prapembebanan yang besar akan mengakibatkan pengurangan tahanan pasir terhadap liquifaksi.

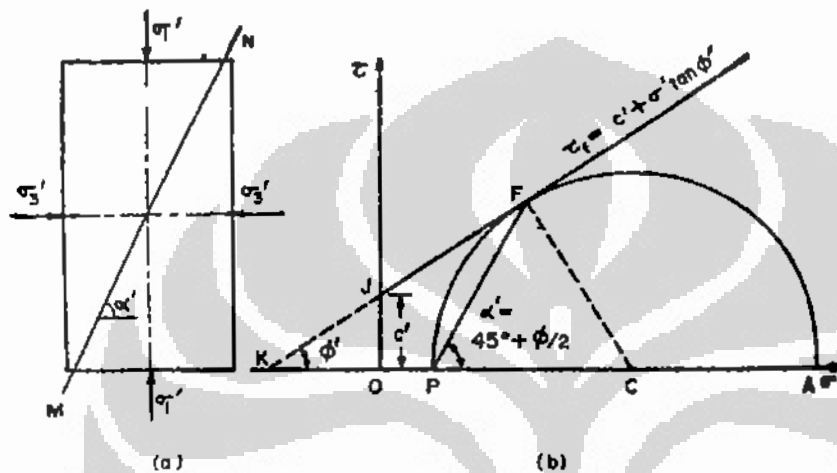
(5) Tentang perilaku lanau dan lempung:

- Boulanger et al. (2006) berpendapat bahwa :
  - kekuatan siklik dapat dievaluasi berdasarkan informasi dari pengujian lapangan, laboratorium dan korelasi empiris.
  - kekuatan siklik pada tanah berbutir halus seperti pasir, dapat diestimasi dalam kerangka yang ada yaitu SPT dan CPT.
  - tanah berbutir halus berperilaku seperti lempung bila  $PI > 7$

## 2.4 Tinjauan Pembebanan Statik

### 2.4.1 Pendahuluan

Kondisi selama pengujian statik triaxial terkonsolidasi takterdrainasi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1, menunjukkan tegangan efektif yang bekerja pada contoh uji selama pengujian serta menunjukkan garis keruntuhan JF dan lingkaran Mohr yang berhubungan terhadap titik keruntuhan F, dengan koordinat  $(\tau_f, \sigma_f)$ .



**Gambar 2.1** Kondisi tegangan dan garis keruntuhan pada pengujian triaxial (Punmia, 1975)

Menurut Coulomb, kekuatan geser tanah ( $\tau_f$ ) pada titik F dalam bidang runtuh JF, merupakan suatu fungsi linier terhadap tegangan normal ( $\sigma_f$ ).

Berdasarkan konsep dasar Terzaghi mengenai tegangan normal efektif, maka kekuatan geser tanah efektif dapat dinyatakan sebagai fungsi berikut :

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u) \cdot \tan \phi' = c' + \sigma_f' \cdot \tan \phi' \quad (4.1)$$

$$\tau_f = \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \sin 2\alpha' \quad (4.2)$$

$$\sigma_f' = \frac{1}{2} (\sigma_1' + \sigma_3') + \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \cos 2\alpha' \quad (4.3)$$

dimana :

$c'$  = kohesi geser

$\phi'$  = sudut geser

$u$  = tekanan air pori (nilai bisa positif maupun negatif)

$\alpha'$  = sudut bidang runtuh ( $\alpha' = 45^\circ + \phi'/2$ )

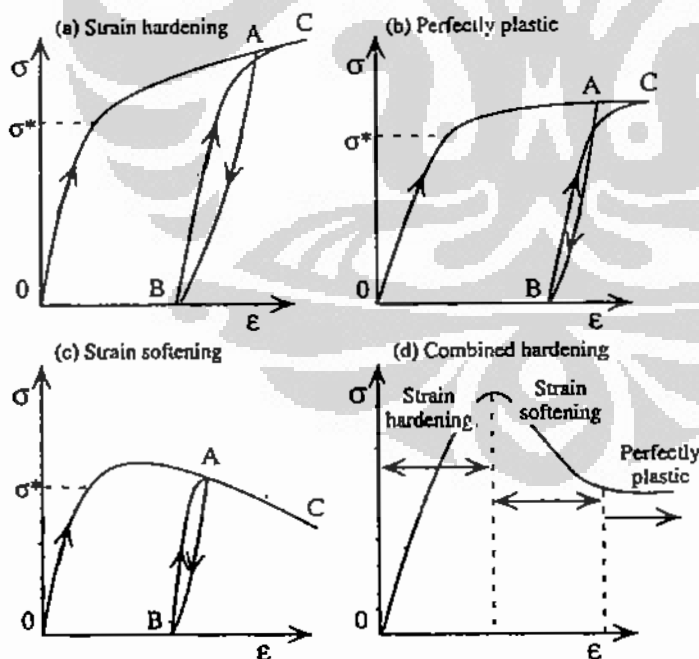
$q$  = tegangan deviator =  $\Delta\sigma = \Delta\sigma' = (\sigma_1' - \sigma_3') = (\sigma_1 - \sigma_3)$

Berdasarkan persamaan umum tegangan geser tersebut diatas, maka kekuatan geser selama beban statik, sangat tergantung pada kecenderungan nilai tekanan air pori, apakah cenderung naik atau turun.

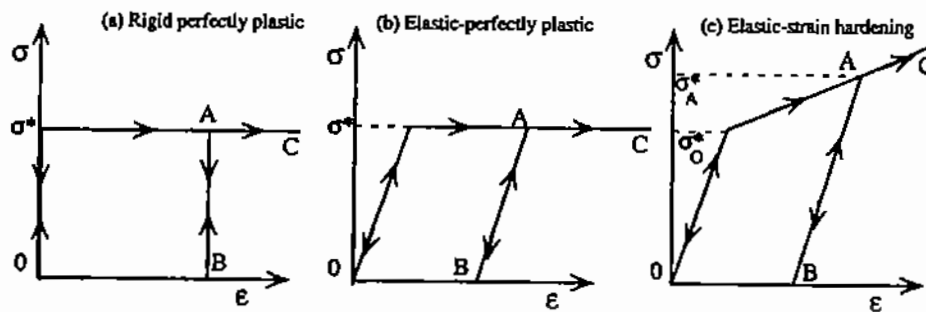
#### 2.4.2 Tipe-Tipe Hubungan Tegangan dengan Regangan

Pada Gambar 2.2. diperlihatkan beberapa tipe perilaku elastoplastis yang tidak dapat diubah pada tanah, seperti Gambar 2.2a menunjukkan terjadinya pengerasan regangan, Gambar 2.2b menunjukkan terjadinya plastis sempurna, Gambar 2.2c menunjukkan terjadinya perlemahan regangan dan Gambar 2.2d kombinasi dari a, b & c (Bardet, 1997).

Pada Gambar 2.3. diperlihatkan idealisasi perilaku yang umum digunakan dalam bidang mekanika tanah, seperti Gambar 2.3a menunjukkan perilaku plastis sempurna - kaku, Gambar 2.3b menunjukkan perilaku plastis sempurna - elastis, dan Gambar 2.3c menunjukkan perilaku pengerasan regangan - elastis (Bardet, 1997).

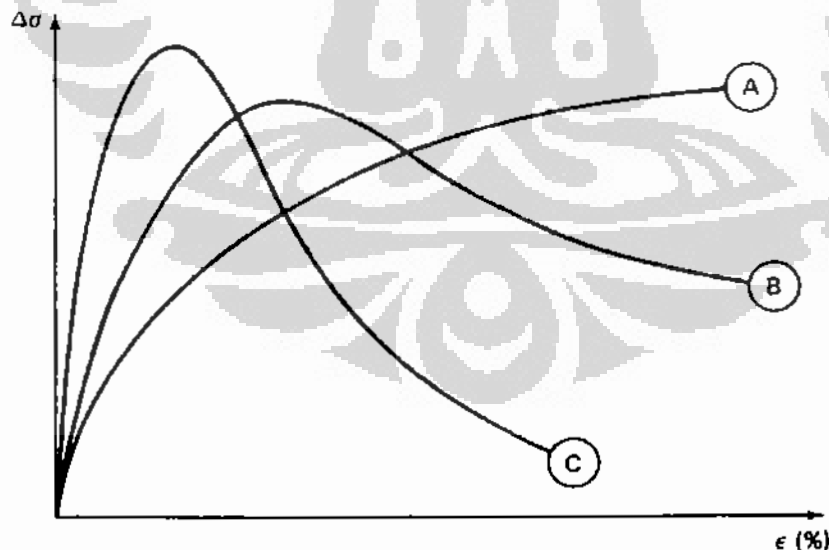


**Gambar 2.2** Variasi tipe perilaku elastoplastis a) pengerasan regangan, b) plastis sempurna, c) perlemahan regangan, d) kombinasi a-c. (Bardet,1997)



**Gambar 2.3** Idealisasi perilaku yang umum digunakan dalam mekanika tanah  
 a). Plastis sempurna-kaku, b). Plastis sempurna-elastis, c). Pengerasan regangan-elastis (Bardet,1997)

Pada Gambar 2.4, diperlihatkan beberapa bentuk tipikal kurva tegangan – regangan uji triaxial takterkonsolidasi takterdrainasi untuk lempung, seperti kurva (A) menunjukkan lempung dipadatkan dan dibentuk kembali, kurva (B) menunjukkan lempung takterganggu sensitive médium dan kurva (C) menunjukkan lempung takterganggu sensitive tinggi (Holtz et al., 1981).



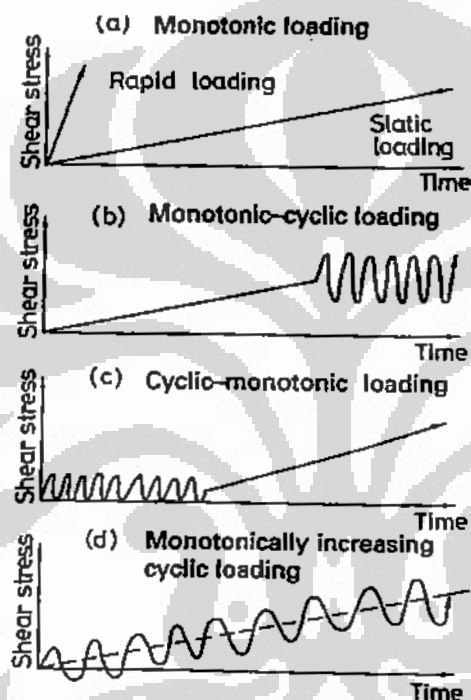
**Gambar 2.4** Hubungan Kurva Tegangan – Regangan Uji Triaxial Takterkonsolidasi Takterdrainasi, untuk, (A) lempung dipadatkan dan dibentuk kembali, (B) lempung takterganggu sensitive medium, (C) lempung takterganggu sensitive tinggi (Holtz et al., 1981).



## 2.5 Tinjauan Pembebanan Siklik

### 2.5.1 Pola Beban pada Pengujian Pembebanan Dinamik

Beberapa tipe pengujian pembebanan dinamik telah dicoba untuk menentukan kekuatan dinamik tanah. Ishihara telah mengklasifikasikan beban dalam 4 tipe sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.5, yang sesuai dengan jenis pembebanan apakah cepat atau lambat dan juga apakah beban monotonik atau siklik (Ishihara, 2003).



Gambar 2.5. Tipe pengujian pembebanan dinamik (Ishihara, 2003)

Tipe pertama pembebanan dinamik yaitu pembebanan monotonik seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.5(a), dapat dilakukan dengan variasi kecepatan pembebanan dan dalam waktu beberapa menit atau kurang sampai runtuh.

Tipe kedua pembebanan dinamik terdiri dari pelaksanaan beban siklik yang meneruskan beban monotonik statik, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 2.5(b). Tipe pembebanan ini sering dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan tanah selama gempa bumi. Tahap awal pelaksanaan tegangan geser monotonik statik adalah mempertimbangkan sebagai mewakili suatu kondisi tegangan statik pra-

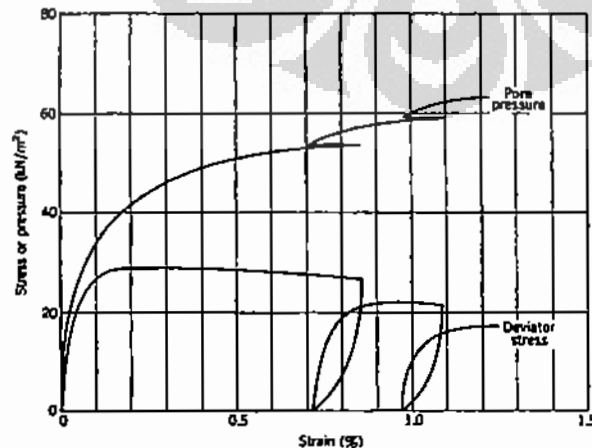
gempa bumi yang terus menerus, terdapat dalam elemen tanah dibawah permukaan miring. Setelah penerapan tegangan geser yang terus menerus, contoh tanah diutamakan terhadap suatu tegangan geser yang berurutan sampai keruntuhan terjadi. Tahap pembebanan dipertimbangkan sebagai simulasi tegangan geser siklik yang bekerja selama beban gempa.

Tipe pembebanan ketiga seperti digambarkan pada Gambar 2.5(c), diutamakan untuk menyelidiki efek kemerosotan kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*) selama guncangan seismik.

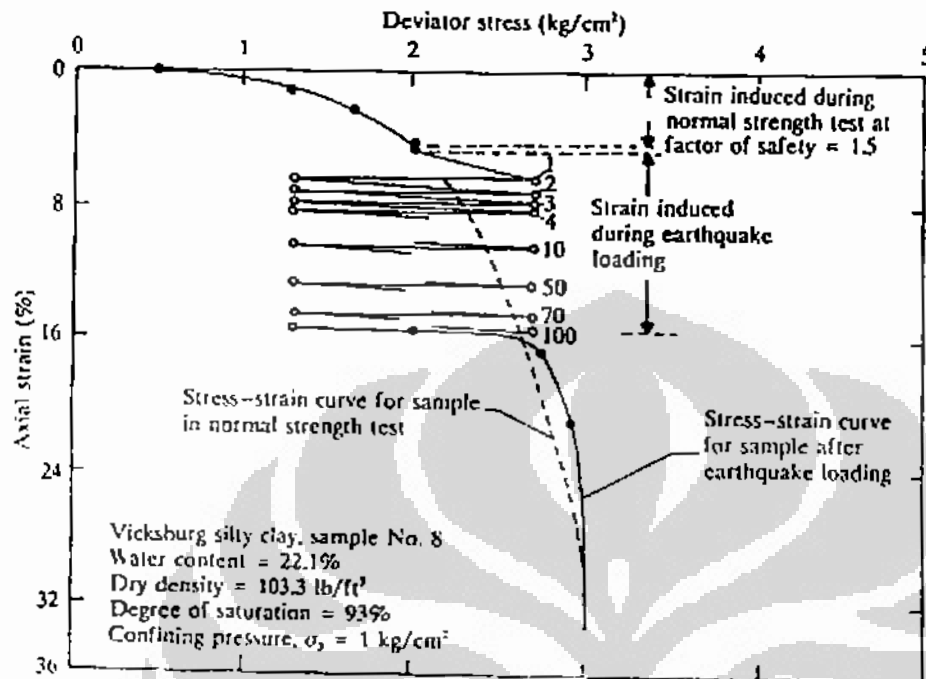
Tipe pembebanan keempat sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.5(d), kadang-kadang dipakai walaupun tidak umum untuk studi kekuatan statik tanah akibat getaran.

### 2.5.2 Pola Beban pada Pengujian yang telah dilakukan

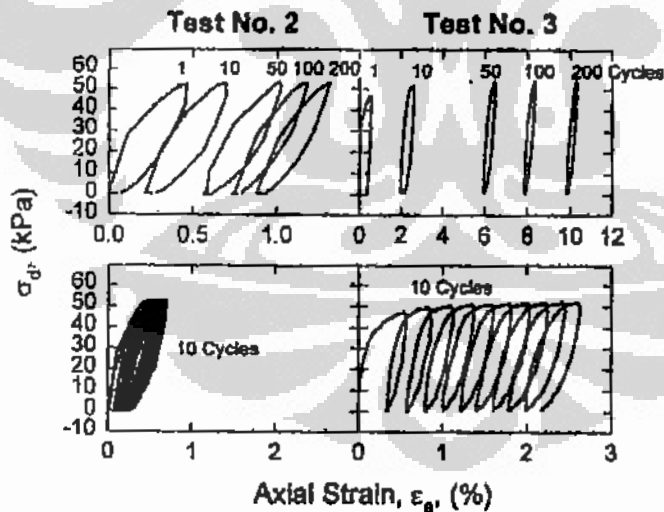
Pola pembebanan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5(b), telah dilakukan oleh Healy, 1963 (dalam Lambe et al., 1979) dengan memberikan pembebanan siklik satu-arah pada pasir lepas jenuh seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.6 dan juga oleh Seed dan Chan, 1966 (dalam Das, 1993) dengan memberikan pembebanan siklik satu-arah dan kemudian beban statik pada lempung kelanauan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.7. Sedangkan Miller et al. (2000) juga telah melakukan pengujian triaxial siklik satu-arah pada lempung lunak yang dipadatkan, yang mana contoh uji yang stabil mengalami regangan kecil sedangkan yang mengalami regangan besar menunjukkan contoh uji akan runtuh, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.8..



**Gambar 2.6** Efek pembebanan berulang pada kekuatan takterdrainasi Pasir lepas jenuh (Lambe, 1979)



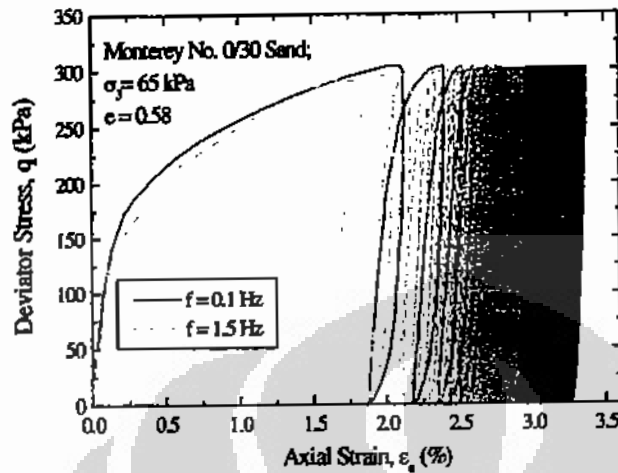
**Gambar 2.7** Hubungan Tegangan Deviator dengan Regangan Axial (Das, 1993)



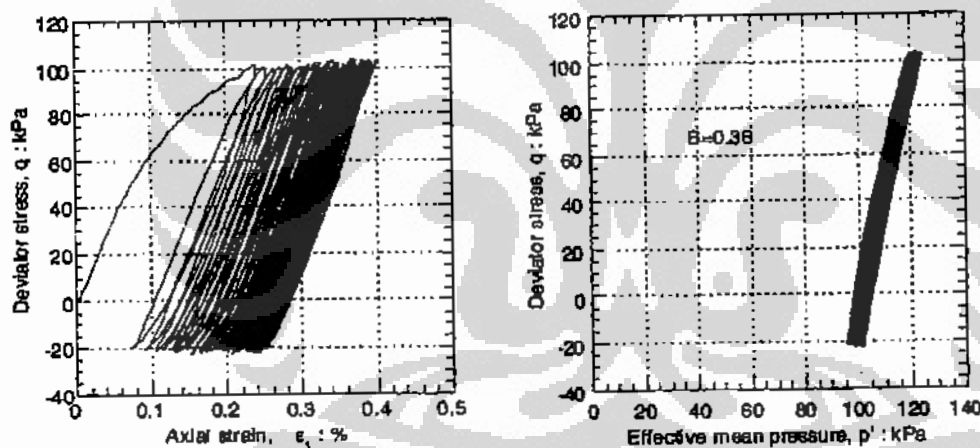
**Gambar 2.8** Data Tegangan-Regangan Untuk Uji Triaxial Siklik pada Contoh Stabil (no.2) & Runtuh (no.3) dengan  $N = 10$  &  $200$  (Miller et al., 2000)

Kemudian Salvati et al.(2006) melakukan pembebanan siklik satu-arah pada pasir kering seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan setelah itu Bouferra et al.

(2007) melakukan pembebanan siklik dua-arah pada pasir yang tidak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.9** Hubungan antara Tegangan Deviator dengan Regangan (Salvati et al, 2006)



**Gambar 2.10** Hubungan tegangan deviator dengan regangan dan tegangan efektif, pada pasir Hostun-RF dengan  $B = 0,36$  (Bouferra et al, 2007).

### 2.5.3 Pola Beban pada Pengujian Siklik yang akan dilakukan

Adapun pola beban Pengujian Siklik yang akan dilakukan adalah menyerupai pola seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5(b), yang kemudian diikuti dengan beban statik monotonik pasca-siklik, seperti yang telah dilakukan oleh Seed dan Chan, 1966 (dalam Das, 1993) dan yang menyerupai Gambar 2.7. Sehingga pola

yang akan dilakukan dapat dinamakan sebagai pola pembebanan monotonik-siklik-monotonik (*monotonic-cyclic-monotonic loading*).

## 2.6 Rumusan Penelitian

Rumusan Penelitian disusun berdasarkan latar belakang, permasalahan yang ada, tujuan penelitian dan tinjauan kepustakaan yang telah dilakukan. Adapun Penelitian yang akan dilakukan ini adalah untuk mengetahui perilaku tanah residual Depok yang dipadatkan akibat beban siklik satu-arah pada kondisi terkonsolidasi takterdrainasi, dalam hal hubungan karakteristik antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, dengan cara mensimulasikan kondisi suatu lapisan tanah terkonsolidasi di lapangan pada timbunan tanah yang mempunyai kadar air berbeda, yang kemudian mengalami beban gempa dengan mensimulasikannya dengan beban siklik satu-arah.

Contoh Uji dipadatkan sesuai Standar *Proctor* (AASHTO T-99/ ASTM D-698).

Pengujian yang akan dilakukan menggunakan alat Triaxial sistem otomatis, yang mana pengaturan beban (*stress controlled*) dilakukan secara manual dengan menekan tombol keatas (pemberian beban), tombol ditengah (berhenti) dan tombol kebawah (pengurangan beban).

Pemberian beban siklik satu-arah dilakukan pada regangan antara 8 – 12 % setelah kurva beban cenderung mendatar. Pemberian beban statik pasca-beban siklik diberikan sampai regangan mencapai 20 %. Fluktuasi tekanan air pori diamati selama beban statik pra-beban siklik, selama beban siklik dan pada beban statik pasca-beban siklik.

## 2.7 Hipotesa

- (1) delta regangan yang terjadi selama beban siklik satu-arah, cenderung makin kecil
- (2) delta regangan terbesar terjadi akibat beban siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan tinggi

- (3) kondisi contoh uji tidak mengalami keruntuhan dan cenderung relative stabil selama mengalami beban siklik satu-arah.
- (4) kekuatan geser effektive lempung yang dipadatkan, cenderung meningkat akibat beban statik pasca-beban siklik satu-arah.

## 2.8 Batasan Penelitian

- (1) Ukuran contoh uji adalah diameter = 10 cm dan tinggi = 20 cm.
- (2) Contoh tanah yang digunakan selama pengujian, diasumsikan homogen.
- (3) Proses pembuatan contoh uji dan tahap penjenuhan sebelum pengujian, diassumsikan sudah dilakukan sesuai dengan standar AASHTO/ASTM
- (4) Alat yang digunakan Triaxial sistim Otomatis yang dilengkapi dengan Instrumentasi GDS.
- (5) Pemberian beban siklik satu-arah dilakukan pada regangan antara 8-12 (%)

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Pendahuluan

Untuk mencapai Tujuan Penelitian yang telah diuraikan sebelumnya, maka dibuat program kerja untuk pekerjaan di lapangan dan di laboratorium, persiapan peralatan dan tahapan analisis.

### 3.2 Persiapan Contoh Uji

- Untuk membuat contoh uji dilakukan pengambilan contoh tanah terganggu antara kedalaman 1.50 - 2.00 m, pada area di Fakultas Teknik UI – Depok. Untuk mendapatkan informasi dari contoh tanah yang diambil mengenai  $\gamma_d$  max. dan  $\omega$  optimum, maka dilakukanlah uji pemadatan yang sesuai *Standard Proctor* ( ASTM D – 698 / AASHTO T – 99 ). Dari hasil uji diperoleh,  $\gamma_d$  max. = 11,1 kN/M<sup>3</sup> dan  $\omega$  opt. = 46 %.
- Untuk melakukan pengujian triaxial siklik satu-arah maka terlebih dulu dibuat contoh uji dari tanah yang lolos saringan no. 4 dan dipadatkan sesuai *Standard Proctor*, dengan kadar air awal masing-masing, 40 , 45 dan 50 (%). Sedangkan untuk pengujian triaxial statik, tanah dipadatkan dengan kadar air awal, 40 %.
- Untuk pengujian triaxial Statik dan Siklik, contoh uji terlebih dulu dipadatkan dalam tabung dengan ukuran  $\varnothing = 10$  cm dan  $h = 20$  cm. Ukuran contoh uji seperti ini telah digunakan dalam pengujian triaxial dengan beban berulang untuk mengetahui perilaku lapisan subgrade lempung oleh Matthew et al. (2004). Sebelum diberikan pembebanan pada contoh uji, terlebih dulu dilakukan proses penjenjutan sampai mencapai nilai koefisien  $B \geq 97$  % , yang menunjukkan tingkat kejenuhan  $S_r > 98$  %. Setelah itu contoh uji diberikan tekanan lateral dan kemudian tanpa melakukan tahap konsolidasi pada contoh uji dilakukan pembebanan dengan kecepatan yang sudah ditentukan.

### 3.3 Peralatan

Untuk melakukan pengujian siklik satu-arah, digunakan alat Triaxial Sistem Otomatis – GDS (*GDSTAS: the GDS Triaxial Automated System*), yang dilengkapi Instrumentasi GDS dan perangkat lunak GDSLAB.

Instrumentasi GDS terdiri dari:

- pengontrol tekanan sell : 1 bh
- pengontrol tekanan balik : 1 bh
- pengontrol utama untuk tekanan sell; tekanan balik; tekanan air pori; *load cell*; *displacement transducer (LVDT)*: 1 set
- kapasitas *load cell* : 8 kN
- kpsitas sell triaxial : 2000 kPa
- komputer : 1 set

Peralatan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1 & Gambar 3.2



**Gambar 3.1** Alat Triaxial dan contoh tanah terpasang



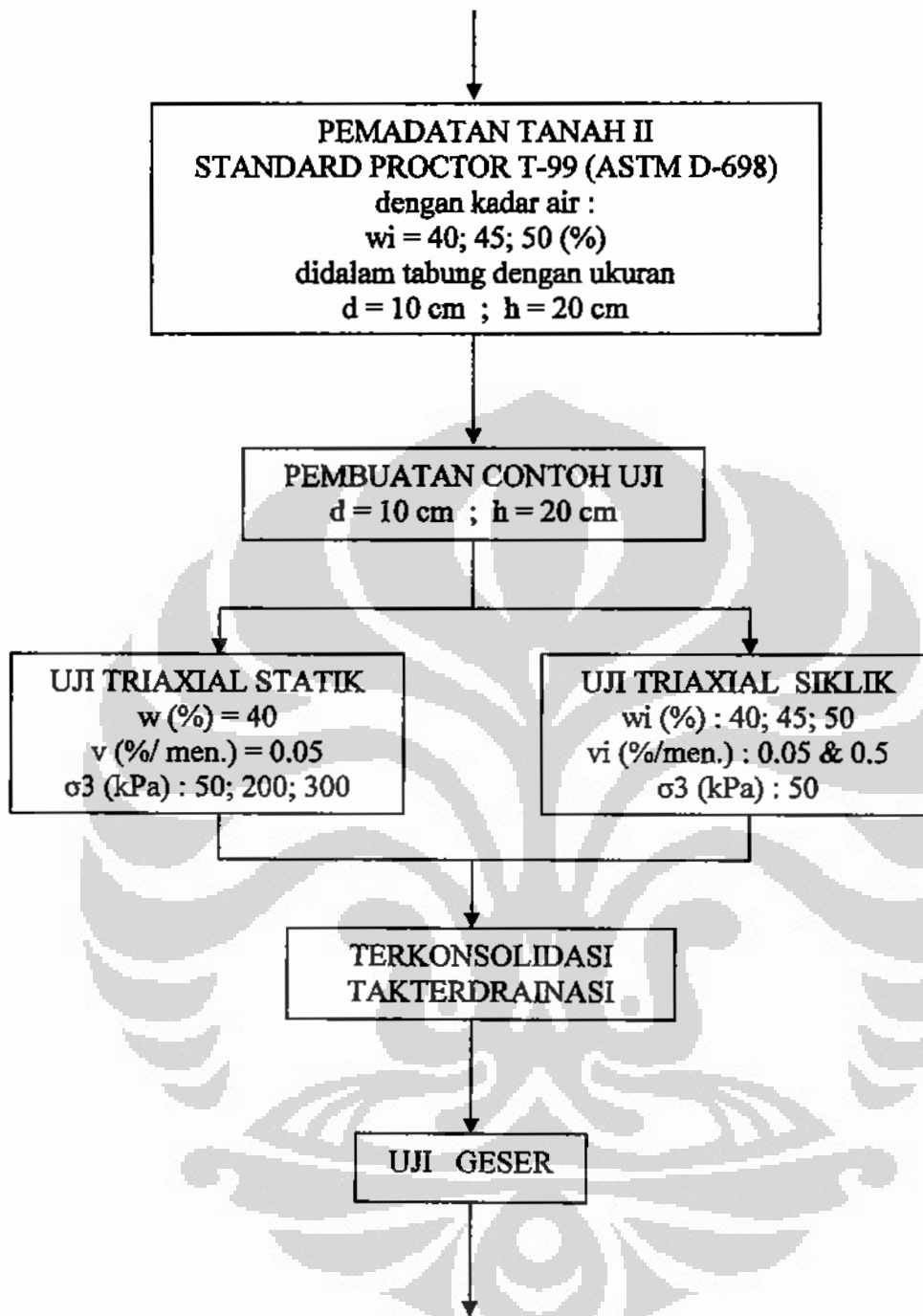


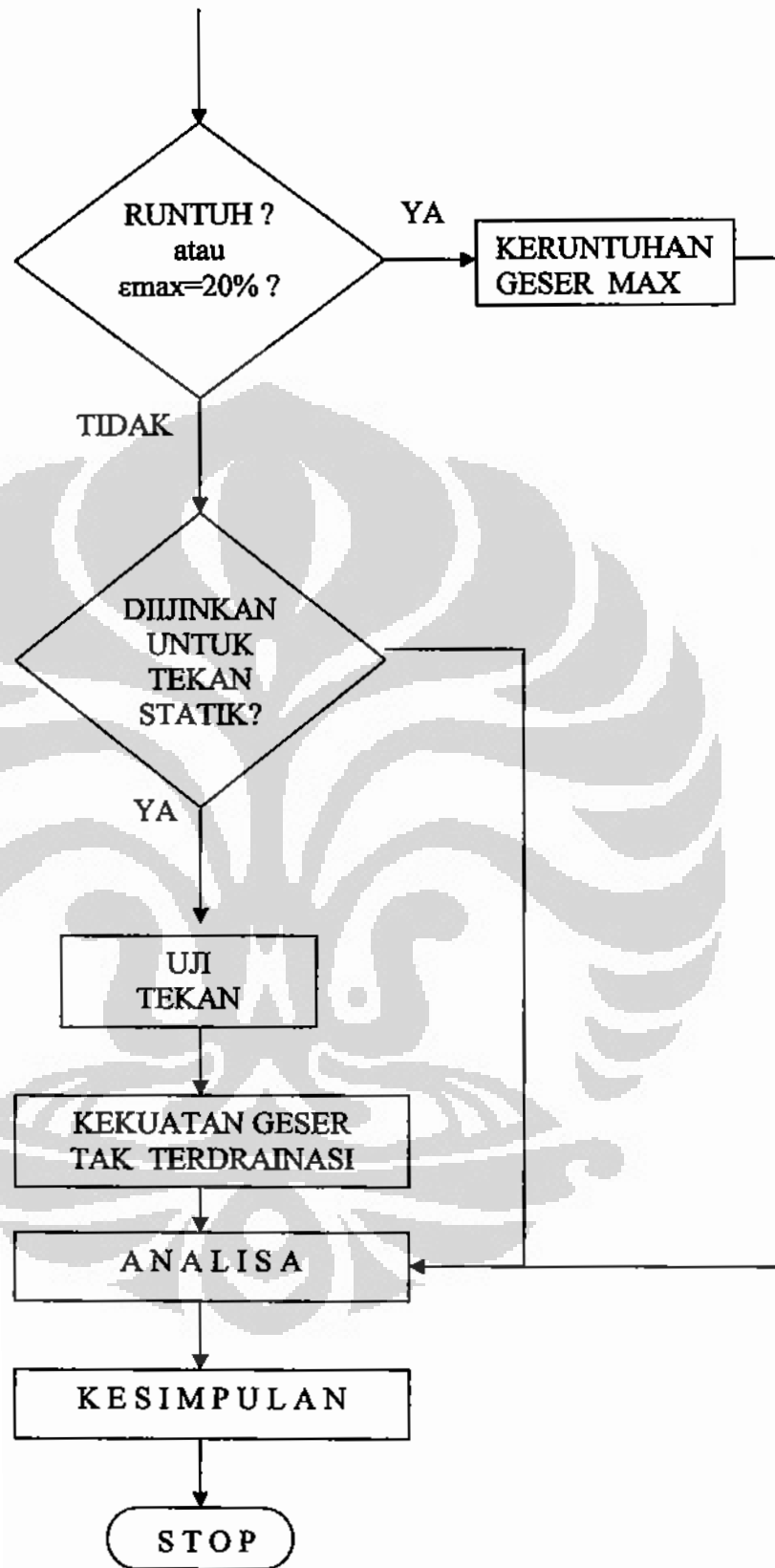
Gambar 3.2 Alat Triaxial dan load cell terpasang

### 3.4 Diagram Alir Penelitian

Untuk memudahkan pelaksanaan pengujian di laboratorium, maka dibuat suatu diagram alir penelitian.







### 3.5 Program Pengujian

Pengujian yang telah dilaksanakan, disajikan pada tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1** Program Pengujian

No.	Uraian (Koefisien B $\geq$ 97%)													
	<i>Contoh Tanah</i>		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1.	$W_1 = 40 \%$		*	*	*	*	*							
2.	$W_2 = 45 \%$							*	*					
3.	$W_3 = 50 \%$									*	*			
4.	$\sigma_{31} = 50 \text{ kPa}$		*			*	*	*	*	*	*			
5.	$\sigma_{32} = 200 \text{ kPa}$			*										
6.	$\sigma_{33} = 300 \text{ kPa}$				*									
7.	$V_1 = 0,05 \%/min.$ (0,10 mm/min.)		*	*	*	*		*		*				
8.	$V_2 = 0,50 \%/min.$ (1,0 mm/min.)						*		*		*			
9.	Statik		*	*	*									
10.	Siklik					*	*	*	*	*	*			
11.	$\epsilon_{max} = 20 \%$		*	*	*	*	*	*	*	*	*			

## **BAB IV**

### **HASIL PENGUJIAN & ANALISIS**

#### **4.1 Pendahuluan**

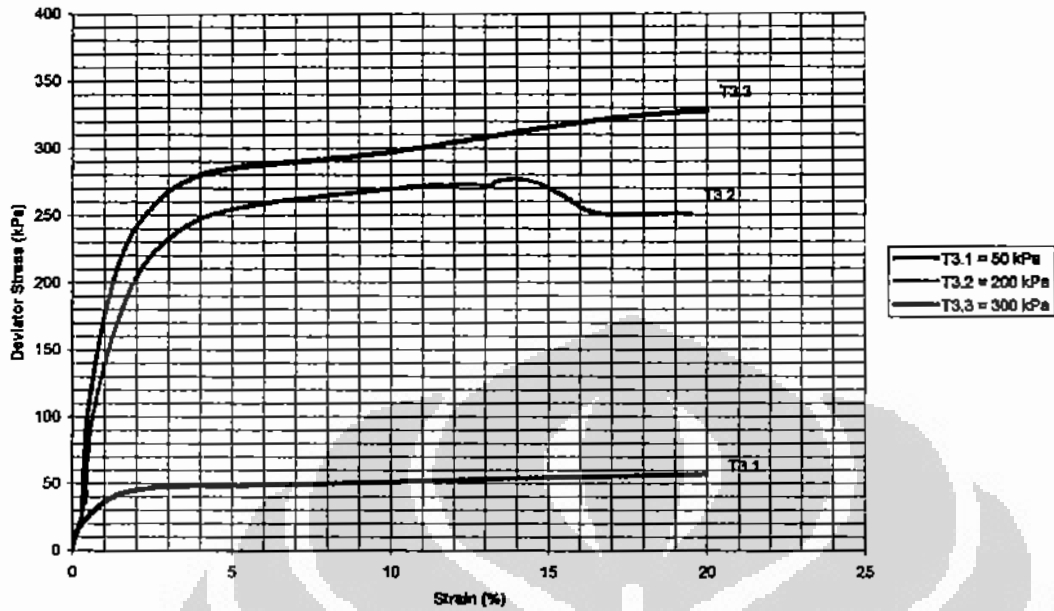
Terhadap contoh uji dilakukan pengujian triaxial secara Statik dan Siklik. Pengujian Statik dilakukan terhadap contoh uji berkadar air 40%, dengan kecepatan pembebanan,  $v = 0,05\%$  per menit ( $\sim 0,10\text{mm/menit}$ ), sedangkan pengujian Siklik dilakukan terhadap contoh uji dengan 3 jenis kadar air yang berbeda yaitu 40, 45 & 50 (%), dengan kecepatan pembebanan pada masing-masing contoh uji adalah  $v = 0,05 \ \& \ 0,50 \%$  per menit ( $\sim 0,10 \ \& \ 1,0 \text{ mm/menit}$ ).

#### **4.2 Pengujian Statik**

Pengujian Statik dilakukan pada contoh uji, D, yang berkadar air 40 %, dengan kecepatan pembebanan sebesar  $v = 0,05\%$  per menit. Terhadap 3 buah contoh yang diberikan tekanan lateral ( $\sigma_3$ ), masing-masing = 50, 200 & 300 (kPa).

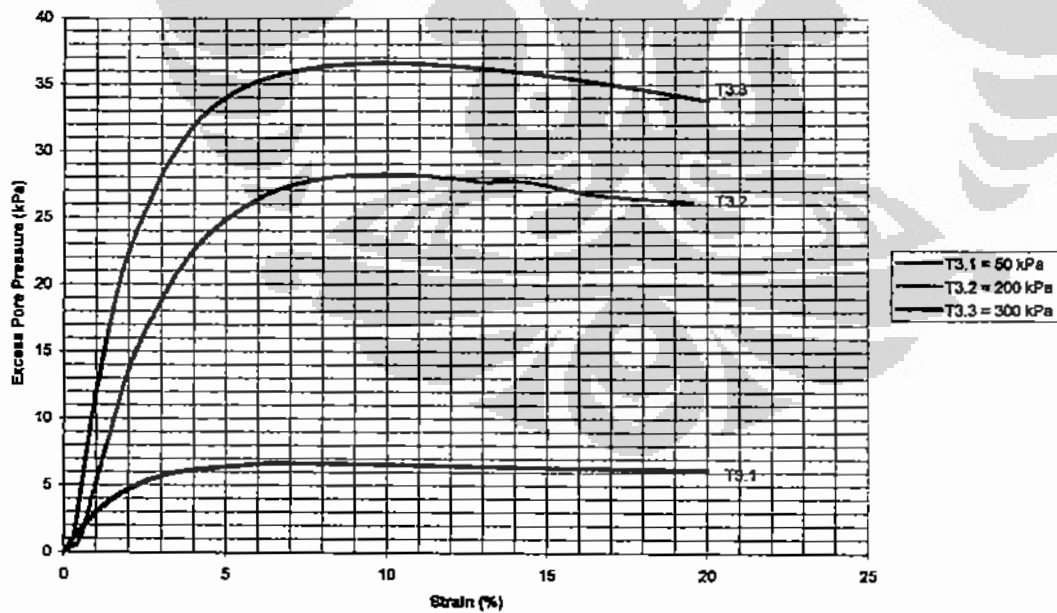
Hasil pengujian terhadap 3 contoh uji disajikan dalam bentuk grafik yaitu hubungan antara tegangan deviator dengan regangan dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan hubungan antara tekanan air pori dengan regangan dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut :

Deviator Stress (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan Statik;  
 $v = 0.05 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50, 200, 300 \text{ kPa}$



**Gambar 4.1** Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji D ( $w=40 \text{ %}$ )

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan Statik;  
 $v = 0.05 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50, 200, 300 \text{ kPa}$



**Gambar 4.2** Hubungan antara tekanan air pori dan regangan akibat beban statik pada contoh uji D ( $w=40 \text{ %}$ )

#### 4.2.1 Analisis Tegangan Deviator & Tekanan Air Pori

Pengujian yang dilakukan pada ketiga contoh uji D, dilakukan dengan kecepatan pembebanan,  $v = 0,05$  % per menit.

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 & 4.2 terlihat bahwa pada contoh uji 1 dengan  $\sigma_3 = 50$  kPa, tegangan deviator yang terjadi cenderung mendatar antara regangan 5 – 8 %, yang kemudian naik sedikit setelah regangan tersebut, hal ini disebabkan karena tekanan air pori mulai turun sedikit setelah regangan 8 %.

Pada contoh uji 2 dengan  $\sigma_3 = 200$  kPa, terjadi sedikit kenaikan tegangan deviator mulai regangan, 8 – 14 %, sedangkan pada contoh uji 3 dengan  $\sigma_3 = 300$  kPa, terjadi sedikit kenaikan tegangan deviator pada regangan antara 8 – 20 %. Hal ini dapat dikatakan pada kedua contoh uji sebagai peristiwa pengerasan regangan (*strain hardening*) sampai regangan 14 & 20 %, yang ditunjukkan dengan mulai menurunnya tekanan air pori pada regangan, 10 %, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2 (Bardet, 1997).

Perilaku pada ketiga contoh uji ini dapat diidealisasikan sebagai pengerasan regangan elastis seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Bardet, 1997). Dari hasil pengujian statik terhadap ketiga contoh uji tersebut terlihat bahwa kekuatan geser efektif mulai sedikit meningkat setelah regangan, 8 %, yang ditunjukkan dengan kecenderungan menurunnya tekanan air pori, sehingga contoh uji terlihat menjadi lebih padat dan sukar runtuh.

Hubungan antara tekanan air pori dengan tegangan deviator ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$\Delta u = B [ \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) ] ; S_r = 100\% , B \approx 1$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \dots\dots\dots (4.1)$$

Pada saat pengujian triaxial,  $\Delta \sigma_3 = 0$ , sehingga persamaan disederhanakan:

$$\Delta u = A (\Delta \sigma_1) \rightarrow A = (\Delta u) / (\Delta \sigma_1) \dots\dots\dots (4.2)$$

Dari hasil pengujian Statik seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.1 & 4.2, dibuatkan tabel Af yang menghubungkan antara tekanan air pori dengan tegangan

deviator maximum pada ketiga contoh uji, seperti ditunjukkan dalam tabel berikut.

**Tabel 4.1** Nilai tekanan air pori dan tegangan deviator maximum.

No.	$\sigma_3$ (kPa)	$\epsilon_i$ (%)	$u_i$ (kPa)	$q_{max}$ (kPa)	$A_f = (u_i / q_{max})$
1.	50	19,650	6,17	57,320	0,1076
2.	200	14,105	27,69	277,274	0,0999
3.	300	19,450	34,05	327,745	0,1039

Berdasarkan nilai parameter  $A_f$  yang diperoleh antara 0,0999 – 0,1076, maka contoh uji cenderung termasuk lempung terkonsolidasi berlebih ringan ( $A_f$  : 0 - 0,50), sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 4.2** Nilai  $A_f$  untuk Jenis-Jenis Tanah (Holtz et al., 1981)

Type of Clay	$A_f$
Highly sensitive clays	$+\frac{3}{4}$ to $+1\frac{1}{2}$
Normally consolidated clays	$+\frac{1}{2}$ to $+1$
Compacted sandy clays	$+\frac{1}{4}$ to $+\frac{3}{4}$
Lightly overconsolidated clays	$0$ to $+\frac{1}{2}$
Compacted clay-gravels	$-\frac{1}{4}$ to $+\frac{1}{4}$
Heavily overconsolidated clays	$-\frac{1}{2}$ to $0$

\*After Skempton (1954).

Sedangkan bentuk kurva tegangan – regangan dari hasil ketiga contoh menyerupai bentuk lempung dipadatkan dan dibentuk kembali (*remolded*) seperti diperlihatkan kurva A pada Gambar 2.4.

#### 4.2.2 Analisis Kondisi Kritis

Analisis konsep kondisi kritis pada contoh uji D dilakukan berdasarkan prinsip tegangan total (*undrained*) dan tegangan effektive sebagai berikut :

$$\text{tegangan total} \quad : p = (\sigma_1 + 2 \sigma_3) / 3 = (q/3) + (\sigma_3) \quad \dots\dots (4.3a)$$

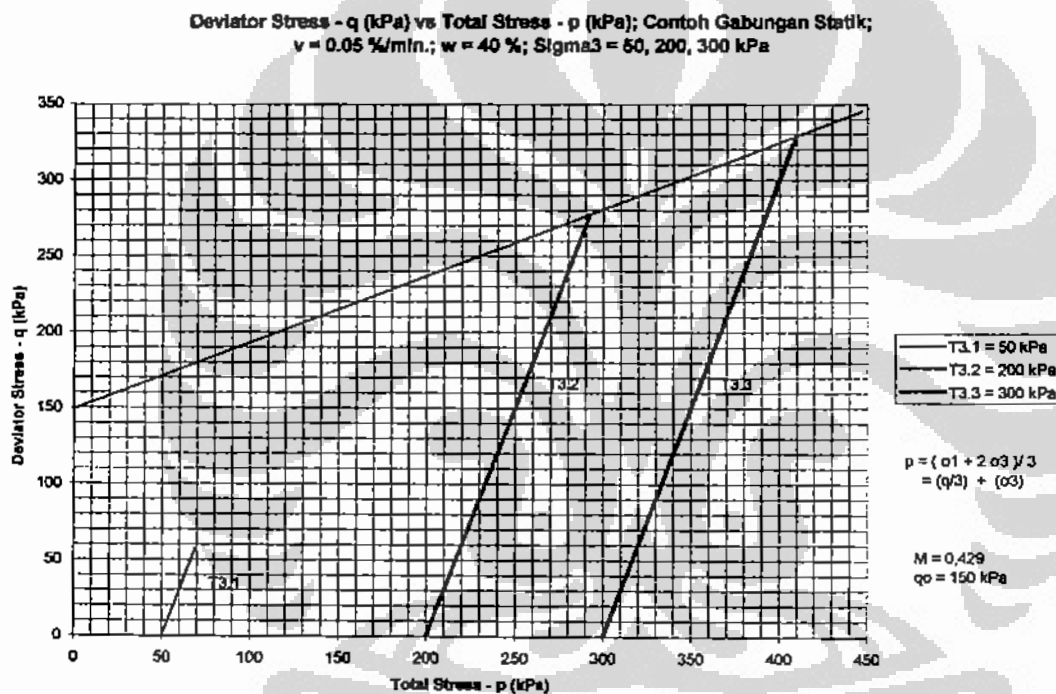


$$\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_3 = q + \sigma_3 \quad \dots\dots\dots (4.3b)$$

$$\text{tegangan efektif: } p' = (\sigma'_1 + 2 \sigma'_3)/3 = (q/3) + (\sigma_3 - u) \quad \dots\dots\dots (4.4a)$$

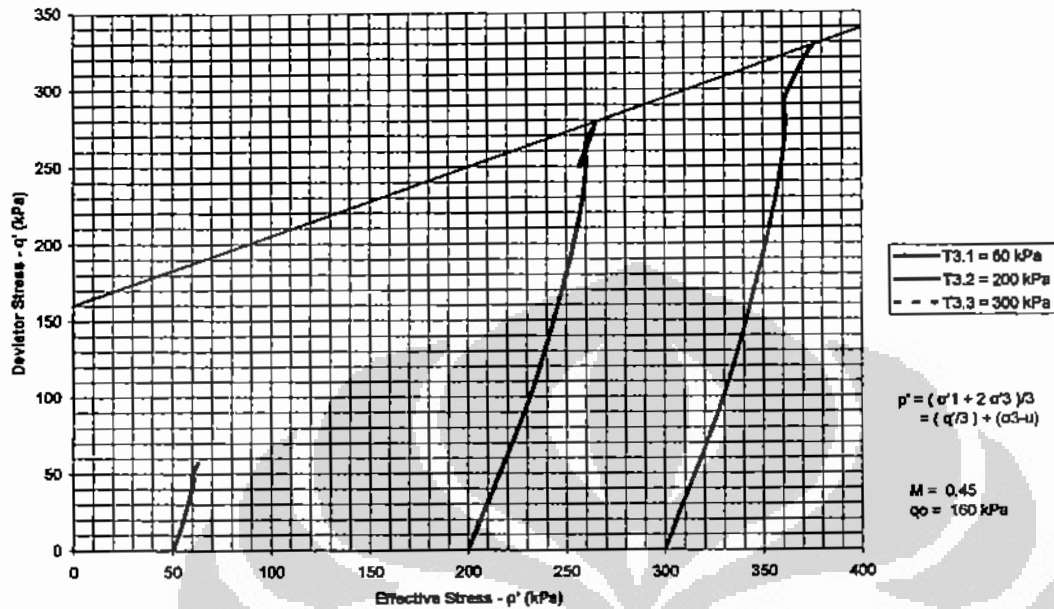
$$\sigma'_1 = \Delta\sigma + \sigma'_3 = q + \sigma'_3 \quad \dots\dots\dots (4.4b)$$

Pada suatu hubungan antara tegangan deviator ( $q$ ) dengan tegangan total ( $p$ ) dan tegangan efektif ( $p'$ ), disajikan suatu garis kondisi kritis (*critical state line*) yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



**Gambar 4.3** Hubungan antara tegangan deviator ( $q$ ) dengan tegangan total ( $p$ ) akibat beban statik pada contoh uji D ( $w = 40 \text{ %}$ )

Deviator Stress -  $q'$  (kPa) vs Effective Stress -  $p'$  (kPa); Contoh Gabungan Statik;  
 $v = 0.05 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50, 200, 300 \text{ kPa}$



**Gambar 4.4** Hubungan antara tegangan deviator ( $q'$ ) dengan tegangan efektif ( $p'$ ) akibat beban statik pada contoh uji D ( $w = 40 \text{ %}$ )

Berdasarkan Gambar 4.3 & 4.4, dilakukan perhitungan nilai kohesi dan sudut geser tanah dalam kondisi total dan efektif sesuai rumus standard (Bardet, 1997) sebagai berikut :

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{3M}{6+M} \right]$$

$$c' = \left[ \frac{3 - \sin \phi}{6 - \sin \phi} \right] \cdot q_0$$

Sehingga didapat nilai-nilai sebagai berikut :

Kondisi total :  $M = 0,429; q_0 \text{ (kPa)} = 150;$   
 $C_u \text{ (kPa)} = 72,41; \phi_u \text{ (}^\circ\text{)} = 11,54$

Kondisi efektif :  $M = 0,45; q_0 \text{ (kPa)} = 160;$   
 $C_e \text{ (kPa)} = 77,113; \phi_e \text{ (}^\circ\text{)} = 12,06$

Berdasarkan kriteria keruntuhan sesuai garis kondisi kritis (*critical state line*) yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 & 4.4, terlihat bahwa akibat beban statik contoh uji D dalam kondisi tegangan total dan tegangan efektif, termasuk lempung terkonsolidasi berlebih seperti halnya sebelum pengujian.

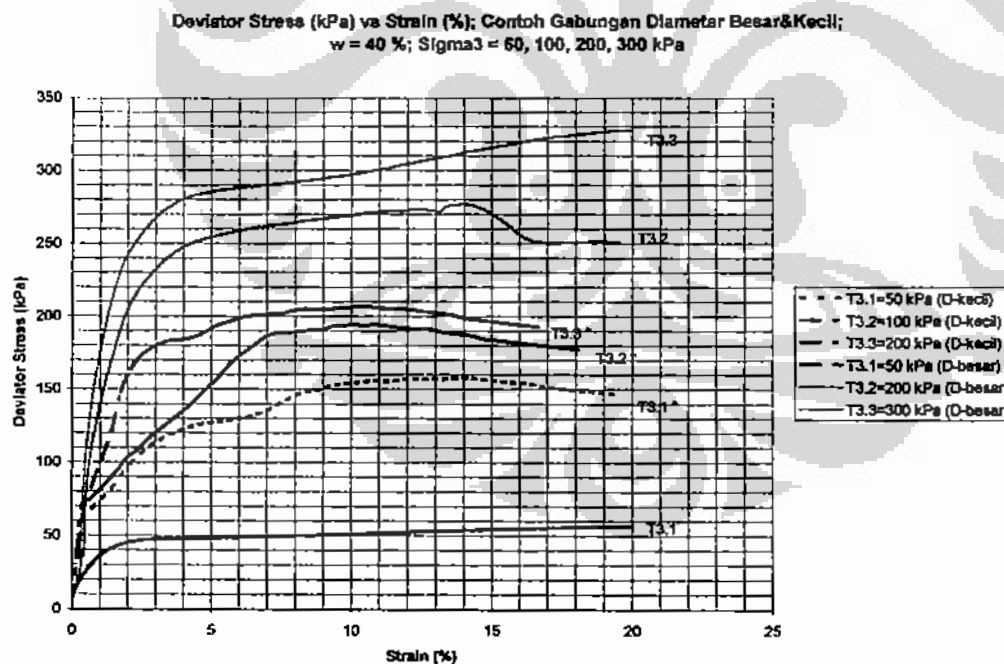
Analisis tegangan efektif ( $p'$ ) pada kondisi kritis didasarkan pada suatu kondisi regangan maximum ( $\epsilon_{max} = 20\%$ ), yang ditunjukkan dalam tabel berikut :

**Tabel 4.3** Nilai tekanan air pori pada regangan maximum

No.	$\sigma_3$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (%)	$u_i$ (kPa)	$q$ (kPa)	$p'=(q/3) + (\sigma_3 - u)$ (kPa)
1.	50	20	6,19	55,557	66,662
2.	200	20	26,17	250,819	257,436
3.	300	20	33,79	327,015	375,215

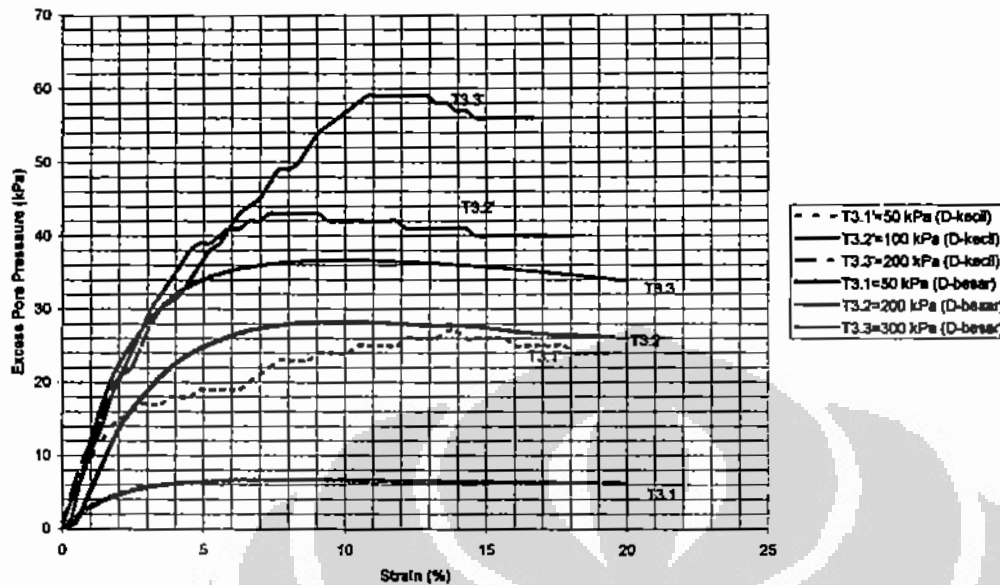
#### 4.2.3 Hasil Pengujian Diameter Besar & Kecil

Pada Gambar 4.5 dan 4.6, diperlihatkan hasil pengujian gabungan antara contoh uji diameter besar ( $d = 10$  cm) dan diameter kecil ( $d = 3,5$  cm) dengan kadar air awal,  $w = 40\%$ , dalam hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan.



**Gambar 4.5** Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji diameter besar & kecil ( $w = 40\%$ )

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan Diameter Besar&Kecil;  
 $w = 40\%$ ;  $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300$  kPa



Gambar 4.6 Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan akibat beban statik pada contoh uji diameter besar & kecil ( $w = 40\%$ )

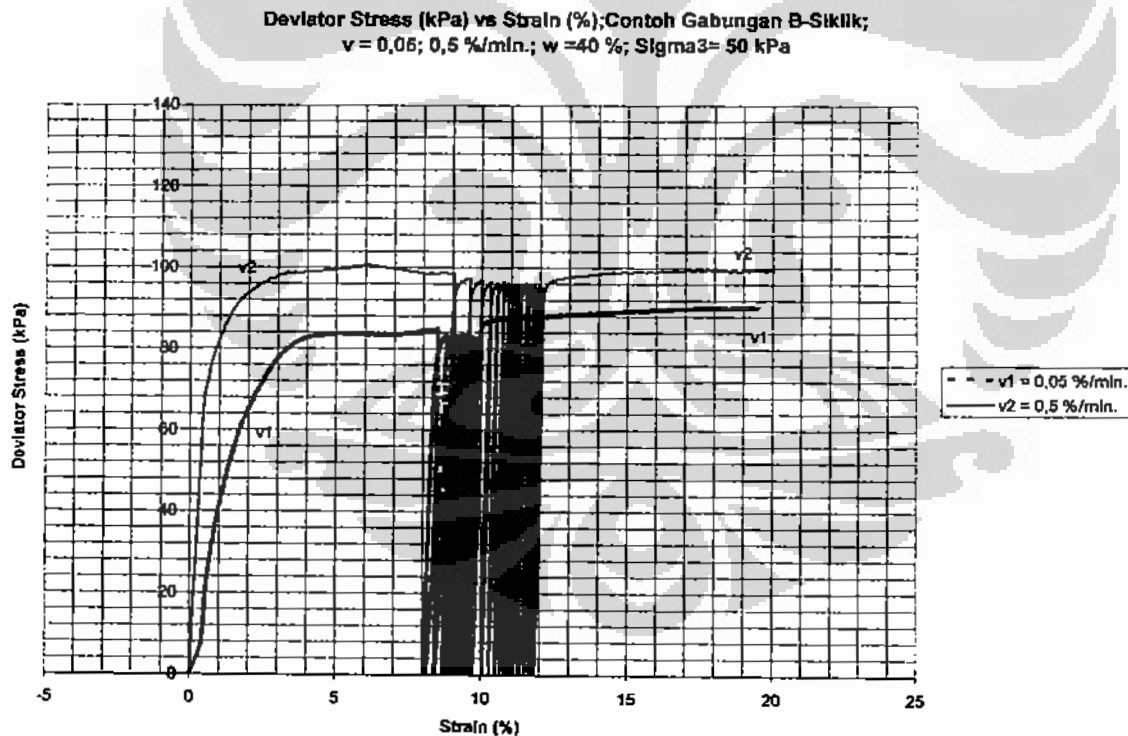
Hasil pengujian gabungan pada contoh uji diameter besar & kecil, dalam hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, menunjukkan nilai perbedaan yang relative cukup besar pada  $\sigma_3 = 50$  kPa, sedangkan pada  $\sigma_3 = 200$  kPa, menunjukkan nilai perbedaan yang relative tidak besar.

Sehingga pada contoh uji diameter besar dengan  $\sigma_3 = 200, 300$  kPa, menunjukkan hasil yang cukup baik dalam hubungan tegangan deviator dengan tekanan air pori.

### 4.3 Pengujian Siklik 1 – Contoh Uji B ( $w = 40\%$ )

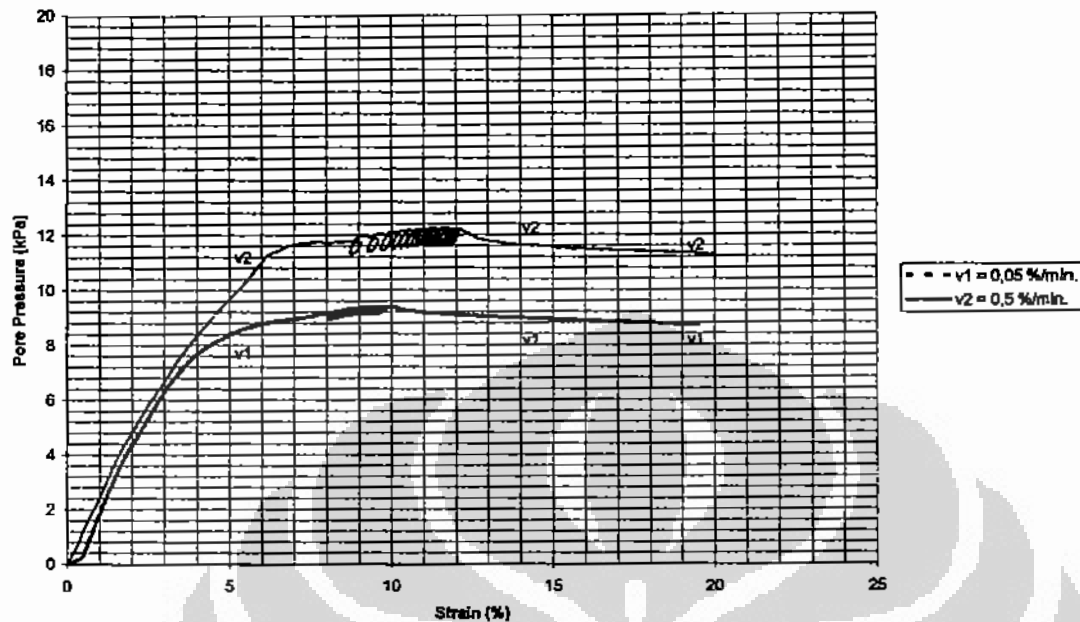
Kecepatan pembebanan pada contoh uji B dengan kadar air awal, 40 %, dilakukan dengan 2 (dua) macam kecepatan yaitu masing-masing sebesar,  $v_1 = 0,05$  %/menit (= 0,1 mm/menit) dan  $v_2 = 0,5$  %/menit (= 1,0 mm/menit), dengan tekanan sell,  $\sigma_3 = 50$  (kPa). Pembebanan statik pra siklik dilakukan sampai regangan antara 8 – 9 (%), kemudian pembebanan siklik dilakukan secara manual pada regangan antara 8 – 12 (%), setelah itu dilakukan pembebanan statik pasca siklik sampai regangan mencapai 20 %.

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik-grafik. Suatu hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, disajikan masing-masing pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8, sedangkan hubungan antara delta regangan dan delta tekanan air pori dengan jumlah silus (N), disajikan masing-masing pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, sebagai berikut.



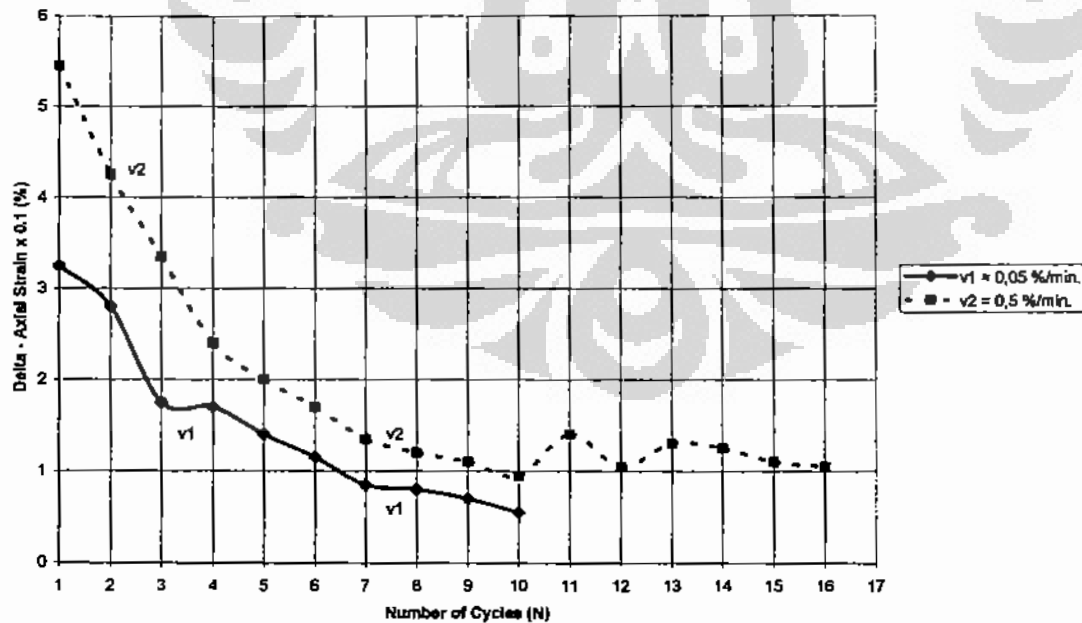
**Gambar 4.7** Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40$  %)

Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan B-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



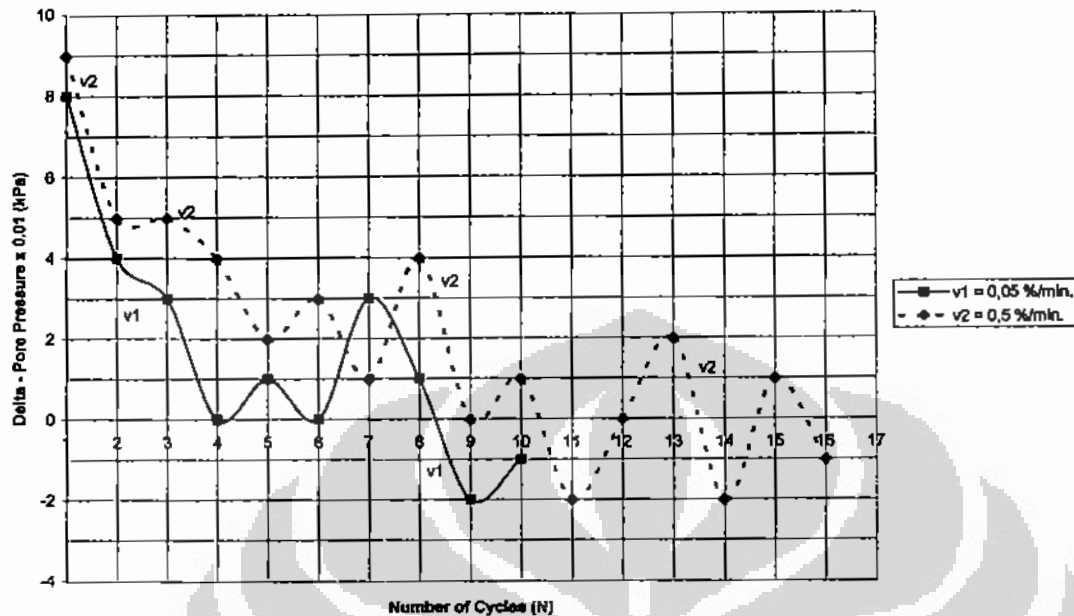
**Gambar 4.8** Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40 \text{ %}$ )

Delta - Axial strain (%) vs Number of Cycles (N); Contoh Gab. B-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.9** Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40 \text{ %}$ )

Delta - Pore Pressure (kPa) vs Number of Cycles (N); Contoh Gab. B-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 40 \text{ %}; \sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.10** Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji B ( $w = 40 \text{ %}$ )

#### 4.3.1 Analisis

##### 4.3.1.1 Regangan

Dari pengujian yang telah dilakukan, Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian triaxial siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan yang berbeda. Kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,5 \text{ %/menit}$  menghasilkan tegangan deviator yang lebih besar dari pada pembebanan  $v_1 = 0,05 \text{ %/menit}$ . Hal ini sesuai seperti yang dinyatakan oleh Taylor, 1943 (dalam Bishop et al., 1982) melalui grafik dalam hubungan antara tegangan deviator dengan kecepatan regangan axial yang dapat dilihat pada Lampiran. Pada pembebanan siklik yang dilakukan pada regangan antara 8 - 12 (%), terjadi regangan terbesar pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada contoh uji selama beban siklik

Dari Gambar 4.9, diperlihatkan bahwa delta regangan (%) terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus berikutnya. Delta regangan

terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan yang lebih tinggi ( $v_2$ ) bila dibandingkan dengan akibat kecepatan pembebanan yang lebih rendah ( $v_1$ ). Untuk jumlah siklus ( $N$ ) antara 1 - 7, terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar, sedangkan untuk  $N$  antara 7 - 10, perbedaan delta regangan menjadi lebih kecil, akibat kedua kecepatan pembebanan yang berbeda.

Keadaan terjadinya regangan yang makin kecil dan perbedaan delta regangan yang menjadi lebih kecil dengan bertambahnya jumlah siklus beban siklik adalah sesuai seperti yang dinyatakan oleh Miller et al., 2000 dengan menyatakan bahwa kondisi tersebut menunjukkan contoh uji yang stabil sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.9 dan dapat dinyatakan contoh uji menjadi lebih padat.

#### 4.3.1.2 Tekanan air pori

Pada Gambar 4.8 diperlihatkan bahwa tekanan air pori yang terbesar terjadi pada beban siklik dengan kecepatan lebih tinggi yang mengikuti pola tegangan deviator, dengan perbedaan rata-rata sebesar 2,8 kPa. Kecenderungan ini timbul karena akibat kecepatan beban siklik yang lebih tinggi pada  $v_2 = 0,5$  %/menit, menimbulkan tegangan deviator yang lebih besar sehingga terjadi tekanan air pori lebih besar juga. Hal ini mengakibatkan terjadinya kekuatan geser efektif yang lebih kecil sehingga regangan yang terjadi menjadi lebih besar.

Sedangkan pada Gambar 4.10 ditunjukkan bahwa kondisi yang terjadi pada pola delta tekanan air pori menyerupai kecenderungan yang terjadi pada delta regangan yaitu terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus berikutnya. Untuk  $N$  antara 2 - 10, terjadi perbedaan delta tekanan air pori yang relative tidak besar dan mempunyai pola yang sama akibat kedua kecepatan pembebanan.

Seperti diperlihatkan Gambar 4.10, delta tekanan air pori yang terjadi selama beban siklik akibat kedua kecepatan pembebanan cenderung menurun dari siklus pertama sampai siklus berikutnya. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban siklik, cenderung relative stabil.

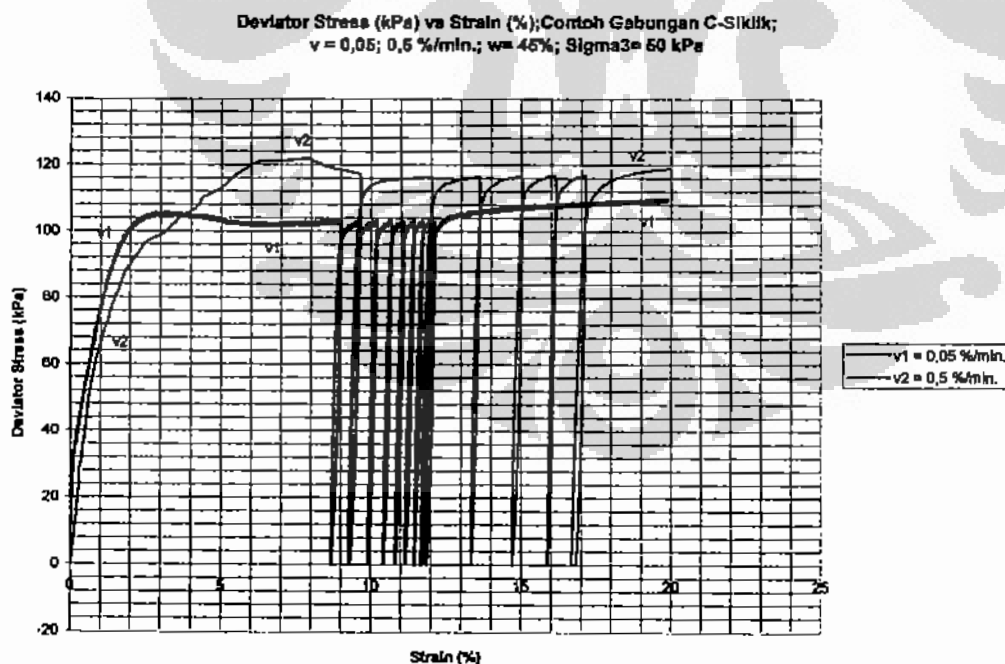


Sedangkan tekanan air pori yang terjadi pasca beban siklik cenderung menurun, sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban statik pasca beban siklik, cenderung meningkat.

#### 4.4 Pengujian Siklik 2 – Contoh Uji C ( $w = 45\%$ )

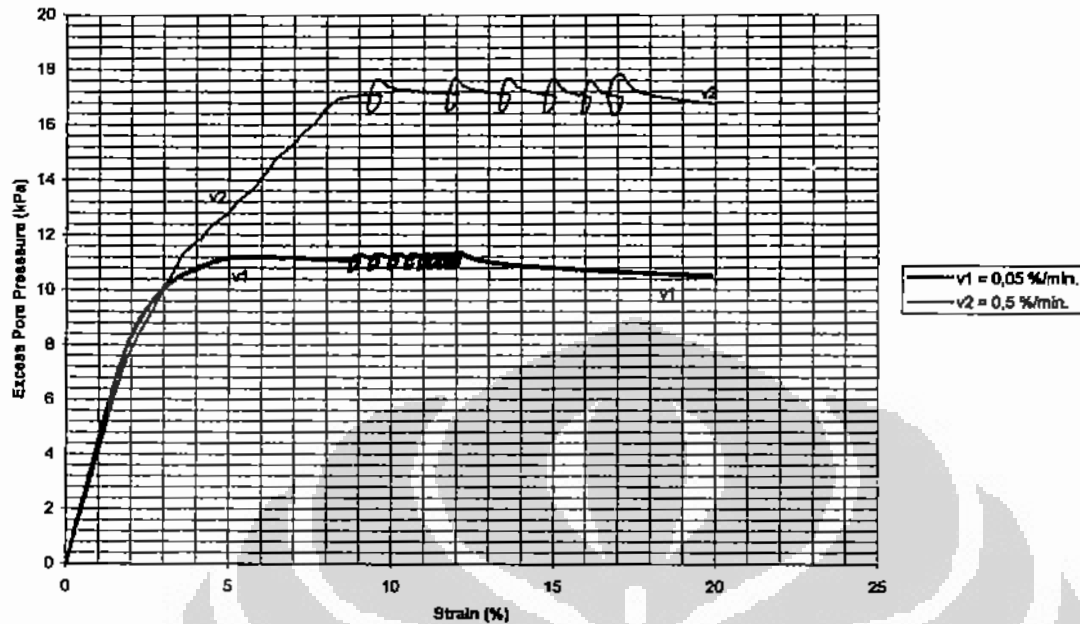
Kecepatan pembebanan pada contoh uji C dengan kadar air awal, 45 %, dilakukan dengan 2 (dua) macam kecepatan yaitu masing-masing sebesar,  $v_1 = 0,05$  %/menit (0,1 mm/menit) dan  $v_2 = 0,5$  %/menit (1,0 mm/menit), dengan tekanan sell,  $\sigma_3 = 50$  (kPa). Pembebanan statik pra siklik dilakukan sampai regangan antara 8 – 10 (%), kemudian pembebanan siklik dilakukan secara manual pada regangan antara 8 – 17 (%), setelah itu dilakukan pembebanan statik pasca siklik sampai regangan mencapai 20 %

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik-grafik. Suatu hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, disajikan masing-masing pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, sedangkan hubungan antara delta regangan dan delta tekanan air pori dengan jumlah silus (N), disajikan masing-masing pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14, sebagai berikut.



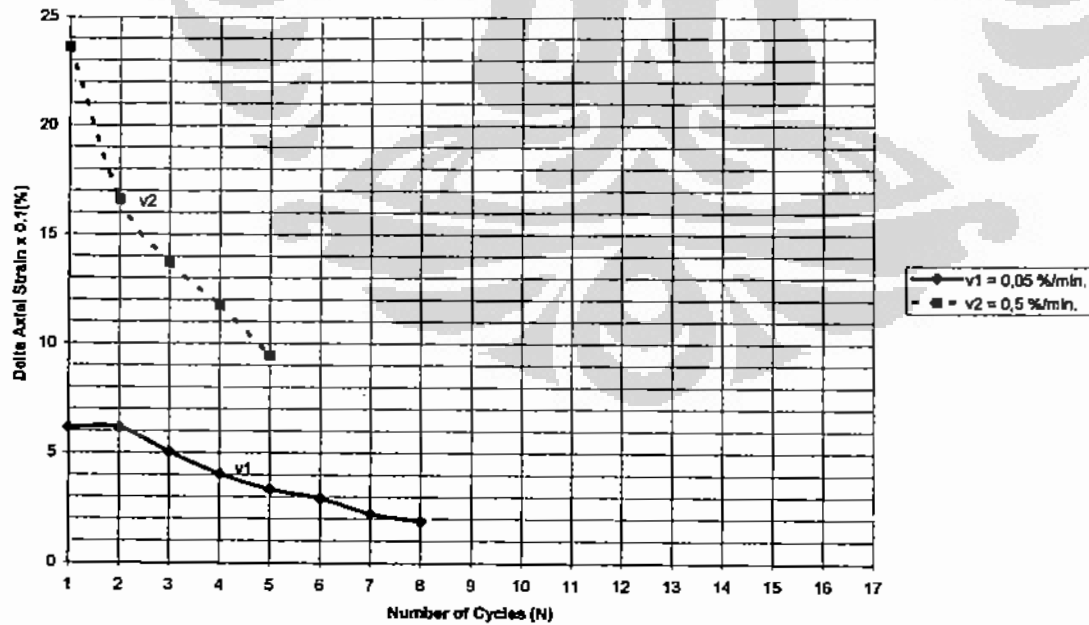
**Gambar 4.11** Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45\%$ )

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan C-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 45 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



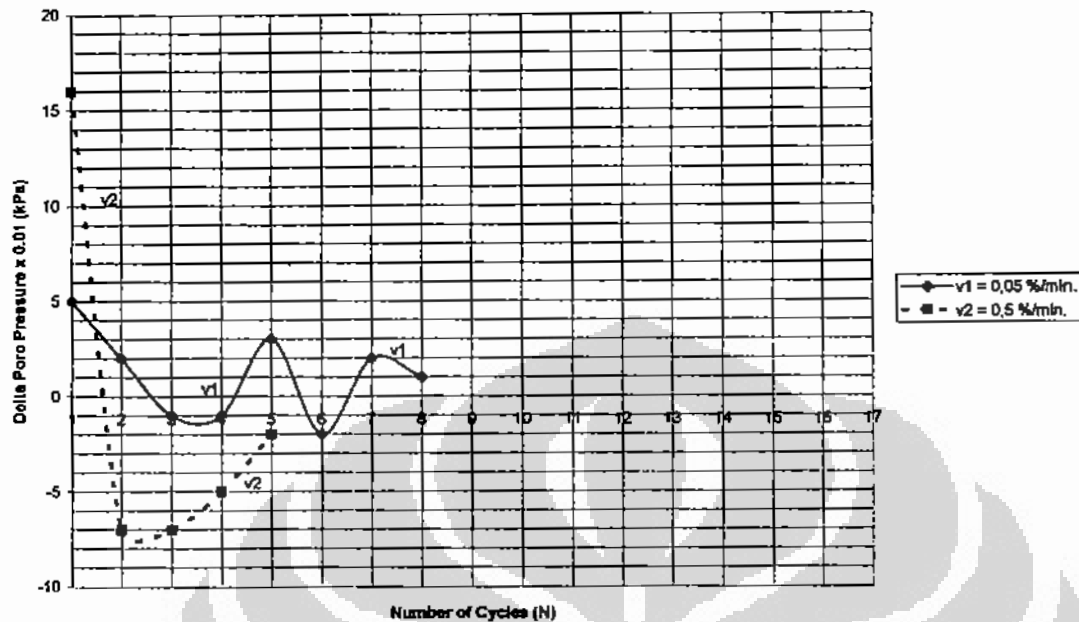
**Gambar 4.12** Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45 \text{ %}$ )

Delta Axial Strain (%) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan C-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 45 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.13** Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45 \text{ %}$ )

Delta Pore Pressure (kPa) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan C-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 45 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 60 \text{ kPa}$



**Gambar 4.14** Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji C ( $w = 45 \text{ %}$ )

#### 4.4.1 Analisis

##### 4.4.1.1 Regangan

Dari pengujian yang telah dilakukan, Gambar 4.11 menunjukkan hasil pengujian triaxial siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan yang berbeda. Kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,5 \text{ %/menit}$  menghasilkan tegangan deviator yang lebih besar dari pada kecepatan pembebanan  $v_1 = 0,05 \text{ %/menit}$ . Hal ini sesuai seperti yang dinyatakan oleh Taylor, 1943 (dalam Bishop et al., 1982) melalui grafik dalam hubungan antara tegangan deviator dengan kecepatan regangan axial yang dapat dilihat pada Lampiran. Pada pembebanan siklik yang dilakukan pada regangan antara 8 - 17 (%), terjadi regangan terbesar pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada contoh uji selama beban siklik.

Dari Gambar 4.13, diperlihatkan bahwa delta regangan (%) terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus berikutnya. Delta regangan

terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan yang lebih tinggi ( $v_2$ ) bila dibandingkan dengan akibat kecepatan pembebanan yang lebih rendah ( $v_1$ ). Untuk jumlah siklus ( $N$ ) antara 1 - 5, terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar akibat kecepatan pembebanan  $v_2$ , sedangkan akibat kecepatan pembebanan  $v_1$  terjadi perbedaan delta regangan yang relative kecil pada siklus ( $N$ ) antara 1 - 8.

Keadaan terjadinya regangan yang makin kecil dan perbedaan delta regangan yang menjadi lebih kecil dengan bertambahnya jumlah siklus beban siklik adalah sesuai seperti yang dinyatakan oleh Miller et al., 2000 dengan menyatakan bahwa kondisi tersebut menunjukkan contoh uji yang stabil sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.13 dan dapat dinyatakan contoh uji menjadi lebih padat.

#### 4.4.1.2 Tekanan Air Pori

Pada Gambar 4.12, diperlihatkan bahwa tekanan air pori yang terbesar terjadi pada beban siklik dengan kecepatan lebih tinggi yang mengikuti pola tegangan deviator, dengan perbedaan rata-rata sebesar 6 kPa.

Sedangkan pada Gambar 4.14, ditunjukkan bahwa pola delta tekanan air pori yang terjadi bervariasi dari nilai positive menjadi negative. Delta tekanan air pori terbesar terjadi pada siklus pertama akibat kedua kecepatan pembebanan yang kemudian menurun atau berubah menjadi negative untuk siklus berikutnya.

Kecenderungan ini mungkin terjadi karena adanya gangguan secara mikro striktur pada contoh uji walaupun pada grafik hubungan antara tekanan air pori dengan regangan (Gambar 4.11) tidak terlihat adanya hal yang mencurigakan. Hasil yang diperoleh dari pengujian akibat beban siklik pada contoh uji C ini, menimbulkan delta regangan dan delta tekanan air pori yang terbesar terjadi pada siklus ( $N$ ) pertama.

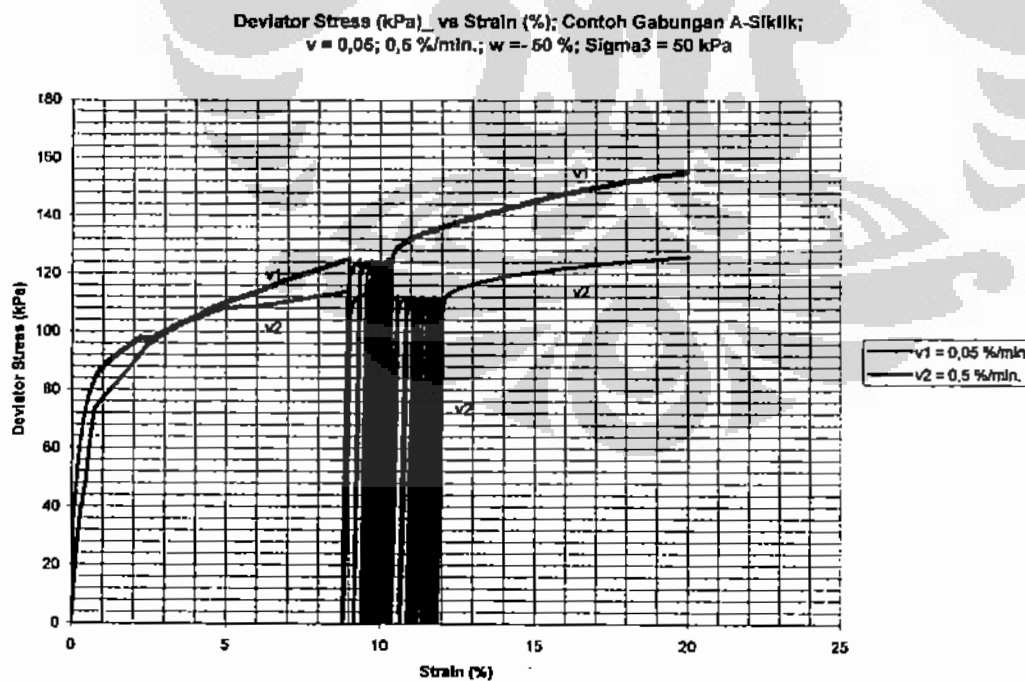
Seperti diperlihatkan Gambar 4.14, delta tekanan air pori yang terjadi selama beban siklik akibat kedua kecepatan pembebanan cenderung menurun dari siklus pertama sampai siklus berikutnya. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban siklik, cenderung relative stabil.

Sedangkan tekanan air pori yang terjadi pasca beban siklik cenderung menurun, sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban statik pasca beban siklik, cenderung meningkat.

#### 4.5 Pengujian Siklik 3 – Contoh Uji A ( $w = 50\%$ )

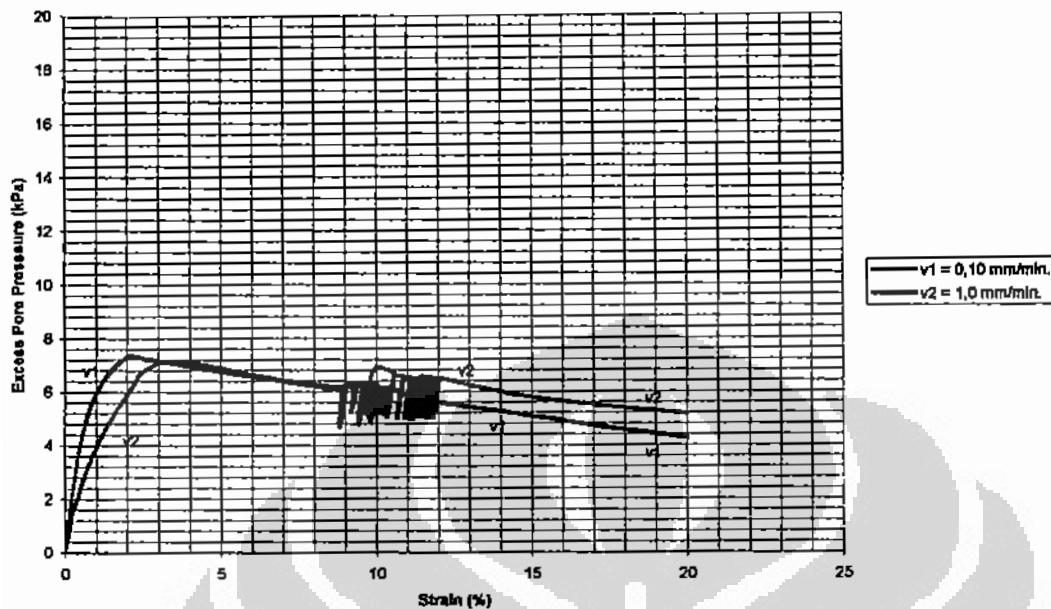
Kecepatan pembebanan pada contoh uji A dengan kadar air awal, 50 %, dilakukan dengan 2 (dua) macam kecepatan yaitu masing-masing sebesar,  $v_1 = 0,05$  %/menit (0,1 mm/menit) dan  $v_2 = 0,5$  %/menit (1,0 mm/menit), dengan tekanan sell,  $\sigma_3 = 50$  (kPa). Pembebanan statik pra siklik dilakukan sampai regangan antara 8 – 9 (%), kemudian pembebanan siklik dilakukan secara manual pada regangan antara 8 – 12 (%), setelah itu dilakukan pembebanan statik pasca siklik sampai regangan mencapai 20 %.

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik-grafik. Suatu hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, disajikan masing-masing pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16, sedangkan hubungan antara delta regangan dan delta tekanan air pori dengan jumlah siklus (N), disajikan masing-masing pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18, sebagai berikut.



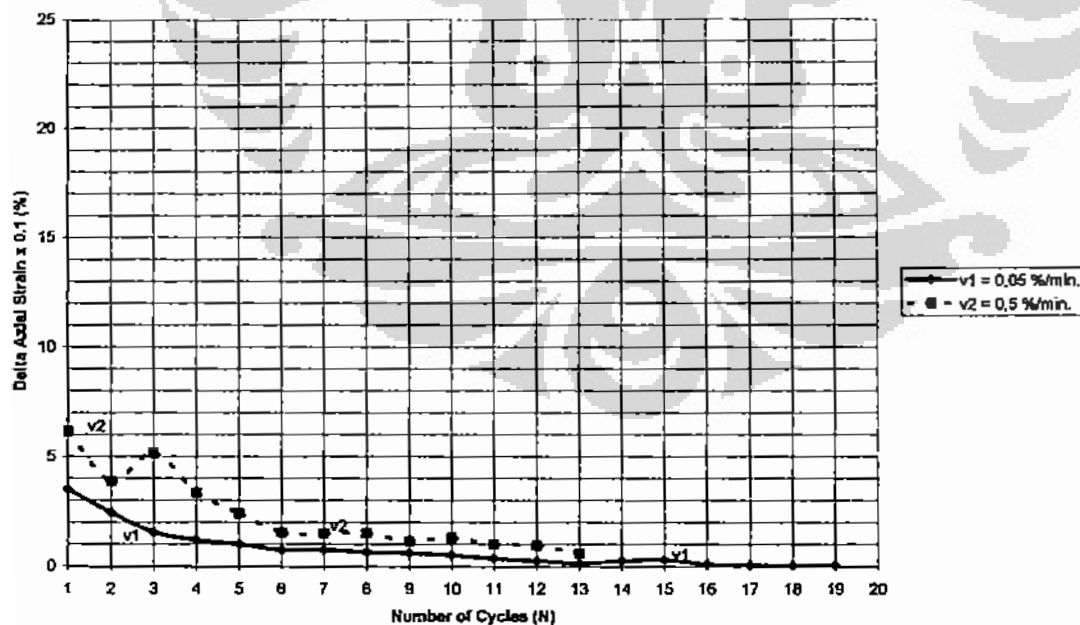
**Gambar 4.15** Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50$  %)

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan A-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



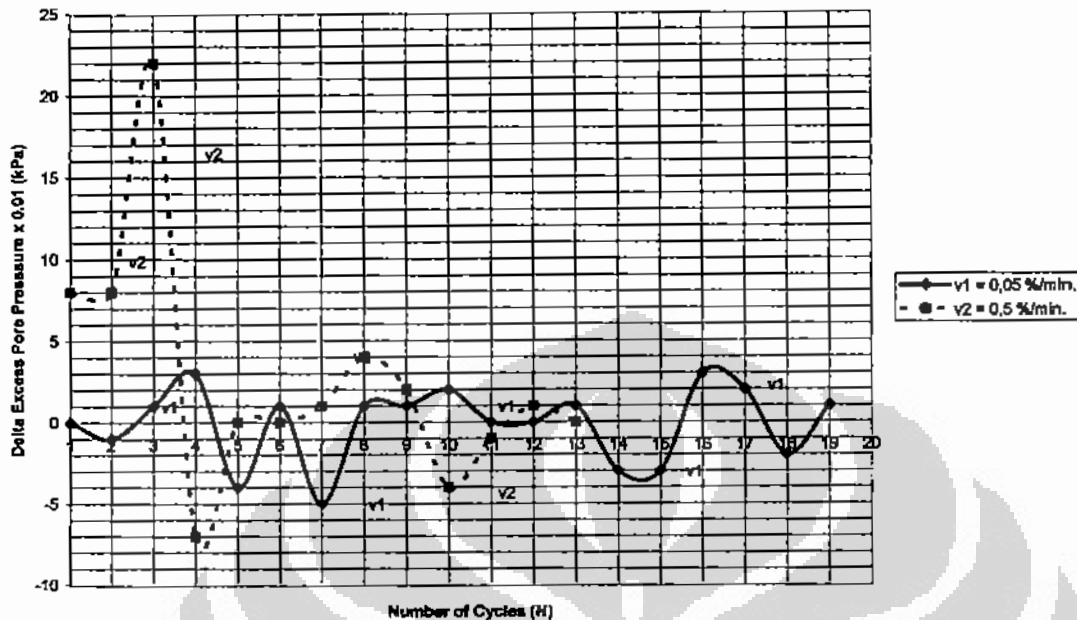
**Gambar 4.16** Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50 \text{ %}$ )

Delta Axial Strain (%) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan A-Siklik ;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.17** Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50 \text{ %}$ )

Delta Excess Pore Pressure (kPa) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan A-Siklik;  
 $v = 0,05; 0,5 \text{ %/min.}; w = 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.18** Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik pada contoh uji A ( $w = 50 \text{ %}$ )

#### 4.5.1 Analisis

##### 4.5.1.1 Regangan

Dari pengujian yang telah dilakukan, Gambar 4.15 menunjukkan hasil pengujian triaxial siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan yang berbeda. Kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,5 \text{ %/menit}$  menghasilkan tegangan deviator yang lebih kecil dari pada kecepatan pembebanan  $v_1 = 0,05 \text{ %/menit}$ . Hal ini memang berlawanan seperti yang dinyatakan oleh Taylor, 1943 (dalam Bishop et al., 1982) tetapi delta regangan yang terjadi sudah sesuai yaitu terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan yang lebih tinggi ( $v_2$ ). Kondisi ini terjadi mungkin akibat adanya gangguan selama pengujian. Pada pembebanan siklik yang dilakukan pada regangan antara 9 - 12 (%), terjadi regangan terbesar pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pematatan pada contoh uji selama beban siklik.

Dari Gambar 4.17, diperlihatkan bahwa delta regangan (%) terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus berikutnya. Delta regangan terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan yang lebih tinggi ( $v_2$ ) bila dibandingkan dengan akibat kecepatan pembebanan yang lebih rendah ( $v_1$ ), yang mana fenomena ini sesuai seperti yang dinyatakan oleh Taylor, 1943 (dalam Bishop et al., 1982). Untuk jumlah siklus (N) antara 1 - 6, terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar sedangkan pada siklus (N) antara 6 - 13, terjadi perbedaan delta regangan yang relative kecil akibat kedua kecepatan pembebanan.

Keadaan terjadinya regangan yang makin kecil dan perbedaan delta regangan yang menjadi lebih kecil dengan bertambahnya jumlah siklus beban siklik adalah sesuai seperti yang dinyatakan oleh Miller et al., 2000, dengan menyatakan bahwa kondisi tersebut menunjukkan contoh uji yang stabil sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.17 dan dapat dinyatakan contoh uji menjadi lebih padat.

#### 4.5.1.2 Tekanan Air Pori

Pada Gambar 4.16, diperlihatkan bahwa tekanan air pori yang relative lebih besar terjadi akibat kecepatan beban siklik lebih tinggi dengan perbedaan rata-rata sebesar 4 kPa, yang mana pola tekanan air pori berlawanan dengan pola tegangan deviator.

Sedangkan pada Gambar 4.18, ditunjukkan bahwa pola delta tekanan air pori yang terjadi bervariasi dari nilai positive menjadi negative lalu positive.

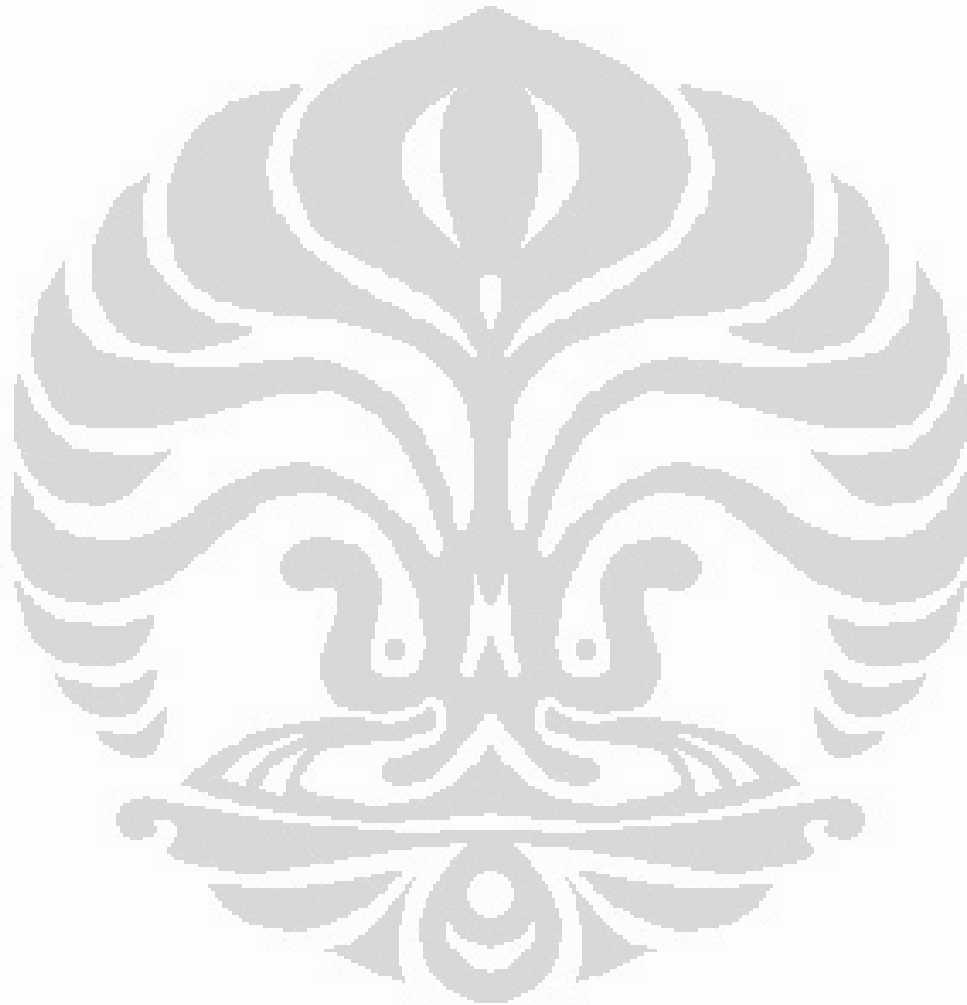
Delta tekanan air pori terbesar terjadi pada siklus pertama akibat kedua kecepatan pembebanan yang kemudian menurun atau berubah menjadi negative untuk siklus berikutnya.

Kecenderungan ini mungkin terjadi karena adanya gangguan secara mikro striktur pada contoh uji walaupun pada grafik hubungan antara tekanan air pori dengan regangan (Gambar 4.16) tidak terlihat adanya hal yang mencurigakan. Hasil yang diperoleh dari pengujian akibat beban siklik pada contoh uji A ini sama dengan contoh uji yang lain yaitu menimbulkan delta regangan dan delta tekanan air pori yang terbesar terjadi pada siklus (N) pertama.



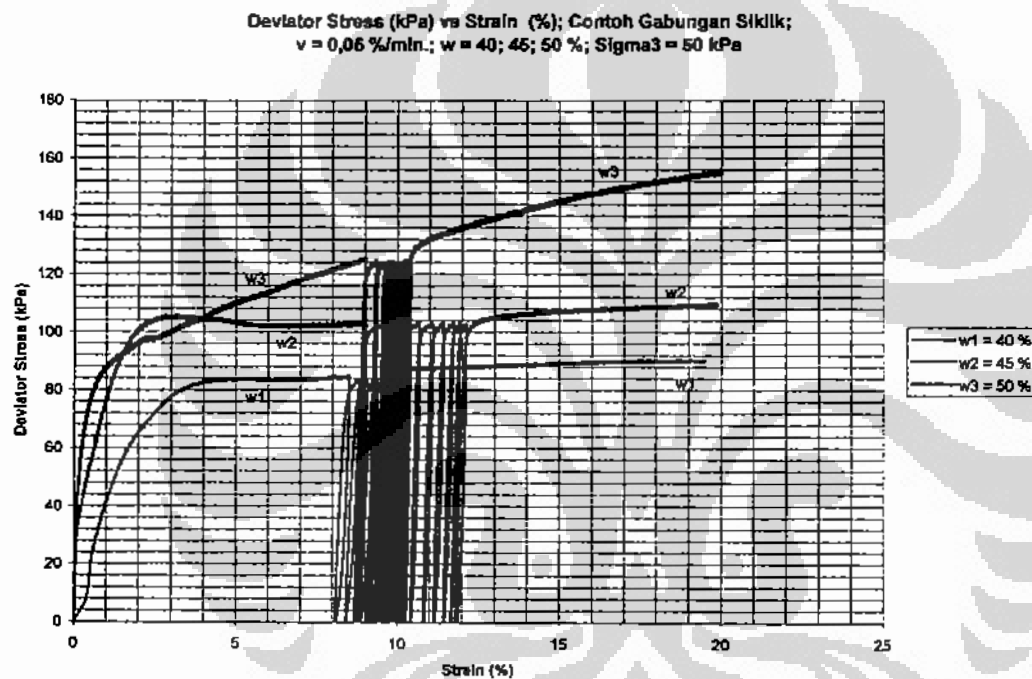
Seperti diperlihatkan Gambar 4.18, delta tekanan air pori yang terjadi selama beban siklik akibat kedua kecepatan pembebanan cenderung menurun dari siklus pertama sampai siklus berikutnya. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban siklik, cenderung relative stabil.

Sedangkan tekanan air pori yang terjadi pasca beban siklik cenderung menurun, sehingga dapat dinyatakan bahwa kekuatan geser efektif selama beban statik pasca beban siklik, cenderung meningkat.



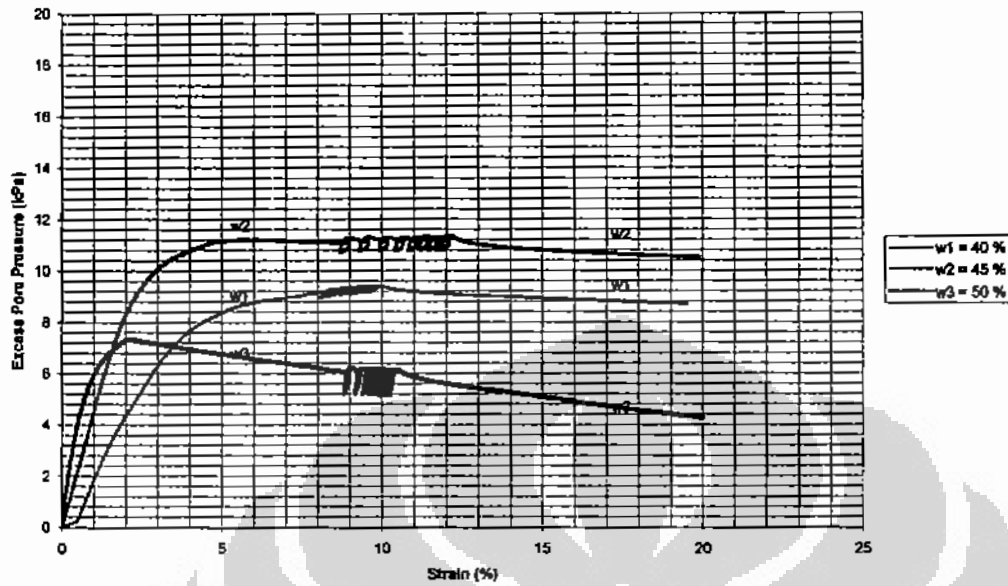
#### 4.6 Pengujian Siklik Gabungan VI

Hasil pengujian dengan kecepatan pembebanan  $v_1 = 0,05$  (%/menit) = 0,10 (mm/menit) terhadap 3 contoh uji dengan kadar air awal 40, 45 & 50 (%), disajikan dalam bentuk grafik-grafik. Suatu hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, disajikan masing-masing pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20, sedangkan hubungan antara delta regangan dan delta tekanan air pori dengan jumlah siklus (N), disajikan masing-masing pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22, sebagai berikut.



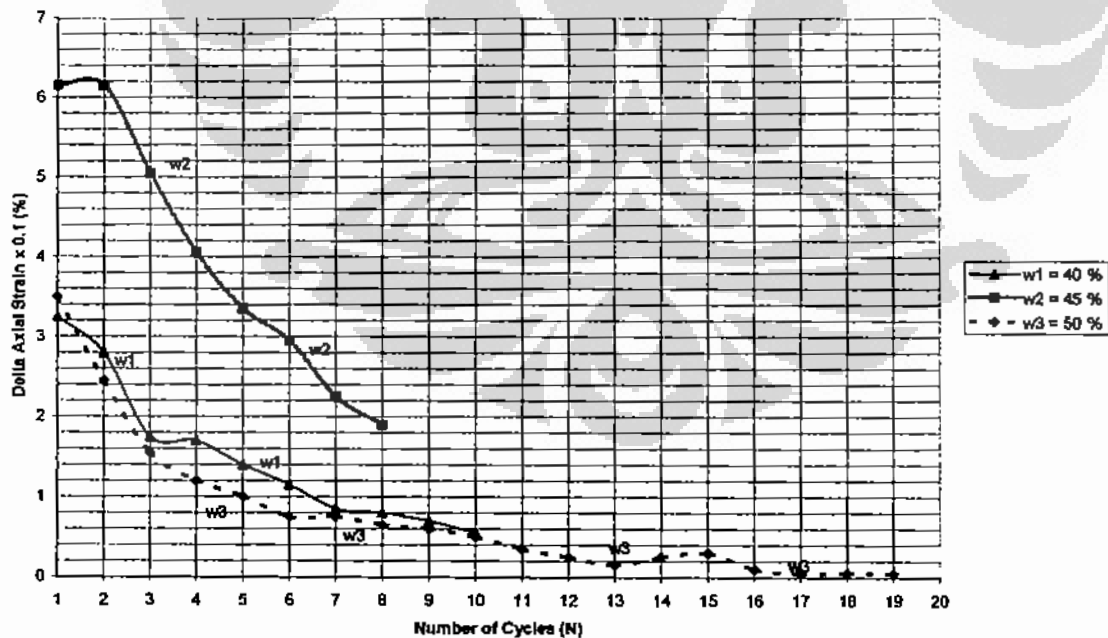
**Gambar 4.19** Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,05$  %/menit

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan Siklik;  
 $v = 0,05 \text{ %/min.}; w = 40; 45; 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



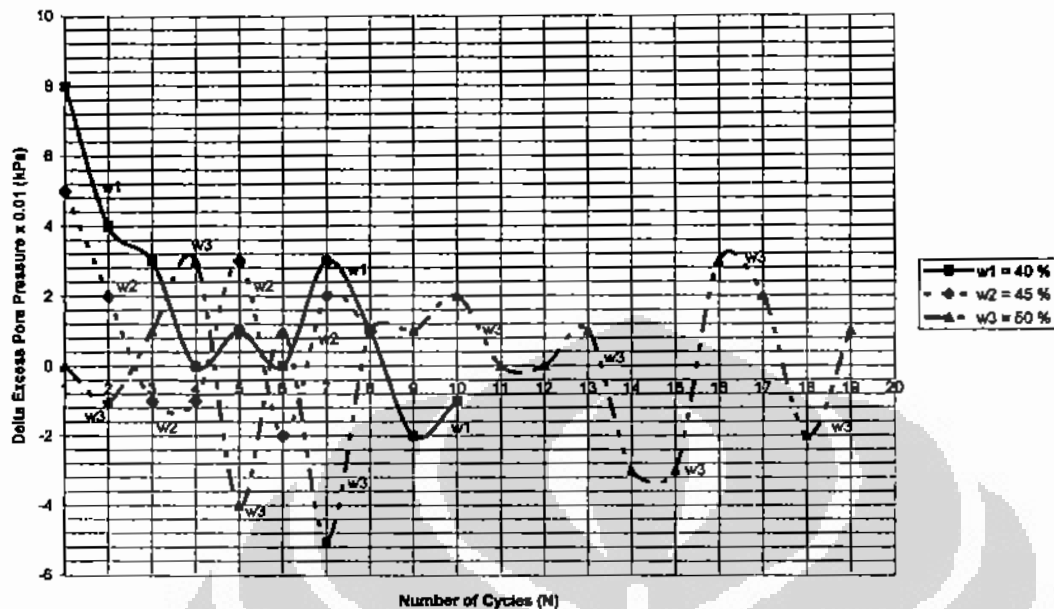
**Gambar 4.20** Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,05 \text{ %/menit}$

Delta Axial Strain (%) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan Siklik;  
 $v = 0,05 \text{ %/min.}; w = 40; 45; 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.21** Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,05 \text{ %/menit}$

Delta-Excess Pore Pressure (kPa) vs Number of Cycles (N); Gabungan Siklik;  
 $w = 40; 45; 50 \%$ ;  $\sigma_{m3} = 50 \text{ kPa}$ ;  $v = 0,05 \%/ \text{min}$ .



**Gambar 4.22** Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah siklus akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,05 \%/ \text{menit}$

#### 4.6.1 Analisis

##### 4.6.1.1 Regangan

Dari pengujian yang telah dilakukan, Gambar 4.19 menunjukkan hasil pengujian triaxial siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,05 \%/ \text{menit}$  pada contoh uji dengan kadar air awal 40, 45 & 50 %, yang menghasilkan tegangan deviator lebih besar tidak pada contoh dengan kadar air yang mendekati optimum ( $w_2 = 45 \%$ ) tetapi pada contoh uji dengan kadar air terbesar = 50 %. Hal ini terjadi karena contoh uji mengalami gangguan selama pembebanan walaupun demikian tidak berpengaruh pada pola tekanan air pori yang terjadi (Gambar 4.20), yang mana tekanan air pori terbesar terdapat pada kadar air mendekati optimum ( $w_2 = 45 \%$ ) sedangkan tekanan air pori terkecil terdapat pada kadar air terbesar ( $w_3 = 50 \%$ ).

Pada pembebanan siklik yang dilakukan pada regangan antara 8 - 12 (%), terjadi regangan terbesar pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan

bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada ketiga contoh uji selama beban siklik.

Dari Gambar 4.21, diperlihatkan bahwa delta regangan (%) terbesar pada ketiga contoh uji terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus berikutnya. Delta regangan terbesar pada siklus pertama terjadi pada kadar air yang mendekati kadar air optimum,  $w = 45 \%$ .

Pada contoh uji dengan kadar air,  $45 \%$ , terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar pada siklus (N) antara 1- 8. Hal ini terjadi karena contoh uji mengalami tekanan air pori yang cukup besar (Gambar 4.20) sehingga kekuatan geser tanah effektive menjadi lebih kecil, yang mengakibatkan regangan yang terjadi menjadi lebih besar.

Sedangkan pada contoh uji dengan kadar air,  $40 \%$  &  $50 \%$ , perbedaan delta regangan yang terjadi relative cukup besar pada siklus (N) antara 1 – 3, hal mana menunjukkan bahwa tanah sedang mengalami proses pemadatan.

Kemudian pada siklus (N) antara 3 – 10 dengan kadar air,  $40 \%$  &  $50 \%$ , regangan yang terjadi relative tidak besar. Sedangkan pada kadar air,  $50 \%$ , untuk N antara 10 – 19, delta regangan yang terjadi relative sangat kecil. Hal ini terjadi karena peningkatan jumlah siklus (N) tersebut tidak mengakibatkan terjadinya perubahan regangan yang berarti, yang menunjukkan bahwa tanah menjadi lebih padat sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.19, yaitu regangan yang terjadi lebih rapat pada regangan antara 9 – 11.

Kecenderungan ini terjadi karena kenaikan tegangan deviator yang sedikit lebih besar akan mengakibatkan terjadinya tekanan air pori yang lebih besar juga untuk suatu nilai parameter A tertentu, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan ini:  $\Delta u = A \times (\Delta \sigma_1)$ . Hal ini akan mengakibatkan kekuatan geser effektive menjadi lebih kecil sehingga regangan yang terjadi menjadi relative lebih besar.

Keadaan terjadinya regangan yang makin kecil dan perbedaan delta regangan yang menjadi lebih kecil dengan bertambahnya jumlah siklus beban siklik adalah sesuai seperti yang dinyatakan oleh Miller et al., 2000 dengan menyatakan bahwa

kondisi tersebut menunjukkan contoh uji yang stabil sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.21 dan dapat dinyatakan contoh uji menjadi lebih padat.

#### 4.6.1.2 Tekanan air pori

Pada Gambar 4.20, diperlihatkan bahwa tekanan air pori terbesar terjadi pada contoh uji dengan kadar air mendekati optimum,  $w_2 = 45\%$ , sedangkan tekanan air pori terendah terjadi pada contoh dengan kadar air maksimum,  $w_3 = 50\%$ , dengan perbedaan rata-rata sekitar 3,8 kPa.

Sedangkan pada Gambar 4.22, ditunjukkan bahwa pola delta tekanan air pori yang terjadi cukup bervariasi dari nilai positive kemudian turun, atau menjadi negative lalu naik lagi positive. Tetapi delta tekanan air pori terbesar pada siklus pertama terjadi hanya dengan kadar air, 40 & 45 %..

Pada contoh uji dengan kadar air, 40 & 45 %, terjadi perbedaan delta tekanan air pori yang relative besar untuk N antara 1 – 3, sedangkan untuk N antara 3 – 8, terjadi perbedaan delta tekanan air pori yang cukup bervariasi. Pada kadar air = 50 %, terjadi delta tekanan air pori yang cukup bervariasi untuk N antara 1 – 19.

Terjadinya delta tekanan air pori yang cukup bervariasi, kemungkinan disebabkan adanya gangguan selama pengujian yang tidak dapat dihindari, karena pengukuran tekanan air pori cukup sensitive terhadap perubahan tegangan listrik yang nampaknya cukup berpengaruh secara mikro terhadap perubahan tekanan air pori.

Walaupun demikian hal tersebut tidak berpengaruh secara global terhadap pola tekanan air pori sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.20.

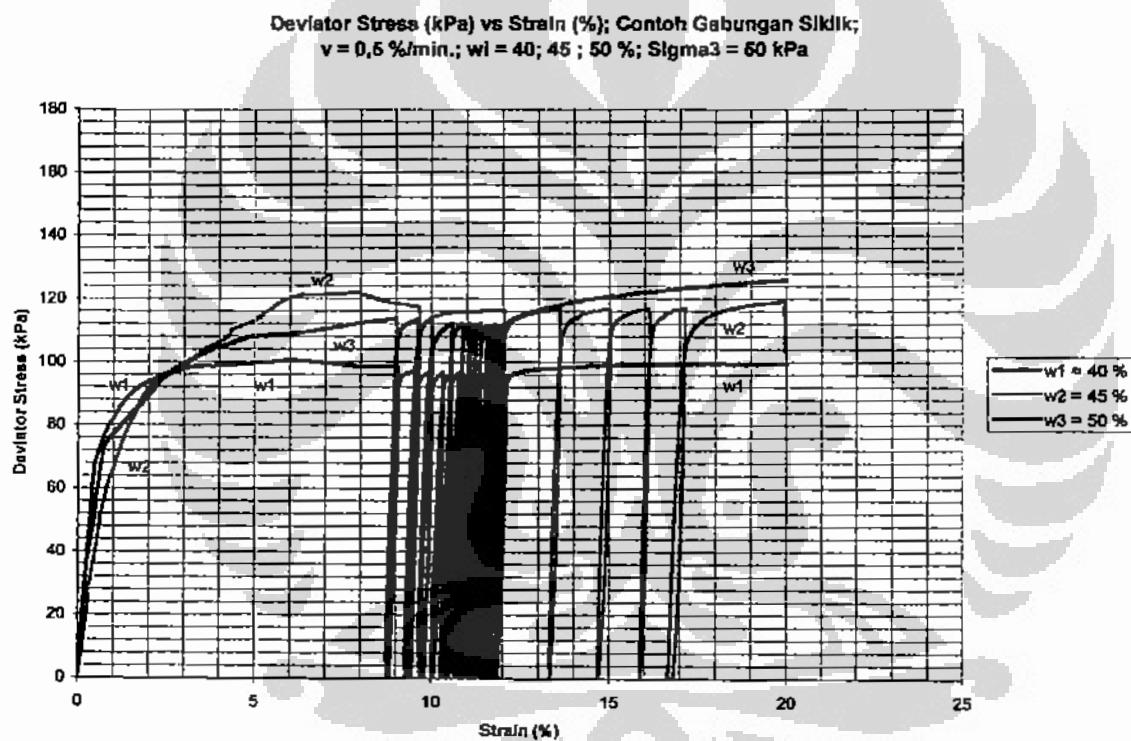
Hasil yang diperoleh dari pengujian akibat beban siklik ini menimbulkan delta regangan terbesar dan delta tekanan air pori terbesar terjadi pada siklus pertama untuk ketiga contoh uji. Pada siklus pertama, delta regangan terbesar terjadi pada kadar air mendekati optimum, 45 %, sedangkan delta tekanan air pori terbesar terjadi pada kadar air minimum, 40 %.

#### 4.7 Pengujian Siklik Gabungan V2

Hasil pengujian dengan kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,5$  (%/menit) = 1,0 (mm/menit) terhadap 3 contoh uji dengan kadar air awal 40, 45 & 50 (%),

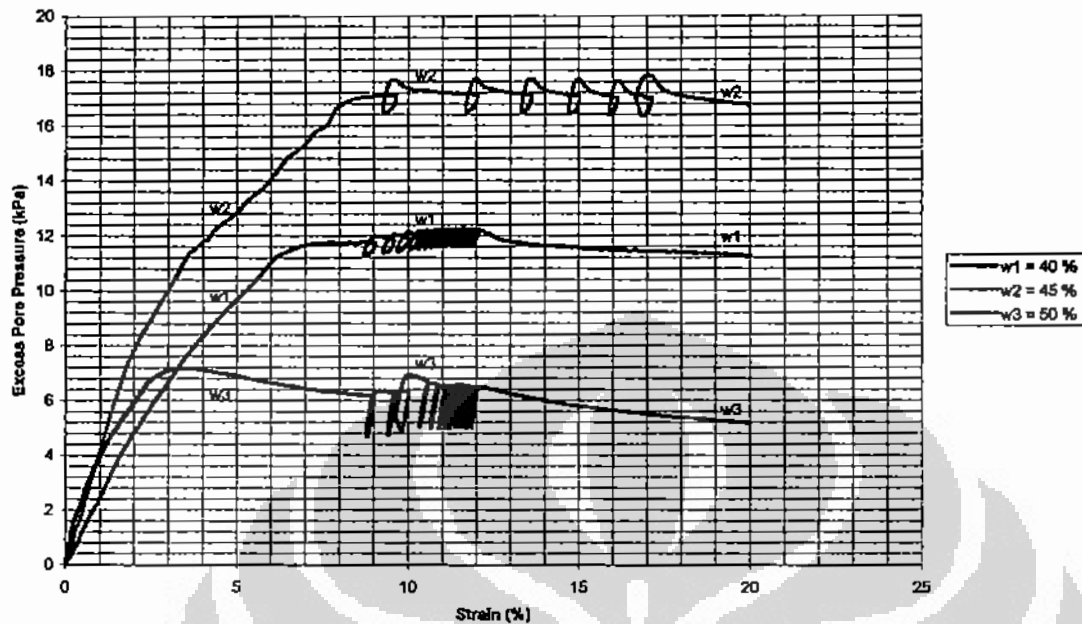
disajikan dalam bentuk grafik-grafik. Pembebanan statik pra siklik dilakukan sampai regangan antara 8 – 9 (%), kemudian pembebanan siklik dilakukan secara manual pada regangan antara 8 – 17 (%), setelah itu dilakukan pembebanan statik pasca siklik sampai regangan mencapai 20 %.

Suatu hubungan antara tegangan deviator dan tekanan air pori dengan regangan, disajikan masing-masing pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24, sedangkan hubungan antara delta regangan dan delta tekanan air pori dengan jumlah siklus (N), disajikan masing-masing pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26, sebagai berikut.



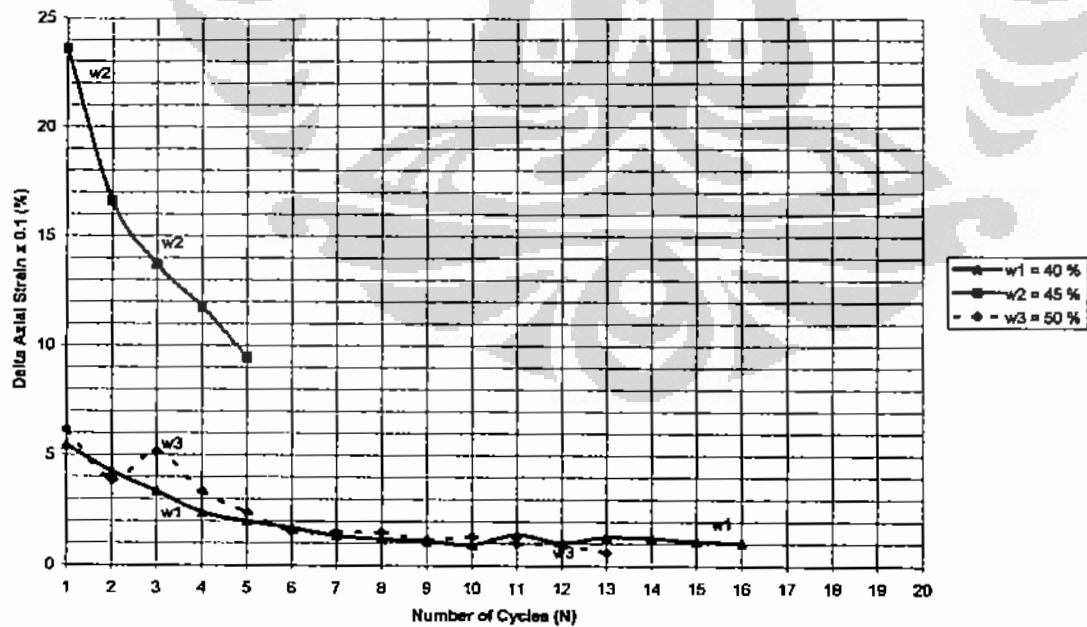
**Gambar 4.23** Hubungan antara tegangan deviator (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,5 \text{ %/menit}$

Excess Pore Pressure (kPa) vs Strain (%); Contoh Gabungan Siklik;  
 $v = 0,5 \text{ %/min.}; w_1 = 40 \text{ %}; 45 \text{ %}; 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



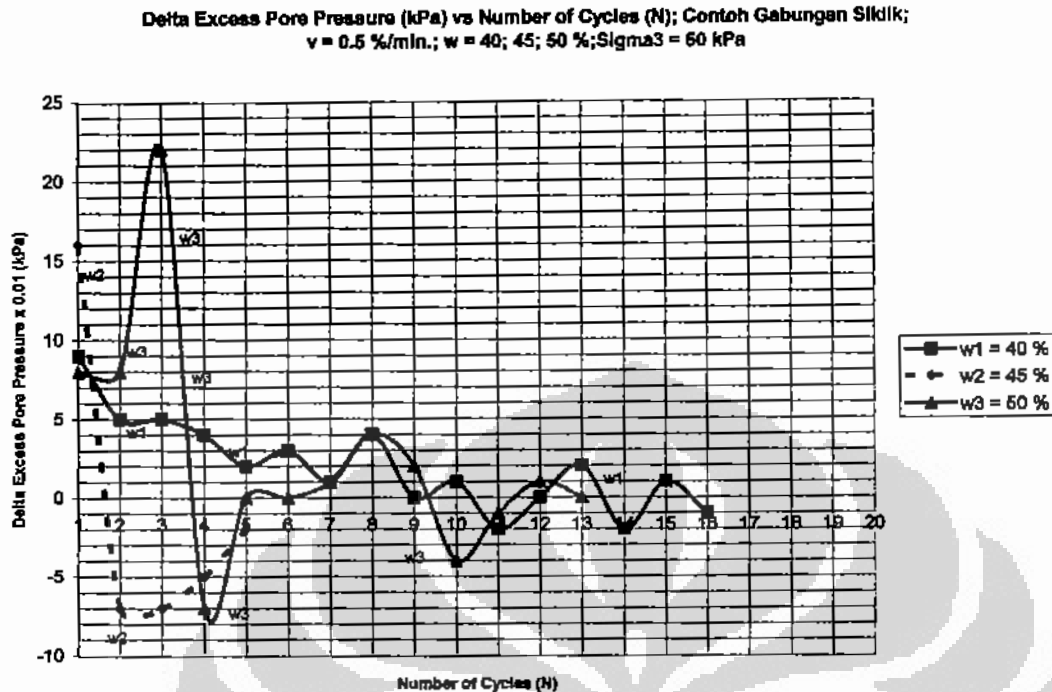
**Gambar 4.24** Hubungan antara tekanan air pori (kPa) dengan regangan (%) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,5 \text{ %/menit}$

Delta Axial Strain (%) vs Number of Cycles (N); Contoh Gabungan Siklik;  
 $v = 0,5 \text{ %/min.}; w = 40; 45; 50 \text{ %}; \text{Sigma}_3 = 50 \text{ kPa}$



**Gambar 4.25** Hubungan antara delta regangan (%) dengan jumlah siklus (N) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,5 \text{ %/menit}$





**Gambar 4.26** Hubungan antara delta tekanan air pori (kPa) dengan jumlah Siklus (N) akibat beban siklik dengan kecepatan  $v = 0,5 \text{ %/menit}$

## 4.6.2 Analisis

### 4.6.2.1 Regangan

Dari pengujian yang telah dilakukan, Gambar 4.23 menunjukkan hasil pengujian triaxial siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan  $v_2 = 0,5 \text{ %/menit}$  pada contoh uji dengan kadar air awal 40, 45 & 50 %, yang menghasilkan tegangan deviator sedikit lebih besar pada contoh uji dengan kadar air mendekati optimum, 45 %. Hal ini terjadi karena contoh uji tersebut mempunyai berat isi kering yang mendekati maksimum.

Pada pembebanan siklik yang dilakukan pada regangan antara 8 - 17 (%), terjadi regangan terbesar pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada contoh uji selama beban siklik.

Dari Gambar 4.25, diperlihatkan bahwa delta regangan (%) terbesar pada ketiga contoh uji terjadi pada siklus pertama yang kemudian menurun untuk siklus

berikutnya. Delta regangan terbesar pada siklus pertama terjadi terhadap kadar air yang mendekati kadar air optimum, 45 %.

Pada contoh uji dengan kadar air, 45 %, terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar pada siklus (N) antara 1 -5. Hal ini terjadi karena contoh uji mengalami tekanan air pori yang cukup besar sehingga kekuatan geser tanah efektif menjadi lebih kecil, yang mengakibatkan regangan yang terjadi menjadi relative lebih besar.

Sedangkan pada contoh uji dengan kadar air, 40 & 50 %, perbedaan delta regangan yang terjadi relative tidak besar pada siklus (N) antara 1 – 5, sedangkan untuk N antara 5 – 13, delta regangan yang terjadi relative sangat kecil. Hal ini terjadi karena peningkatan jumlah siklus (N) antara 5 -13, tidak mengakibatkan terjadinya perubahan regangan yang berarti, yang menunjukkan bahwa tanah menjadi lebih padat sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.23, yaitu regangan yang terjadi lebih rapat pada regangan antara 10 – 12.

Keadaan terjadinya regangan yang makin kecil dan perbedaan delta regangan yang menjadi lebih kecil dengan bertambahnya jumlah siklus beban siklik adalah sesuai seperti yang dinyatakan oleh Miller et al., 2000, dengan menyatakan bahwa kondisi tersebut menunjukkan contoh uji yang stabil sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.26 dan dapat dinyatakan contoh uji menjadi lebih padat.

#### 4.6.2.2 Tekanan air pori

Pada Gambar 4.24, diperlihatkan bahwa tekanan air pori terbesar terjadi pada contoh uji dengan kadar air mendekati optimum,  $w_2 = 45$  %, yang mengalami tegangan deviator terbesar, sedangkan tekanan air pori terendah terjadi pada contoh dengan kadar air maksimum,  $w_3 = 50$  %, dengan perbedaan rata-rata sekitar 11 kPa.

Sedangkan pada Gambar 4.26, ditunjukkan bahwa pola delta tekanan air pori yang terjadi cukup bervariasi dari nilai positive kemudian naik, turun atau negative lalu menjadi turun, naik atau positive. Tetapi delta tekanan air pori terbesar pada siklus pertama terjadi hanya dengan kadar air, 40 & 45 %..

Pada siklus pertama, terjadi delta tekanan air pori terbesar pada contoh uji dengan kadar air, 45 %, sedangkan pada N antara 2 -5, delta tekanan air pori yang terjadi cukup bervariasi. Sedangkan pada contoh uji dengan kadar air, 40 & 50 %, terjadi perbedaan delta tekanan air pori yang relative tidak besar untuk N antara 5 – 13.

Kecenderungan ini terjadi karena kenaikan tegangan deviator yang sedikit lebih besar yang mengakibatkan terjadinya tekanan air pori lebih besar pula. Hal ini akan mengakibatkan kekuatan geser efektif menjadi lebih kecil sehingga regangan yang terjadi menjadi relative lebih besar.

Hasil yang diperoleh dari pengujian akibat beban siklik ini menimbulkan delta regangan terbesar pada siklus pertama pada ketiga contoh uji sedangkan delta tekanan air pori terbesar pada siklus (N) pertama terjadi hanya dengan kadar air, 40 & 45 (%).

Ringkasan pengujian triaxial siklik yang telah dilakukan disajikan dalam Tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4 Hasil Pengujian Triaxial Siklik Satu-Arah**

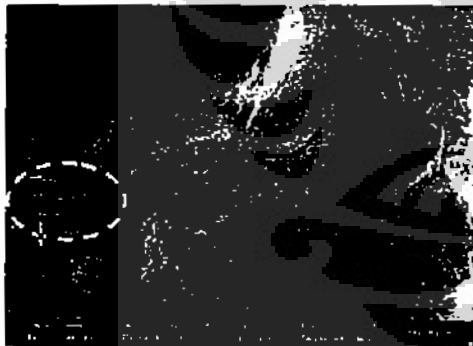
No.	$\omega$ (%)	Contoh Uji	V' (%/menit)	frata-rata (Hz)	N tot siklus	$\sigma_3$ (kPa)	$\Delta\varepsilon$ tot. %
1.	40	B.1	0,05	0,001	10	50	1,495
2.	40	B.2	0,5	0,01	16	50	3,09
3.	45	C.1	0,05	0,0008	8	50	3,185
4.	45	C.2	0,5	0,004	5	50	7,51
5.	50	A.1	0,05	0,0019	19	50	1,46
6.	50	A.2	0,5	0,011	13	50	3,045

#### 4.8 Interpretasi Mikroskopik

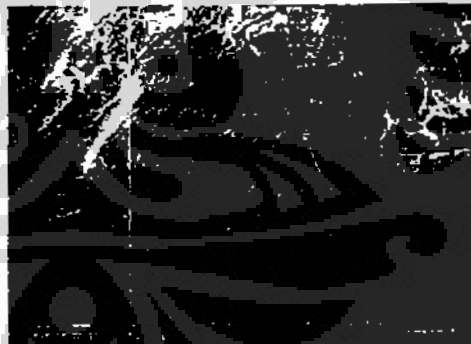
Hasil Foto SEM (*Scanning Electron Microscop*) terhadap contoh tanah asli yang bersifat lepas (*loose*) diperlihatkan pada Gambar 4.27 dengan pembesaran masing-masing 500x dan 2000x. Pada Gambar tersebut terlihat butiran yang bersifat lepas dan mempunyai rongga antar butir.

Kemudian hasil Foto SEM terhadap contoh tanah yang dipadatkan, dengan lempengan dibuat sejajar diameter contoh uji, yang diperlihatkan pada Gambar 4.28 dengan pembesaran masing-masing 500x dan 2000x. Pada Gambar tersebut terlihat butiran tanah menyatu satu sama lain dan padat serta terlihat rongga-rongga menjadi lebih kecil.

Sedangkan hasil Foto SEM terhadap contoh tanah dipadatkan yang telah mengalami beban siklik dengan kecepatan pembebanan  $v_1 = 0,05$  % per menit, antara regangan 8-12 dengan jumlah siklus (N) 9, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.29 dengan pembesaran masing-masing 500x dan 2000x. Pada Gambar 4.29(a) tersebut terlihat bahwa tanah menjadi lebih padat tapi diselingi adanya rongga dan pada Gambar 4.29(b) ditunjukkan bahwa rongga tersebut ternyata merupakan retakan dari tanah akibat adanya beban siklik.



(a)Pembesaran 500x

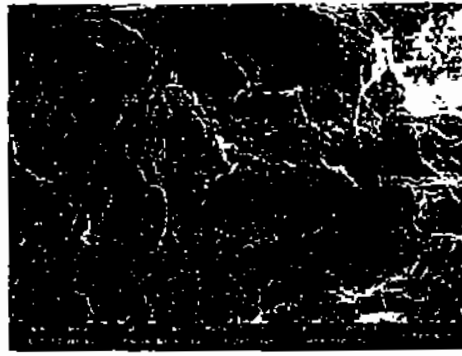


(b)Pembesaran 2000x

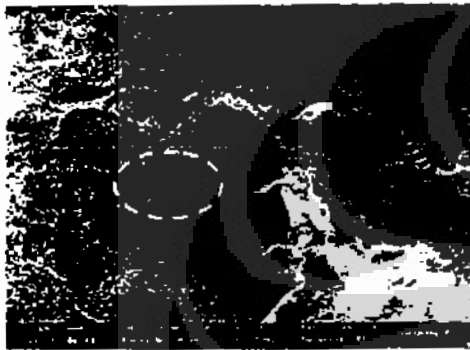
Gambar 4.27 SEM contoh tanah bersifat lepas



(a)Pembesaran 500x



(b)Pembesaran 2000x

**Gambar 4.28** SEM contoh tanah yang dipadatkan

(a)Pembesaran 500x



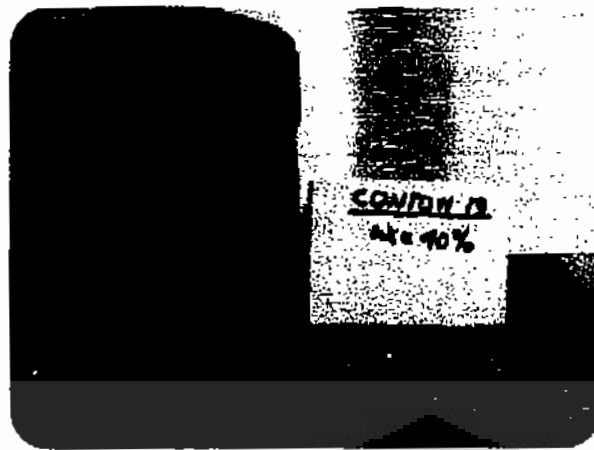
(b)Pembesaran 2000x

**Gambar 4.29** SEM contoh tanah yang dipadatkan dan sudah mengalami beban siklik dengan  $v = 0,05$  %/ menit.

## 4.9 Foto Hasil Uji

### 4.9.1 Pengujian Statik

Foto hasil pengujian Statik pada kedua contoh uji dengan kadar air awal 40 (%), dengan tegangan sell ( $\sigma_3$ ), 200 & 300 (kPa), telah mengalami pembebanan dengan kecepatan rendah, 0,05 %/menit sampai regangan 20 (%) seperti yang diperlihatkan Gambar 4.30 dan Gambar 4.31. Pada contoh uji 2, tidak terlihat mengalami keruntuhan walaupun sudah mengalami pembebanan sampai regangan, 20 %, sedangkan pada contoh uji 3 sudah terlihat adanya bidang runtuh setelah mengalami pembebanan sampai regangan, 20 %.



**Gambar 4.30** Contoh Uji 2 - Statik ( $w = 40\%$ )



**Gambar 4.31** Contoh Uji 3 - Statik ( $w = 40\%$ )

#### 4.9.2 Pengujian Siklik Gabungan VI

Foto hasil uji ketiga contoh dengan kadar air awal 40, 45 & 50 (%) yang telah mengalami beban siklik dengan kecepatan rendah, 0,05 %/menit antara regangan 8 – 12 (%) dan beban statik pasca siklik sampai regangan 20 (%) seperti yang diperlihatkan Gambar 4.32, 4.33 & 4.34. Pada contoh uji 4 & 5, tidak terlihat mengalami keruntuhan walaupun sudah mengalami pembebanan sampai 20 %. Contoh uji hanya mengalami perpendekan dan diameter agak membesar pada bagian tengah sekitar sepertiga tinggi contoh. Sedangkan pada contoh uji 6 dengan  $w = 50\%$ , telah terlihat adanya bidang runtuh setelah mencapai regangan 20 %.



**Gambar 4.32** Contoh Uji 4 - Siklik ( $w = 40\%$ )



**Gambar 4.33** Contoh Uji 5 - Siklik ( $w = 45\%$ )



**Gambar 4.34** Contoh Uji 6 - Siklik ( $w = 50\%$ )

### 4.9.3 Pengujian Siklik Gabungan V2

Foto hasil uji ketiga contoh dengan kadar air awal 40, 45 & 50 (%) yang telah mengalami beban siklik dengan kecepatan tinggi, 0,5 %/menit antara regangan 8 – 17 (%) dan beban statik pasca siklik sampai regangan 20 (%) seperti yang diperlihatkan Gambar 4.35, 4.36 & 4.37. Pada contoh uji 7 & 8, tidak terlihat mengalami keruntuhan walaupun sudah mengalami pembebanan sampai 20 %. Contoh uji hanya mengalami perpendekan dan diameter agak membesar pada sekitar dua pertiga bagian atas. Sedangkan pada contoh uji 9 dengan  $w = 50\%$ , terlihat mengalami keruntuhan setelah mencapai regangan 20 %.



**Gambar 4.35** Contoh Uji 7 - Siklik ( $w = 40\%$ )

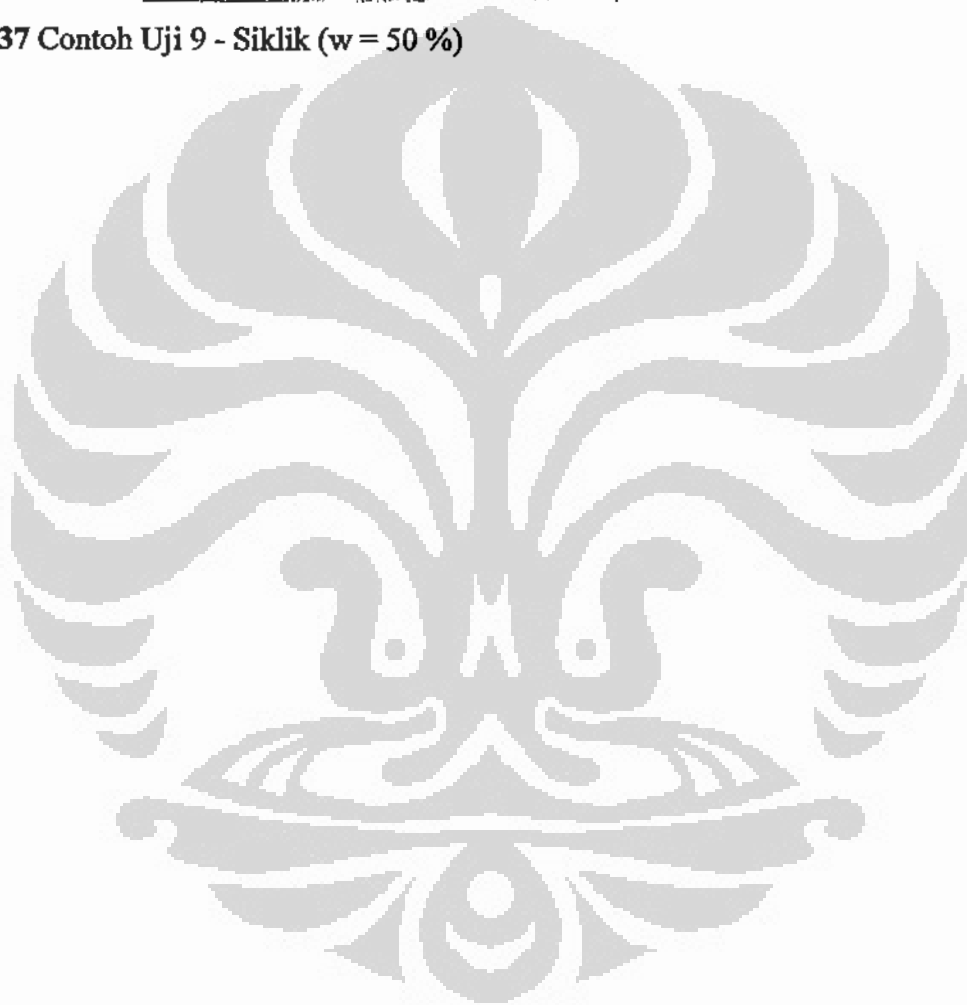


**Gambar 4.36** Contoh Uji 8 - Siklik ( $w = 45\%$ )





**Gambar 4.37** Contoh Uji 9 - Siklik ( $w = 50\%$ )



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil pengujian beban siklik satu-arah yang telah dilakukan terhadap 6 contoh uji dengan kadar air yang berbeda yaitu, 40, 45 & 50 %, didapat beberapa kesimpulan berikut :

- 1) Pada pengujian beban siklik satu-arah, dengan kecepatan pembebanan rendah ( $v_1 = 0,05$  %/menit) dan kecepatan pembebanan tinggi ( $v_2 = 0,5$  %/menit) :
  - a. Tegangan deviator terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan tinggi,  $v_2 = 0,5$  %/menit, kecuali pada contoh uji dengan kadar air, 50 % .
  - b. Tekanan air pori terbesar terjadi pada kadar air yang mendekati optimum, 45 % dan terkecil pada kadar air maksimum, 50 %.
  - c. Delta regangan terbesar terjadi akibat kecepatan pembebanan tinggi.
  - d. Delta regangan terbesar pada siklus pertama terjadi dengan kadar air mendekati kadar air optimum,  $w = 45$  %.
  - e. Delta Regangan yang terjadi cenderung makin kecil untuk siklus berikutnya dibandingkan dengan siklus pertama. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada contoh uji selama beban siklik.
  - f. Kekuatan geser efektif contoh uji, cenderung meningkat selama beban statik pasca-beban siklik satu-arah, karena tekanan air pori yang terjadi cenderung mengecil.
  
- 2) Pada pengujian beban siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan rendah ( $v_1 = 0,05$  %/menit) yang dilakukan pada regangan antara 8 - 12 (%):
  - a. Delta regangan terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal

- ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada ketiga contoh uji selama beban siklik.
- b. Delta regangan terbesar pada siklus pertama terjadi dengan kadar air mendekati kadar air optimum,  $w = 45 \%$ .
  - c. Delta tekanan air pori terbesar terjadi pada siklus pertama dengan kadar air yang mendekati kadar air minimum,  $w = 40 \%$ .
- 3) Pada pengujian beban siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan tinggi ( $v_2 = 0,5 \%/menit$ ), yang dilakukan pada regangan antara 8 - 17 (%) :
- a. Delta regangan terbesar terjadi pada siklus pertama yang kemudian mengecil dengan bertambahnya siklus beban siklik. Hal ini menunjukkan terjadinya pemadatan pada contoh uji selama beban siklik.
  - b. Delta regangan terbesar pada siklus pertama terjadi dengan kadar air yang mendekati kadar air optimum, 45 %.
  - c. Terjadi perbedaan delta regangan yang relative cukup besar pada siklus (N) antara 1-5, pada contoh uji dengan kadar 45 %.
  - d. Delta tekanan air pori terbesar pada siklus (N) pertama hanya terjadi pada kadar air, 40 & 45 (%).
- 4) Dari hasil foto SEM terhadap contoh uji dengan kadar air awal, 40 %, yang telah menerima beban siklik satu-arah dengan kecepatan pembebanan rendah ( $v_1 = 0,05 \%/men.$ ) pada regangan antara 8 - 12 (%), secara mikroskopik kondisi struktur tanah tidak dapat dilihat secara rinci, tetapi terlihat bahwa tanah menjadi lebih padat dan terdapat retakan.
- 5) Tanah residual Depok yang berwarna merah, merupakan jenis material yang relative stabil dalam menerima beban statik dan siklik. Karena pada pengujian contoh uji yang mula-mula menerima beban statik pra - beban siklik yang mendekati maximum sampai regangan 8-9 (%), masih mempunyai kestabilan yang relative baik selama mengalami beban siklik satu-arah pada regangan antara 8 - 17 % dan beban statik pasca - beban

siklik sampai regangan 20 %, tanpa menunjukkan tanda keruntuhan, kecuali dengan kadar air, 50 %, yang dari hasil foto uji menunjukkan bidang keruntuhan. Contoh uji dengan kadar air lebih tinggi dari kadar air optimum menunjukkan sifat yang lebih mudah mengalami keruntuhan bila dibandingkan dengan contoh uji dengan kadar air lebih rendah dari kadar air optimum, walaupun tegangan deviator yang terjadi pada kedua contoh uji relative tidak berbeda.

- 6) Material tanah residual Depok yang berwarna merah, memenuhi syarat sebagai material timbunan. Untuk pemadatan di lapangan harus dilakukan sesuai standar *Proctor/ ASTM*, dengan kadar air yang berada pada sisi kering yang mendekati kadar air optimum, untuk mencegah terjadinya bidang keruntuhan pada lapisan tanah setelah mengalami beban statik pasca-beban siklik/ gempa.

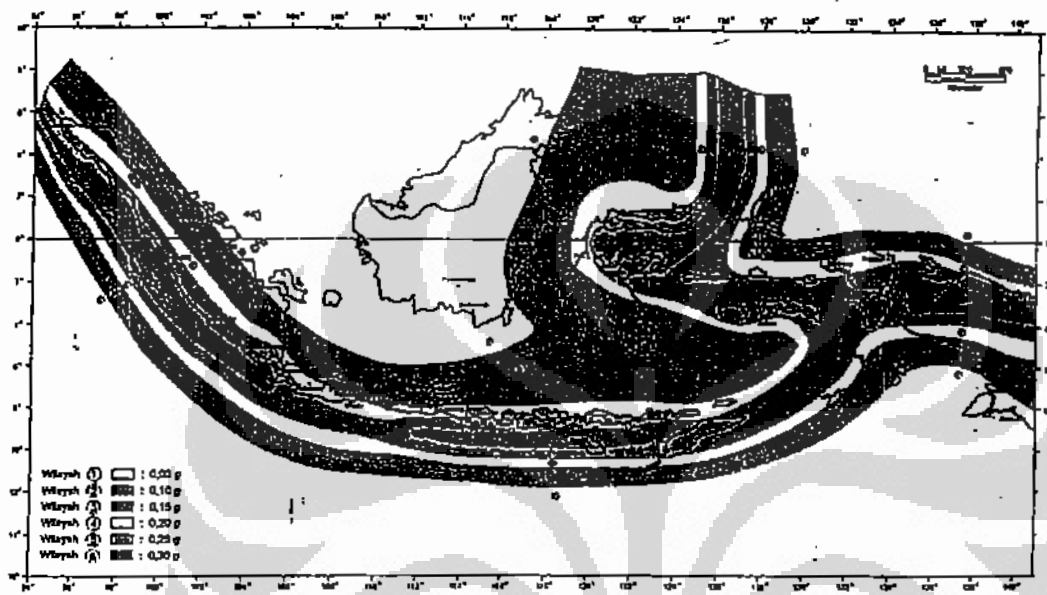
## DAFTAR REFERENSI

- Badan Standardisasi Nasional (2001). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung, *Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-1726-2002*.
- Bishop, A. W. & Henkel, D. J. (1982). *The Measurement of Soil Properties in The Triaxial Test*. London : Edward Arnold Ltd.
- Bardet, J. P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. New Jersey : Prentice-Hall Inc.
- Boulanger, R. W. & Idris, I. M. (2006). Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays. *Journal of Geotechnology and Geoenvironment Engineering, Div. ASCE*, Vol. 132, No. 11, pp. 1413 – 1426.
- Bouferra, R., Benseddiq, N. & Shahrou, I. (2007). Saturation and Preloading Effects on the Cyclic Behavior of Sand. *International Journal of Geomechanics, ASCE*, Vol. 7, No. 5, pp. 396 – 401.
- Das, B. M. (1993). *Principles of Soil Dynamics*. Boston : PWS-KENT Publishing Company.
- Frost, M. W., Fleming, P. R., & Rogers, C. D. F. (2004). Cyclic Triaxial Tests on Clay Subgrades for Analytical Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering, Div. ASCE*, Vol. 130, No. 3, pp. 378 – 386.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D., (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey : Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Hyde, A. F. L., Yasuhara, K. & Hirao, K (1993). Stability Criteria For Marine Clay Under One-Way Cyclic Loading. *Journal of Geotechnic Engineering, Div. ASCE*, Vol.119, No. 11, pp. 1771 – 1789.
- Ishihara, K. (2003). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. New York : Oxford University Press Inc.
- Jitno, H. & Vaid, Y.P. (1991). *Post –Cyclic Monotonic Undrained Behavior of Marine Clay*. Paper presented at 9<sup>th</sup> Asian Regional Conference SMFE, Balkema Publishing Co., Ltd., Vol 1, 41– 44.
- Konrad, J.-M., & Wagg, B. T. (1993). Undrained Cyclic Loading of Anisotropically Consolidated Clayey Silts. *Journal of Geotechnic Engineering, Div. ASCE*, Vol. 119, No. 5, pp. 929 – 947.

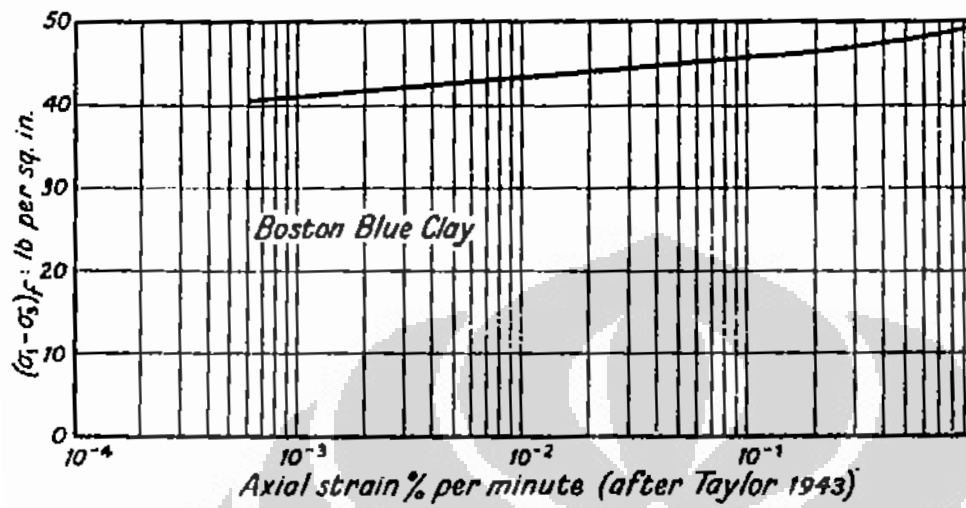
- Koike, M., Kaji, T., Usaborisut, P., Takigawa, T., Yoda, A. & Takahashi, S., (2002). Several contributions to soil compactibility induced by cyclic loading test. *Journal of Terramechanic*, 39, 127.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V., (1979). *Soil Mechanics*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Miller, G.A., The, S. Y., Li, D., & Zaman, M.M. (2000). Cyclic Shear Strength of Soft Railroad Subgrade. *Journal of Geotechnology and Geoenvironment Engineering*, 126(2), 139 – 147.
- Pradhan, S.B.T., Matsui T., Yasuhara K., & Uchida K. (1999). Cyclic Undrained Triaxial Strength of Clay by a Round Robin Test. *Soil and Foundation Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 121 – 129.
- Prakasha, K. S., & Chandrasekaran, V. S. (2005). Behavior of Marine Sand-Clay Mixtures under Static and Cyclic Triaxial Shear. *Journal of Geotechnology and Geoenvironment Engineering, Div. ASCE*, Vol. 131, No.2, pp. 213 – 222.
- Punmia, B.C. (1975). *Soil Mechanics and Foundations*. New Delhi, India : Standard Book House.
- Salvati, L. A., & AnhDan, L. Q. (2006). Rate-Dependent Behavior of Sand Subjected To Cyclic Loads. *GeoCongress Journal*.
- Sharma, S. S., & Ismail, M. A. (2006). Monotonic and Cyclic Behavior of Two Calcareous Soils of Different Origins. *Journal of Geotechnology and Geoenvironment Engineering, Div. ASCE*, Vol. 132, No. 12, pp. 1581 – 1591.
- Thammathiwat, A. & Chim-oye, W. (2004). Behavior of Strength and Pore Pressure of Soft Bangkok Clay under Cyclic Loading. *Thammasat International Journal Science Techology*, Vol. 9, No. 4, October-December 2004.
- Wardani, SPR. (2001). *Deformation Behaviour of Cemented Soil Under Undrained Cyclic Loading*. Paper presented at Seminar PIT Geoteknik – HATTI, Bandung.
- Yasuhara, K., Hirao, K. & Hyde, A.F.L. (1992). Effect of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay. *Soil and Foundations*, Vol. 32, No.1, pp.100 – 116.
- Yasuhara, K. (1995). Post Cyclic Undrained Strength for Cohesive Soils. *Journal of Geotechnic Engineering, Div. ASCE*, Vol.120, No. 11, pp. 1961 – 1979.

## LAMPIRAN

Lampiran 1: Wilayah Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan perioda ulang 500 tahun (BSN, 2001)

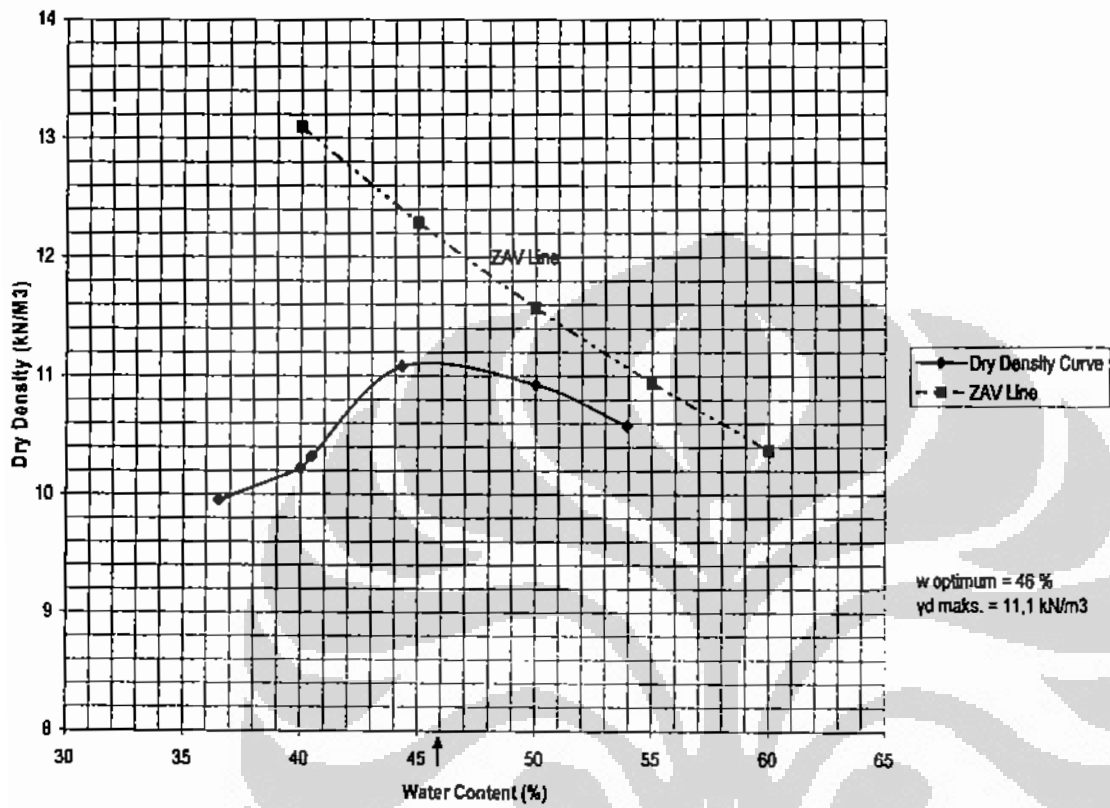


Lampiran 2 : Hubungan antara tegangan deviator dengan regangan axial - %/ menit (Taylor, 1943)

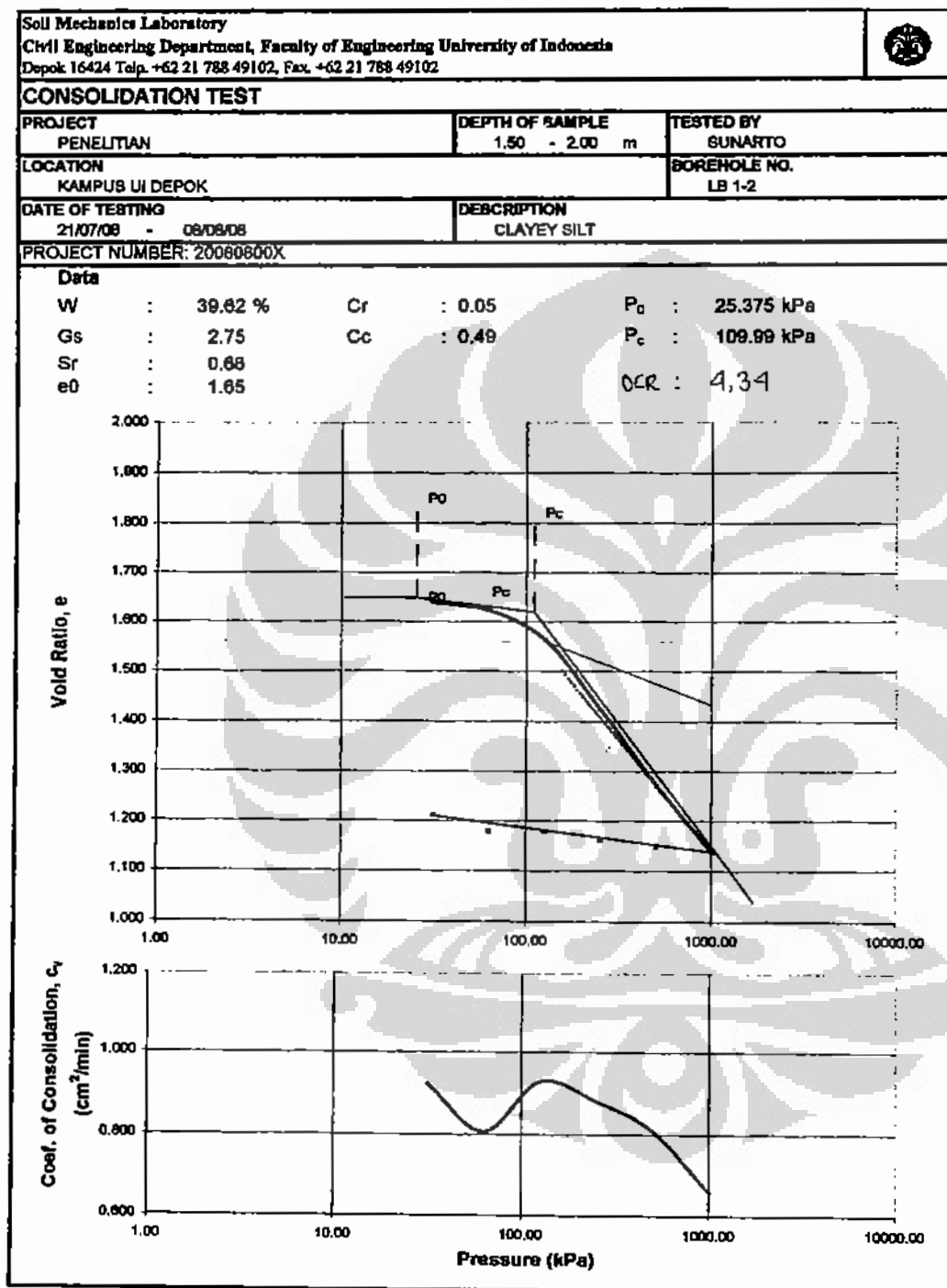




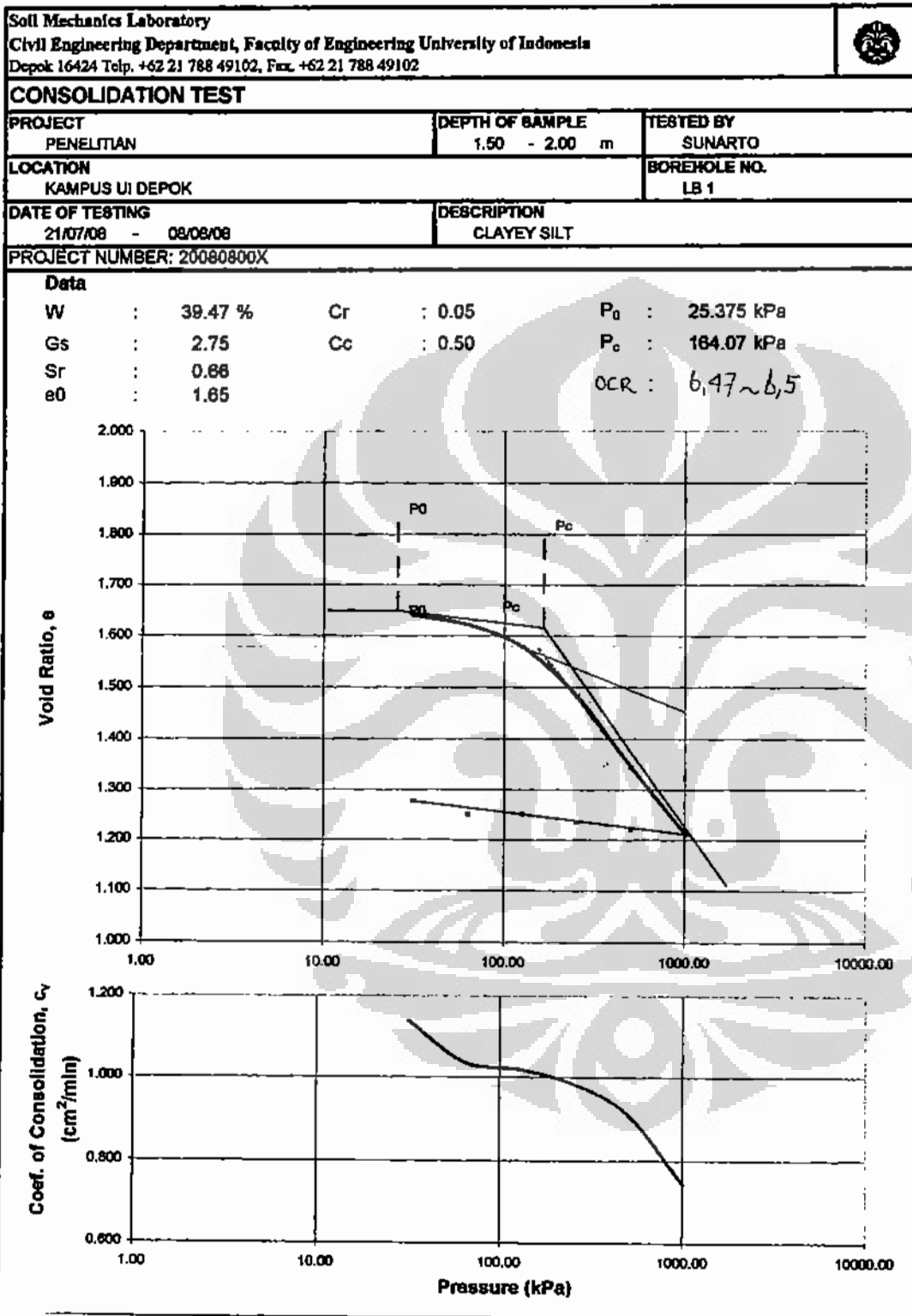
## Lampiran 3: Kurva pemadatan tanah material uji

Dry Density (kN/M<sup>3</sup>) vs Water Content (%)

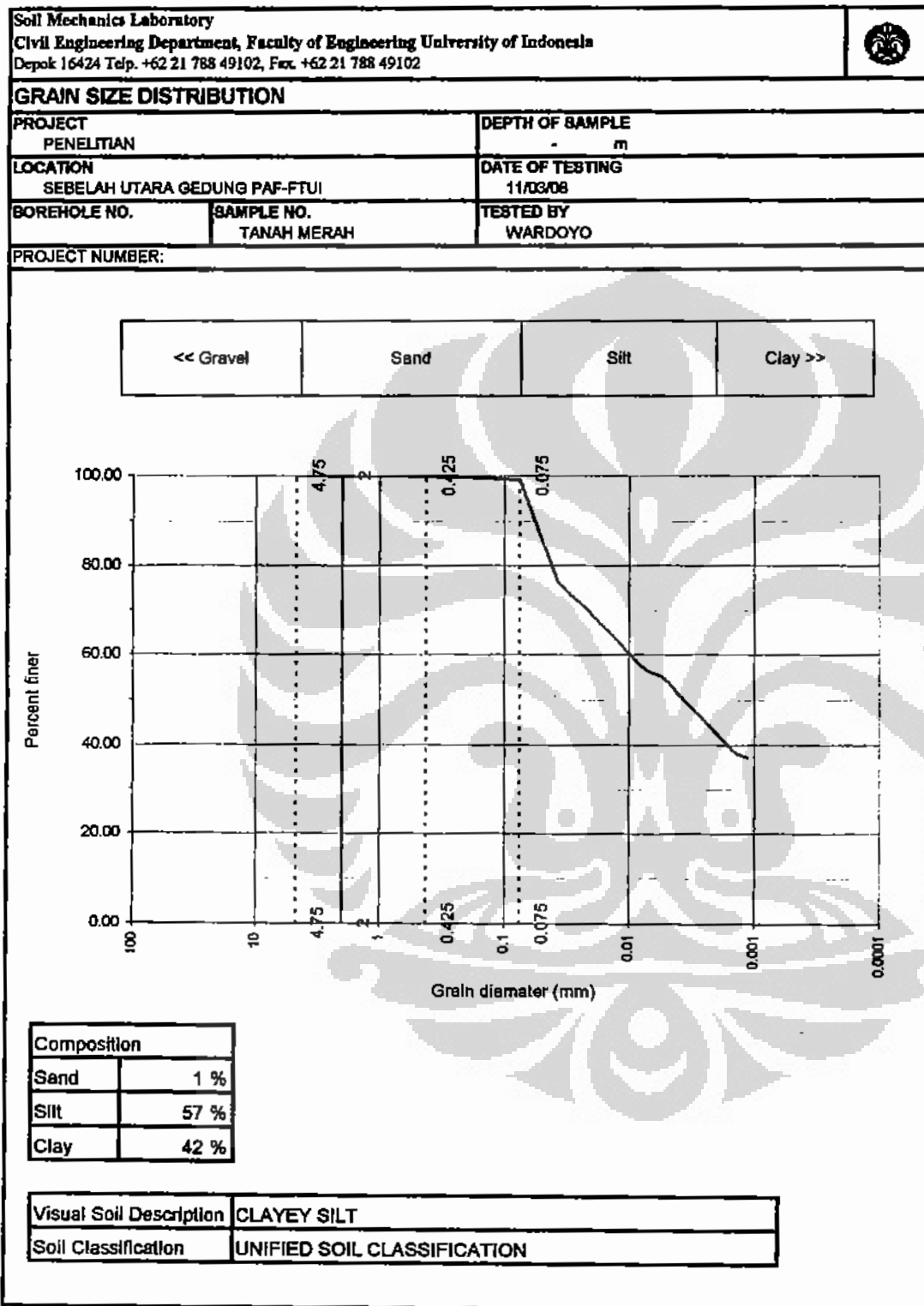
## Lampiran 4 : Hasil uji konsolidasi - 1



## Lampiran 5 : Hasil uji konsolidasi - 2



## Lampiran 6 : Hasil uji distribusi ukuran butir



## Lampiran 7 : Hasil uji kimia tanah merah A

GeolLabs

GL-F-PL-13-2.2-01-a

DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL  
BADAN GEOLOGI  
PUSAT SURVEI GEOLOGI

**LABORATORIUM GEOLOGI (GEOLOGY LABORATORIES)**

Jl. Diponegoro No. 57, Bandung, 40122, Indonesia

Telp: (022) 7203205-08, 7273108

Fax: (022) 7202669, 7273108

E-mail: geollabs@erde.esdm.go.id

**HASIL UJI KIMIA METODE XRF  
(XRF METHOD CHEMISTRY ANALYSIS RESULT)**

Nomor lab. (lab. number) : 263/LJ/GLJ.2/06/2008

Tanggal (date) : 03 Juni 2008

Kode sampel (sample code) : Tanah Merah A	Kode lab. (lab. code) : 330/2.2/2233
Lokasi (location) : -	Tanggal diuji (analyzed date) : 02 Juni 2008
Kedalaman (depth) : -	Metode uji (method) : GL-MU-2.2
Pemilik (property) : Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Indonesia	Analisis (analyzer) : Asep Sonjaya
	Pencyelia (supervisor) : Drs. Kurnia

**Unsur Kimia (Oksida / Elements)**

Oksida (oxides)	Satuan (unit)	Jumlah (amount)	Elemen (elements)	Satuan (unit)	Jumlah (amount)	Sd	Ket. (expl.)
SiO <sub>2</sub>	%	43.48	Si	%	-	0.25	
TiO <sub>2</sub>	%	1.73	Ti	%	1.03	0.04	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	37.50	Al	%	19.85	0.13	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	15.55	Fe	%	10.87	0.13	
MnO	%	0.583	Mn	%	0.451	0.023	
CaO	%	0.178	Ca	%	0.127	0.006	
MgO	%	0.119	Mg	%	0.0719	0.0036	
Na <sub>2</sub> O	%	0.214	Na	%	-	0.011	
K <sub>2</sub> O	%	0.0703	K	%	-	0.0035	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.138	P	%	-	0.007	
SO <sub>3</sub>	%	0.228	S	%	-	0.011	
ZnO	%	0.0186	Zn	%	0.0149	0.0007	
PbO	%	0.0031	Pb	%	0.0029	0.0008	
NiO	%	-	Ni	%	-	-	
ZrO <sub>2</sub>	%	0.0347	Zr	%	0.0257	0.0013	
Ce <sub>2</sub> O	%	0.0092	Ce	%	0.0087	0.0035	
CuO	%	0.0112	Cu	%	0.0089	0.0006	
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	As	%	-	-	
SrO	%	0.0024	Sr	%	0.0020	0.0003	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.0606	V	%	0.0339	0.0017	
Cr <sub>2</sub> O <sub>1</sub>	%	-	Cr	%	-	-	
Co <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	%	0.0152	Co	%	0.0119	0.0007	
Ag <sub>2</sub> O	%	-	Ag	%	-	-	
Cl	%	0.0253	Cl	%	0.0253	0.0013	
I	%	0.0054	I	%	0.0054	0.0021	
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0051	Ga	%	0.0038	0.0003	
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	Bi	%	-	-	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0053	Y	%	0.0042	0.0004	
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	-	Ta	%	-	-	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0096	La	%	0.0082	0.0015	
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0068	Sc	%	0.0044	0.0005	

Kepala Sub-Bidang Laboratorium  
(Chief of Laboratory Subdivision),

Ir. Joka Supandrio, M.Si.  
NIP. 100010823.

CATATAN (note):

Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji dan tidak dapat digunakan untuk sampel lain.

## Lampiran 8 : Hasil uji kimia tanah merah B

GeolLabs

GL-F-PL-13-2.2-01-4

DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL

BADAN GEOLOGI

PUSAT SURVEI GEOLOGI

## LABORATORIUM GEOLOGI (GEOLOGY LABORATORIES)

Jl. Diponegoro No. 57, Bandung, 40122, Indonesia

Teln: (022) 7203205-08, 7273108

Fax: (022) 7202669, 7273108

E-mail: geollabs@geol.esdm.go.id

HASIL UJI KIMIA METODE XRF  
(XRF METHOD CHEMISTRY ANALYSIS RESULT)

Nomer lab. (lab. number) : 2631/GL/2.2/06/2008

Tanggal (date) : 03 Juni 2008

Kode sampel (sample code) : Tanah Merah D	Kode lab. (lab. code) : 3302.2/2234
Lokasi (location) : -	Tanggal diuji (analyzed date) : 02 Juni 2008
Kedalaman (depth) : -	Metode uji (method) : GL-MU-2.2
Pemilik (property) : Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Indonesia	Analisis (analyzer) : Asep Sonjaya
	Penyelia (supervisor) : Drs. Kurnia

## Unsur Kimia (Oksida / Elements)

Oksida (oxides)	Satuan (unit)	Jumlah (amount)	Elemen (elements)	Satuan (unit)	Jumlah (amount)	Sd	Ket. (expl.)
SiO <sub>2</sub>	%	43.43	Si	%	-	0.25	
TiO <sub>2</sub>	%	1.69	Ti	%	1.01	0.04	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	38.09	Al	%	20.16	0.13	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	15.47	Fe	%	10.82	0.13	
MnO	%	0.433	Mn	%	0.336	0.017	
CaO	%	0.0618	Ca	%	0.0442	0.0022	
MgO	%	0.0808	Mg	%	0.0487	0.0027	
Na <sub>2</sub> O	%	0.176	Na	%	-	0.009	
K <sub>2</sub> O	%	0.0502	K	%	-	0.0025	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.110	P	%	-	0.006	
SO <sub>4</sub>	%	0.231	S	%	-	0.012	
ZnO	%	0.0145	Zn	%	0.0116	0.0006	
PbO	%	-	Pb	%	-	-	
NiO	%	0.0015	Ni	%	0.0012	0.0006	
ZrO <sub>2</sub>	%	0.0341	Zr	%	0.0252	0.0013	
HfO <sub>2</sub>	%	-	Hf	%	-	-	
HgO	%	-	Hg	%	-	-	
Cs <sub>2</sub> O	%	0.0096	Cs	%	0.0091	0.0005	
CuO	%	0.0110	Cu	%	0.0088	0.0006	
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	As	%	-	-	
SrO	%	0.0014	Sr	%	0.0012	0.0003	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.0573	V	%	0.0321	0.0016	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	Cr	%	-	-	
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0167	Co	%	0.0131	0.0007	
Ag <sub>2</sub> O	%	-	Ag	%	-	-	
Cl	%	0.0136	Cl	%	0.0136	0.0011	
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0051	Ga	%	0.0038	0.0003	
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	Bi	%	-	-	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0047	Y	%	0.0037	0.0003	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0039	La	%	0.0033	0.0005	
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.0047	Sc	%	0.0031	0.0005	

Kepala Sub-Bidang Laboratorium  
(Chief of Laboratory Subdivision)In. Joko Subandrio, M.Si.  
NIP. 100010823.

Catatan Penting:

Hasil penelitian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji dan tidak dapat digeneralisasikan untuk sampel lain.