

**LAPORAN  
PENELITIAN DOSEN**



**Pola Keruntuhan Clay Shale Tak Jenuh Dan Jenuh Pada  
Pengujian Triaxial *Unconsolidated Undrained***

**Tim Peneliti**

**Ketua : DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc**

**NIDN : 0316016101**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
2018**

## PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN

- |   |                       |   |  |
|---|-----------------------|---|--|
| 1 | Judul Penelitian      | : | Pola Keruntuhan Clay Shale Tak Jenuh Dan Jenuh Pada Pengujian Triaxial <i>Unconsolidated Undrained</i> |
| 2 | Ketua Peneliti        | : |  |
|   | a. Nama Lengkap       | : | DR.Ir. Idrus M. Alatas M.Sc  |
|   | b. Jenis Kelamin      | : | Laki-laki  |
|   | c. NIP                | : | 11860032   |
|   | d. Disiplin ilmu      | : | Geoteknik (Teknik Sipil)   |
|   | e. Pangkat/Golongan   | : | Lektor /III d  |
|   | f. Jabatan            | : | Dosen  |
|   | g. Fakultas/Prodi     | : | Teknik Sipil dan Perencanaan / Teknik Sipil  |
|   | h. Alamat             | : | Jl. Moh. Kahfi II, Srengseng Sawah Jak-Sel.  |
|   | i. Telpon/Faks/E-mail | : | 0218410387/hb_idrus@yahoo.com  |
| 3 | Anggota Peneliti      | : | ---  |
| 4 | Lokasi Penelitian     | : | Hambalang, Jawa Barat dan Lab. Mektan ISTN Jakarta   |
| 5 | Jumlah biaya          | : | 12.500.000,-   |

Jakarta, Maret 2018

**Mengetahui,  
Ketua Program Studi  
Teknik Sipil**

Ir. Nasir Djalili, MT



**Menyetujui,  
Ketua LP2M – ISTN**

**Ketua Peneliti**

DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc

DR. Ir. Syamsul Elyumin MSc



Tanggal	: 14/03/2018
No. Inventaris	:
Kode Eksemplar	:
No. Panggil	:
Sumber	:
Lokasi	:
Paraf	:



## DAFTAR ISI

Isi	Halaman
Daftar isi	i
Kata Pengantar	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	xii
ABSTRAK	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Pernyataan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Objektif Penelitian	4
1.4 Lingkup Penelitian	4
1.5 Kepentingan Penelitian	6
1.6 Susunan Pembahasan Penelitian	7
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR</b>	<b>8</b>
2.1 Pendahuluan	8
2.2 Perilaku Clay Shale	8
2.3 Kekuatan Geser Clay Shale	10
2.3.1 Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb	10
2.3.2 Pola Bidang Keruntuhan	12
2.3.3 Pengaruh Kekasaran Pada Permukaan Bidang Keruntuhan Batuan	13
2.3.4 Pengaruh Faktor Joint (F <sub>j</sub> ) Terhadap Kekuatan Geser Batuan	15

2.3.5	Kekuatan Geser Clay Shale	16
2.4	Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Proses Pelapukan	19
2.5	Penentuan Kekuatan Geser Dengan Sistem Tahap Berbilang ( <i>multistage system</i> )	22
2.6	Garis Joint ( <i>Fracture Line</i> ) Pada Sampel Tak Terganggu	25
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>28</b>
3.1	Pendahuluan	28
3.2	Disain dan Diagram Alir Penelitian	29
3.3	Metode Persampel Uji Triaksial	31
3.4	Uji Laboratorium Mekanik Tanah	33
3.4.1	Uji Triaksial Unconsolidated Undrained ( <i>UU Triaxial</i> )	33
3.4.2	Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Serta Siklus Pembasahan dan Pengeringan	33
3.4.3	Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Clay Shale Tak Jenuh	34
3.4.4	Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Sampel Clay Shale Jenuh	37
3.5	Proses Pelapukan di Laboratorium	38
3.6	Jenis dan Lokasi Laboratorium Penguji	41
3.7	Uji Pendahuluan di Laboratorium	42
3.7.1	Sifat Fisik	43
3.7.2	Sifat Mekanik Dengan Uji Triaksial Unconsolidated Undrained (UU)	45
3.7.2.1	Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Clay Shale Tak Jenuh	45
3.7.2.2	Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Dengan Metode Tahap Berbilang	46
3.7.2.3	Kekuatan Geser Pada Clay Shale Tak Jenuh	47
3.7.2.4	Kekuatan Geser Pada Clay Shale Jenuh	48
3.8	Perilaku Bidang Keruntuhan	51

<b>BAB 4</b>	<b>PENGARUH PELAPUKAN SYAL LEMPUNG TERHADAP KEKUATAN GESER DAN BIDANG KERUNTUHAN</b>	<b>52</b>
4.1	Pendahuluan	52
4.2	Perbedaan Perilaku Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Dari Tegangan Puncak Hingga Tegangan Residual Akibat Proses Pengerinan	53
4.2.1	Clay Shale Tak Jenuh	54
4.2.2	Perbedaan Pengurangan Kohesi Pada Clay Shale Jenuh	59
4.2.3	Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Pada Clay Shale Jenuh	62
4.2.4	Perbedaan Kekuatan Geser Pada Tegangan Jumlah Dan Tegangan Efektif	67
4.3	Perubahan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Siklus Pembasahan dan Pengerinan	75
4.3.1	Perbedaan Kohesi Clay shale Tak Jenuh	77
4.3.2	Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh	79
4.4	Perbandingan Sudut Joint Teori dan Sudut Joint Hasil Penelitian	85
4.4.1	Hubungan Sudut Bidang keruntuhan Teori Dengan Sudut Bidang keruntuhan Hasil Penelitian Clay Shale Tak Jenuh dan Jenuh	91
4.4.2	Pengaruh Waktu Pengerinan Terhadap Sudut Joint Clay Shale Tak Jenuh dan Jenuh	94
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>98</b>
5.1	Kesimpulan	98
5.2	Saran	100
	<b>Referensi</b>	<b>101</b>
	<b>Lampiran</b>	<b>107</b>

## KATA PENGANTAR

Dengan mewujudkan rasa syukur kepada Allah swt, alhamdulillah penelitian ini yang berjudul **“Pola Keruntuhan Clay Shale Tak Jenuh Dan Jenuh Pada Pengujian Triaxial *Unconsolidated Undrained*”** selesai kami kerjakan dan di susun dalam laporan penelitian ini. Penelitian ini merupakan bagian dari seri penelitian yang menyangkut penelitian tentang clay shale yang sedang kami intensifkan untuk diteliti dalam 4 tahun belakangan ini. Kami bersyukur bahwa ini dalam penelitian ini didapat suatu yang sangat bermanfaat dalam melanjutkan seri penelitian clay shale selanjutnya,

Kami ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terus menerus mensupport kami dalam hal penelitian ini. Terutama kepada rekan kerja kami yang mendukung dan sangat membantu dalam mensukseskan penelitian ini.

Kami sadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, namun adalah suatu titik awal yang sangat baik untuk mengembangkannya dimasa depan. Untuk itu mau berharap masukkannya dari rekan rekan seprofesi untuk menyumbang saran agar dapat menyempurnakan penelitian ini berkembang dimasa depan.

Semogan Allah swt selalu memberikan kekuatan kepada kita semua untuk terus menjalankan penelitian yang bermanfaat untuk perkembangan teknologi dimasa depan.

Peneliti

DR Ir. Idrus M. Alatas M.Sc

## DAFTAR GAMBAR

Gambar No	JUDUL GAMBAR	Hal
Gambar 1.1	Pengaruh kadar air ( $w_n$ ) pada lempung terhadap perubahan tegangan dan regangan lempung (Holtz dan Wesley, 1981)	2
Gambar 1.2	Perubahan bentuk fisik clay shale dari masa ke masa (Irsyam <i>et al.</i> , 2011)	3
Gambar 1.3	Lokasi Pusat Pendidikan Olah Raga Hambalang, Sentul, Jawa Barat (Geoinves, 2010)	5
Gambar 1.4	4 Keruntuhan lereng clay shale di proyek jalan Tol Semarang Ungaran Bawen seksi STA 19+250 (Himawan, 2011)	5
Gambar 2.1	Perilaku lempung-batuan dasar di lapangan (Nandi dan Shakoor, 2008)	9
Gambar 2.2	Ilustrasi perubahan batu lempung terhadap masa akibat proses pelapukan (Sadisun <i>et al.</i> , 2010)	10
Gambar 2.3	Selimut keruntuhan Mohr dan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb	11
Gambar 2.4	Pola pada bidang keruntuhan tanah dengan bidang utama	12
Gambar 2.5	Hukum Pattons untuk kekasaran pada liputan keruntuhan (a) dan kriteria dua garis lurus kekuatan geser dari hukum Patton (b) (Patton, 1966)	14
Gambar 2.6	Pengaruh faktor joint terbatasap ratio unconfined compression test (Jade dan Sitharam, 2003)	15

Gambar 2.7	Perubahan sifat fisik clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang terhadap proses pengeringan dan siklus pembasahan pengeringan, Alatas I.M.,(2017).	15
Gambar 2.8	8 Perubahan kekuatan geser clay shale akibat pelapukan di lapangan (Gartung, 1986)	17
Gambar 2.9	Hubungan tegangan dan regangan geser dari uji pemulihan pada shale Duck Creek dan shale Otay Bentonic (Timothy <i>et al.</i> , 2005a)	17
Gambar 2.10	Hasil uji geser cincin pada lokasi -1 tanah batu lempung (Mandar dan Robert, 2005)	18
Gambar 2.11	Gred pelapukan $W_0$ (mula-mula) hingga $W_5$ (sangat terpelapukan) terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Emberhardt <i>et al.</i> , 2004)	19
Gambar 2.12	Gambar keruntuhan sampel (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro selepas uji triaksial tahap berbilang (Youn dan Tonon, 2010)	20
Gambar 2.13	Hubungan tegangan sisih puncak (MPa) dengan masa pengeringan 48 jam (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro (Youn dan Tonon, 2010)	20
Gambar 2.14	Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008)	22
Gambar 2.15	Hubungan tegangan geser dan ubah bentuk sisi dari uji kekuatan geser dengan geser langsung dengan tahap berbilang (Gan <i>et al.</i> , 1988; Gan dan Fredlun, 1988)	23
Gambar 2.16	Hubungan tegangan regangan pada material granit dari uji triaksial dengan tahap berbilang pada batuan Granit pada (a) sample 5 dan (b) sampel 22 (Ho dan Fredlund, 1982)	24
Gambar 2.17	Hubungan ratio tegangan dengan sudut rekahan sampel (Jaeger, 1971; Kamon, 1987)	25
Gambar 2.18	Keadaan <i>Physiographic</i> Regional Pulau Jawa dan Madura (Van Bemmelen, 1970)	26



Gambar 2.19	Selimut keruntuhan Coulomb dan Von Mises serta sudut joint batuan yang terjadi (Barton, 2014).	26
Gambar 3.1	Diagram alir kerja penelitian pola keruntuhan uji triaxial clay shale	30
Gambar 3.2	Metode persampelan tak terganggu pada lapangan untuk uji triaksial di laboratorium	31
Gambar 3.3	Pengembangan acuan teras yang boleh terbelah ( <i>split single core barrel</i> ) (a), pelepasan kepala acuan teras (b), hasil sampel clay shale (c), sampel clay shale dibalut plastik hitam (d), sampel clay shale dimasukkan dalam PVC siap dihantar ke laboratorium (e).	32
Gambar 3.4	Tegangan sisih terhadap regangan tiga sampel clay shale pada tegangan keliling CP-1= 39 kN/m <sup>2</sup> , CP-2= 78 kN/m <sup>2</sup> & CP-3= 118 kN/m <sup>2</sup> , yang dilanjutkan dengan sistem tahap berbilang pada keadaan residual	35
Gambar 3.5	<b>5</b> Penentuan kohesi (c) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh unconsolidated undrained (UU) pada tegangan puncak	36
Gambar 3.6	Penentuan kohesi residual( $c_{rp}$ ) dan sudut geser dalam residual( $\phi_{rp}$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh unconsolidated undrained (UU) pada tegangan residualtanpa pelepasan tegangan	36
Gambar 3.7	Penentuan kohesi residual( $c_{rf}$ ) dan sudut geser dalam residual( $\phi_{rf}$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh unconsolidated undrained pada tegangan residualdengan pelepasan tegangan	37
Gambar 3.8	Uji pengukuran perubahan isi sampel (a) dan ruang pengeringan (b)	39
Gambar 3.9	Uji di laboratorium mekanik tanah Geoinves di Jakarta (Geoinves, 2014)	42
Gambar 3.10	Hasil sampel tak terganggu clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang di dalam ruang pengeringan	43

Gambar 3.11	Distribusi ukuran butiran clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang	44
Gambar 3.12	Perilaku tegangan regangan dari uji triaksial mula-mula dengan tahap berbilang pada tegangan residual. (a) Pada keadaan tegangan puncak dan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan Sampel H-1, H-2 dan (b) pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan Sampel H-2	46
Gambar 3.13	(a) Tegangan regangan pada uji triaksial tahap berbilang clay shale Hambalang (H-88) pada keadaan tegangan puncak dengan tahap berbilang dan (b) pada clay shale Semarang-Bawen (S-86) pada keadaan puncak dan keadaan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan	47
Gambar 3.14	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Hambalang mula-mula (H-88), sampel jenuh pada tegangan puncak dan efektif dengan uji triaksial tahap berbilang	49
Gambar 3.15	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-37, S-38, S-39), sampel tak jenuh pada tegangan puncak	50
Gambar 3.16	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan	50
Gambar 3.17	Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan dengan uji tahap berbilang triaksial	50
Gambar 3.19	Gambar bidang keruntuhan S-37, S-38 dan S-39 setelah uji triaksial terjadi	51
Gambar 4.1	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh clay shale Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual ( $c_{rp}$ dan $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan	55
Gambar 4.2	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual ( $c_{rp}$ dan $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan	56

Gambar 4.3	Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual ( $\phi_{rp}$ dan $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan.	58
Gambar 4.4	Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual ( $\phi_{rp}$ dan $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan	58
Gambar 4.5	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan jumlah (b) pada tegangan efektif	61
Gambar 4.6	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan jumlah (b) pada tegangan efektif	62
Gambar 4.7	Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif	66
Gambar 4.8	Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif	66
Gambar 4.9	Hubungan antara sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) dengan batas cair LL (Mesri dan Diaz, 1986)	67
Gambar 4.10	Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Semarang-Bawen	69
Gambar 4.11	Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Hambalang	69
Gambar 4.12	Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Semarang-Bawen	70
Gambar 4.13	Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Hambalang	70

Gambar 4.14	Hubungan antara $\phi_u$ Undrained dengan $\phi'$ Drained (Ajmera <i>et al.</i> , 2012)	71
Gambar 4.15	Perubahan kohesi clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit	78
Gambar 4.16	Perubahan kohesi clay shale Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit	79
Gambar 4.17	Perubahan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit	81
Gambar 4.18	Perubahan sudut geser dalam clay shale Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit	81
Gambar 4.19	Variasi kekuatan geser terhadap tegangan normal akibat penambahan dan pengurangan kadar air lebih kurang 2% dari OMC (Hatami <i>et al.</i> , 2016)	83
Gambar 4.20	Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 0 hari hingga 32 hari)	87
Gambar 4.21	Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 40 hari hingga 80 hari)	88
Gambar 4.22	Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Hambalang tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 0 hari hingga 32 hari)	89
Gambar 4.23	Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Hambalang tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 40 hari hingga 80 hari)	90

Gambar 4.24	Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Semarang-Bawen	93
Gambar 4.25	Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Hambalang	93
Gambar 4.26	Kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Semarang-Bawen pada sampel tak jenuh dan jenuh	95
Gambar 4.27	Kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Hambalang pada sampel tak jenuh dan jenuh	97

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel No</b>	<b>JUDUL TABEL</b>	<b>Hal</b>
Tabel 2.1	Pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Youn dan Tonon, 2010)	21
Tabel 2.2	Hasil nilai kekuatan geser dari Tanah Khoen Kaen Loess (Hormdee <i>et al.</i> , 2012)	25
Tabel 3.1	Perubahan tegangan keliling pada keadaan awal dan pada keadaan residual dengan sistem tahap berbilang ( <i>multystage system</i> ) pada uji triaksial tak jenuh	34
Tabel 3.2	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (1 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	39
Tabel 3.3	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (2 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	40
Tabel 3.4	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (3 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	40
Tabel 3.5	Tabel uji triaksial pada clay shale dengan pembasahan dan pengeringan dengan 2 kali rendam/ 8 hari, hingga masa 40 hari	41
Tabel 3.6	Jenis pengujian dan lokasi laboratorium	41
Tabel 3.7	Jenis uji awal di laboratorium clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang	42

Tabel 3.8	Hasil uji batas Atterberg clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang	43
Tabel 3.9	Hasil uji sifat fisik clay shale Semarang- Bawen dan Hambalang	44
Tabel 4.1	Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada waktu semula jadi	71
Tabel 4.2	Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada waktu semula jadi serta waktu hari ke-80	72
Tabel 4.3	Penelitian terdahulu yang dibahas berhubungan dengan hasil penelitian berupa perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual	73
Tabel 4.4	Penelitian terdahulu yang dibahas berhubungan dengan hasil penelitian berupa perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual	74
Tabel 4.5	Siklus pembasahan dan pengeringan clay shale dan tabel uji triaksial	76
Tabel 4.6	Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian dari kasus siklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser	84
Tabel 4.7	Hasil penelitian perubahan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga hari ke-24	85
Tabel 4.8	Hasil penelitian perubahan kekuatan geser clay shale Hambalang akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga hari ke-32	85

Tabel 4.9	Kasus sudut joint ( $\theta$ ) pada perbandingan antara metode numerikal dan hasil analitik untuk uji UCS dalam kPa (Zhao, 2011)	94
Tabel 4.10	Hasil penelitian mengenai perbedaan antara kekuatan geser pada tegangan total dan tegangan efektif	96



## ABSTRAK

Perilaku sampel triaxial clay shale Hambalang dan Semarang Bawen menunjukkan pola penurunan kuat geser akibat proses pelapukan. Hal ini terlihat dari penurunan kekuatan geser yang terjadi pada kondisi tegangan total serta pada tungan efektif. Pada clay shale Hambalang sama seperti clay shale Semarang Bawen, kohesi efektif sedikit lebih kecil dari pada kohesi totalnya, sedangkan sudut geser dalam efektif lebih besar dibandingkan sudut geser totalnya. Pada clay shale Semarang-Bawen tak jenuh, sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 5% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Semarang-Bawen jenuh sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih besar 0.6% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Pada clay shale Hambalang tak jenuh, sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 11.6% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Hambalang jenuh, sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian adalah lebih kecil 3% daripada sudut bidang keruntuhan teori.

## ABSTRACT

The behavior of Hambalang and Semarang Bawen triaxial clay shale samples shows a decrease in shear strength due to weathering. This can be seen from the decrease in shear strength that occurs under total stress conditions and effectively. In Hambalang clay shale, as in Semarang Bawen clay shale, effective cohesion is slightly smaller than the total cohesion, while the effective shear angle is greater than the total shear angle. In the unsaturated Semarang-Bawen clay shale, the average field collapse angle is 5% smaller than the theoretical failure angle. When in the Semarang-Bawen clay shale the saturation angle of collapse field averages 0.6% greater than the theoretical failure angle. In the unsaturated Hambalang clay shale, the average angle of collapse is 11.6% less than the theoretical failure angle. When the Hambalang clay shale is saturated, the average field collapse angle is 3% smaller than the theoretical failure angle.

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

Shale mempunyai ciri-ciri berupa patahan memanjang berbentuk lamina tipis atau lapisan berlapis berketebalan kurang daripada 1 cm yang dipanggil '*fissility*' (Blatt dan Robaert, 1996). Ciri '*fissility*' ini tidak terdapat pada batu lumpur lain yang berkomposisi sama. Sepertiga hingga dua pertiga kadar batu lumpur adalah butiran lanau berukuran lebih kecil daripada 0.06 mm. Sedangkan kurang daripada sepertiga kadar batu lempung adalah butiran lanau. Batuan dengan ukuran butiran yang sama tetapi dengan sedikit lempung atau lebih dua pertiga kadar butiran lanau disebut sebagai batu lanau.

Perilaku rekayasa utama clay shale amat sukar difahami kerana akan menjadi lempung lunak (lumpur) apabila terbuka kepada sinar cahaya matahari, udara dan air dalam masa yang agak singkat. Walau bagaimanapun lapisan clay shale yang dilindungi dengan lapisan tanah yang cukup tebal mempunyai kekuatan geser sangat baik. Perubahan sifat clay shale yang masih belum difahami ini telah mendorong penelitian dilakukan ke atas clay shale yang sukar terbuka mengalami proses pelapukan dan penurunan kekuatan melalui kerja galian.

#### **1.1 Latar Belakang Penelitian**

Pada beberapa kasus kerusakan infrastruktur bangunan akibat keruntuhan lereng di Indonesia dimulai daripada kelemahan struktur tanah clay shalnya. Keruntuhan lereng progresif telah diketahui dalam kejadian tanah runtuh seperti di Jalan Tol Cipulang (Irsyam *et al.*, 2007), Pusat Pendidikan Olah raga Hambalang

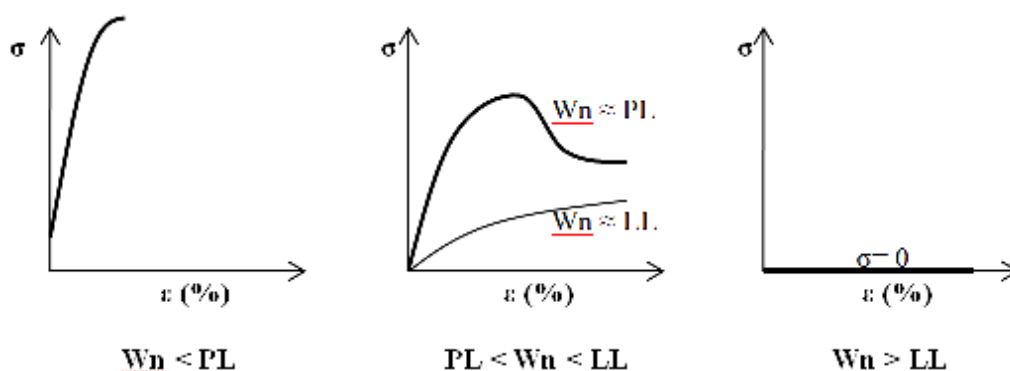
Sentul Bogor (Alatas, 2010) dan Jalan Tol Unggaran-Bawen, Jawa Tengah (Himawan, 2011). Penelitian terperinci yang kurang terhadap kasus-kasus tanah runtuh ini telah menyebabkan para engineer membuat kekeliruan dalam disain rekayasa struktur bangunan.

Peleitian tentang kekuatan geser tentang clay shale ini tidak terlalu banyak jumlahnya, terutama penelitian tentang penurunan kekuatan gesernya akibat pelapukan serta pengaruh dari penjumlahan, Di lapangan hampir sulit mendapatkan kondisi clay shale yang jenuh mengingat properties clay shale yang memiliki kepadatan yang cukup tinggi sehingga sulit air memasuki butiran clay shale

Namun dalam penelitian ini kekuatan geser clay shale diteliti bagaimana perilaku kekuatannya serta pola runtuhnya jika clay shale tersebut jenuh. Namun pengaruh konsolidasi clay shale tidak sama sekali diteliti dalam penelitian ini.

## 1.2 Pernyataan Masalah

Perubahan bentuk fisik clay shale sangat berbeda dengan lempung yang lain terutama terhadap pengaruh pengeringan dan pembasahan. Jika terjadi penurunan kadar air akibat proses pengeringan, lempung biasanya akan menunjukkan perubahan fisik yang lebih kukuh (Holtz dan Wesley, 1981). karena kekuatan geser lempung tersebut meningkat seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.1.



**Gambar 1.1** Pengaruh kadar air ( $w_n$ ) pada lempung terhadap perubahan tegangan dan regangan lempung (Holtz dan Wesley, 1981)

Sebaliknya, apabila proses pengeringan ataupun pengeringan dan pembasahan terjadi, maka clay shale menjadi lebih lemah. Ini terjadi karena proses pelapukan melalui pengeringan dan pembasahan telah menyebabkan penurunan kekuatan geser clay shale. Dalam Gambar 1.2 di bawah, perubahan bentuk fisik clay shale yang melalui proses pengeringan dan pembasahan dilihat semakin terlapukan dan kekuatan gesernya semakin berkurang.



**Gambar 1.2** Perubahan bentuk fisik clay shale dari masa ke masa (Irsyam *et al.*, 2011)

Kebanyakan penelitian clay shale yang lalu yang dibahas dalam Bab 2 menggunakan sampel tidak terganggu dan terganggu untuk mendapatkan kekuatan geser pada tegangan puncak dan tegangan sisa. Sampel-sampel tersebut diuji melalui uji geser cincin (sampel terganggu) dan uji geser kotak (sampel tidak terganggu) tanpa mengkaji pengaruh pelapukan. Oleh karenanya, dalam penelitian ini pengaruh proses pelapukan clay shale dikaji lebih mendalam untuk mengetahui perubahan sifat mekanik clay shale melalui data utama uji di laboratorium dengan pengujian triaxial unconsolidated undrained. Sehingga kini belum ada penelitian seperti ini yang menjadikan rujukan dalam perancangan kestabilan lereng yang memperhatikan proses perubahan kekuatan geser akibat proses pelapukan, pelepasan tegangan dan proses keruntuhan lereng progresif.

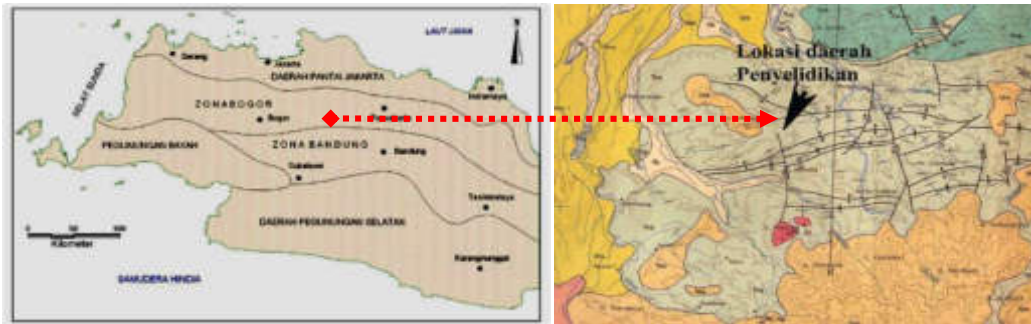
### **1.3 Tujuan dan Objek Penelitian**

Penelitian ini dijalankan dengan tujuan untuk mengkaji kasus pelapukan terhadap dari proses penjumlahan terhadap perbedaannya bila sampelnya tidak dijenuhkan. Tujuan penelitian dicapai melalui beberapa objektif berikut:

- (1) Menentukan pengaruh pelapukan dari proses pengeringan dan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale terhadap pola keruntuhan sampel triaxial unconsolidated undrained.
- (2) Menentukan penurunan kekuatan geser pada tegangan puncak hingga kekuatan geser residual pada clay shale tak jenuh dan jenuh akibat proses pelapukan di laboratorium.
- (3) Menentukan perbedaan kekuatan geser jenuh dan tak jenuh dari clay shale dari peguji triaxial unconsolidated undrained..

### **1.4 Lingkup Penelitian**

Lingkup penelitian ini akan dilakukan pada sampel tanah clay shale dari dua lokasi yang berbeda yaitu di Hambalang Sentul Jawa Barat seperti dalam Gambar 1.3 dan pada lokasi jalan tol Semarang Ungaran-Bawen, Jawa Tengah seperti dalam Gambar 1.4. Manakala pada masalah tanah runtuh yang terjadi pada pinggiran Jalan Tol Semarang Ungaran-Bawen pada STA 19+250 diambil sebagai material clay shale untuk penelitian.



**Gambar 1.3** Lokasi Pusat Pendidikan Olah Raga Hambalang, Sentul, Jawa Barat (Geoinves, 2010)



**Gambar 1.4** Keruntuhan lereng clay shale di proyek jalan Tol Semarang Ungaran Bawen seksi STA 19+250 (Himawan, 2011)

Untuk mencapai objektif (1), pengaruh pelapukan dari proses pengeringan dan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale terhadap pola keruntuhan sampel triaxial unconsolidated undrained maka clay shale diambil dari beberapa lokasi tanah runtuh. Perilaku pola keruntuhan sampel uji triaxial diamati (difoto), diukur sudut kemiringan bidang runtuh pada sampel, pada setiap akhir test. Hasil pengamatan bidang keruntuhan pada sampel clay shale ini dibandingkan dengan pola keruntuhan sampel secara teoritis. Perdaannya diamati untuk mengetahui seberapa besar deviasi sudut patahan keruntuhan terjadi antara teori dan praktek.

Kemudian, dalam objektif (2) penurunan kekuatan geser pada tegangan puncak hingga kekuatan geser sisa pada clay shale tak jenuh dan jenuh akibat proses pelapukan di laboratorium. Perbedaan kekuatan geser clay shale pada tegangan puncak dan tegangan geser ini dibandingkan pada kedua sampel, jenuh dan tak jenuh.

Hubungan kekuatan geser jenuh dan tak jenuh baik kohesi maupun sudut geser dalam dicari bentuk persamannya untuk menyatakan hubungan antara sampel jenuh dan tak jenuh

Kemudian dalam objektif (3), perbedaan kekuatan geser jenuh dan tak jenuh dari clay shale dari peguji triaxial unconsolidated undrained dicari berdasarkan persamaan linier dari kedua parameter kekuatan geser tersebut. Diharapkan untuk praktek aplikasinya nanti, cukup dilakukan pengujian sampel yang tak jenuh saja. Adapun kekuatan geser yang jenuhnya diperoleh dengan menentukan faktor koreksi dari keadaan tidak jenuh, baik untuk parameter kohesi maupun parameter sudut geser dalam pada kondisi tegangan puncak maupun residual.

## **1.5 Kepentingan Penelitian**

Penelitian berkaitan perilaku dan prestasi clay shale dilihat semakin berkembang. Jika dahulu beberapa uji kekuatan geser pada keadaan puncak dan sisa telah dibahas dengan mendalam seperti uji geser langsung (Gartung, 1986) dan (Tien *et al.*, 1987), uji geser cincin (Timothy dan Hisyam, 1992; Mesri dan Shahien, 2004), maupun uji triaksial (David dan Timothy, 1990; Mark, 2007). Namun kini lebih banyak penelitian sifat-sifat clay shale telah dilakukan seperti hubungannya dengan pemampatan clay shale (Bryson *et al.*, 2011), hubungan dengan indeks pengembangan (Powell *et al.*, 2013), serta hubungannya dengan mineralogi (Bryson dan Gutierrez, 2014), dan perilaku beban berulang untuk pekerjaan jalan (Rodgers *et al.*, 2014).

Kepentingan utama dari penelitian ini adalah untuk membuktikan pengujian kekuatan geser clay shale tidak diperlukan pada sampel yang jenuh. Hal ini bukan saja karena sulit mendapatkan kondisi clay shale segar dalam kondisi jenuh di lapangan. Jikapun ada perencanaan yang menginginkan parameter kekuatan geser pada keadaan jenuh, maka dapat digunakan koreksi faktor dari parameter kekuatan geser tak jenuhnya.

## **1.6 Susunan Pembahasan Penelitian**

Bab 1 adalah pendahuluan yang meliputi pembahasan tentang latar belakang, pernyataan masalah, tujuan dan objektif penelitian, lingkup penelitian dan kepentingan penelitian.

Seterusnya, Bab 2 membincangkan penelitian literatur berkaitan clay shale dari segi mineralogi, kimia, ciri-ciri kekuatan geser serta pengaruh pelapukan terhadap penurunan kekuatan gesernya, serta terori keruntuhan sampel triaxial.

Dalam Bab 3, metodologi penelitian dibahas dengan memuatkan diagram alir penelitian dan penjelasan tentang metode uji laboratorium yang akan dilakukan.

Dalam Bab 4, merupakan hasil uji triaxial undrained dari clay shale terhadap proses pelapukan akibat pengeringan serta siklus pengeringan dan pembasahan. Kekuatan geser yang dihasilkan adalah pada keadaan tegangan puncak dan tegangan residual, dan pada keadaan clay shale tak jenuh dan jenuh. Semua hasil ini disajikan dalam grafik dengan persamaannya serta dalam tabel.



## BAB 2

### STUDI PUSTAKA

#### 2.1 Pendahuluan

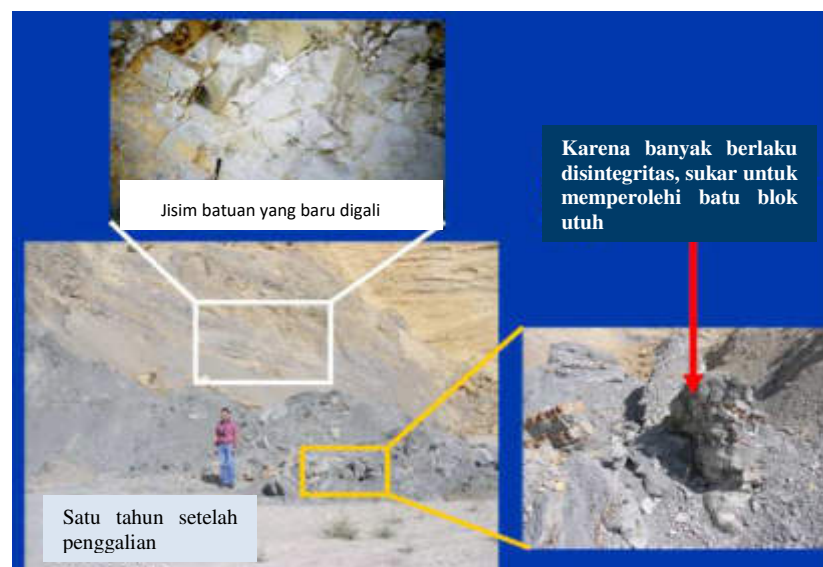
Penelitian terdahulu mengenai uji kekuatan geser dengan sistem bertahap sangat penting untuk menentukan kohesi dan sudut geser dalam clay shale. Uji triaksial dengan sistem bertahap diaplikasi untuk menentukan kekuatan geser sisa tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan. Dalam setiap uji triaksial, gambar sampel yang runtuh diambil untuk dibahas pada bab seterusnya.

#### 2.2 Perilaku Clay Shale

Banyak penelitian telah dilakukan mengenai keruntuhan lereng melalui penelitian lapangan ataupun penelitian di laboratorium, contohnya keruntuhan lereng di hulu empangan San Luis California yang disokong oleh tanah lempung kaku dan kering. Dalam penelitian tersebut ditunjukkan bahwa kekuatan geser tanah lempung menurun dengan cepat pada kekuatan melemah penuh (*fully softened*) ketika tanah lempung basah (Timothy *et al.*, 1991). Manakala pada penelitian tanah lempung yang dikenakan beban berulang, kekuatan menurun secara bertahap daripada melemah sepenuhnya kepada nilai sisa. Tanah lempung yang sangat terkukuh (*overconsolidated*) biasanya bersifat stabil dan memiliki kekuatan geser bandingan yang tinggi dalam keadaan asalnya. Perubahan kimia semasa proses pelapukan mengakibatkan berkurangnya kekuatan geser (Skempton, 1977). Ini bergantung pada kekuatan pelapukan, yaitu zon lemah akan berkembang pada lereng yang berpotensi

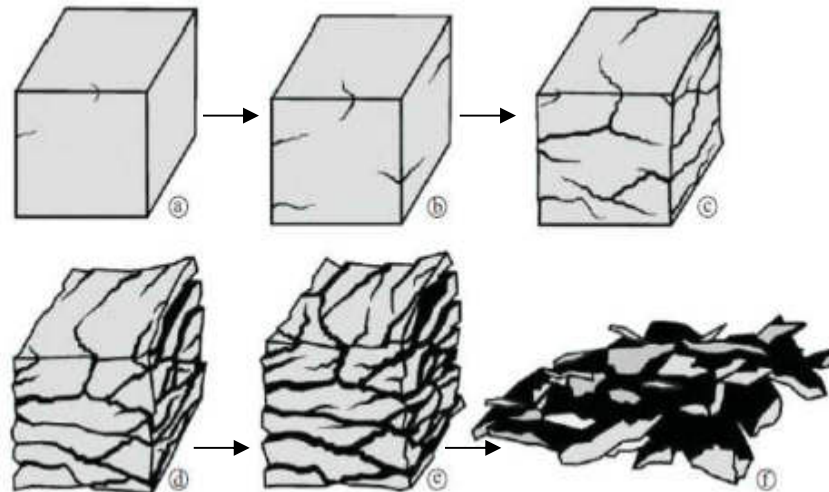
menjadi tidak stabil. Di zon yang paling tinggi kekuatannya, gerakan kecil mulai terbentuk dan mengakibatkan pengurangan yang progresif dari kekuatan geser yang menyebabkan ketidakstabilan pada lereng (Irsyam *et al.*, 1999).

Perilaku rekayasa clay shale adalah suatu perihal yang sangat rumit. Jika clay shale terkena cahaya matahari, udara dan air, maka dalam waktu yang singkat akan terpelapukan dan berubah menjadi lempung lunak. Dari penelitian terdahulu (Shakoor dan Tej, 2011), clay shale adalah sebagian jenis lempung batuan dasar (*Clay-Bearing Rocks*), batu lempung, batu lumpur dan batu lanau (Nandi dan Shakoor, 2008) seperti dalam Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Perilaku lempung-batuan dasar di lapangan (Nandi dan Shakoor, 2008)

Secara umumnya pelapukan dapat didefinisikan sebagai proses perubahan batuan yang terjadi di bawah pengaruh atmosfer dan hidrosfir. Perubahan tersebut boleh dalam bentuk disintegritas fisik dan penguraian kimia. Di kawasan iklim tropika, proses ini lebih sering terjadi berbanding keadaan iklim lainnya (Sadisun *et al.*, 2006).



**Gambar 2.2** Ilustrasi perubahan batu lempung terhadap masa akibat proses pelapukan (Sadisun *et al.*, 2010)

## 2.3 Kekuatan Geser Clay Shale

Kekuatan geser dari jisim tanah ialah rintangan per keluasan jisim tanah yang akan memberikan rintangan disepanjang bidang keruntuhan. Engineer harus memahami sifat dari kekuatan geser untuk menganalisis masalah kestabilan tanah seperti beban dasar tanah, kestabilan lereng dan tekanan sisi pada dinding penahan tanah (Das, 2006).

### 2.3.1 Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Mohr (1900) telah membentangkan teori untuk suatu keruntuhan bahan. Teori ini menegaskan bahwa bahan runtuh adalah gabungan kritikal tegangan normal dan tegangan geser dan bukan dari tegangan normal atau tegangan geser maksimum saja. Oleh karenanya, hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang keruntuhan boleh dinyatakan dalam persamaan berikut.

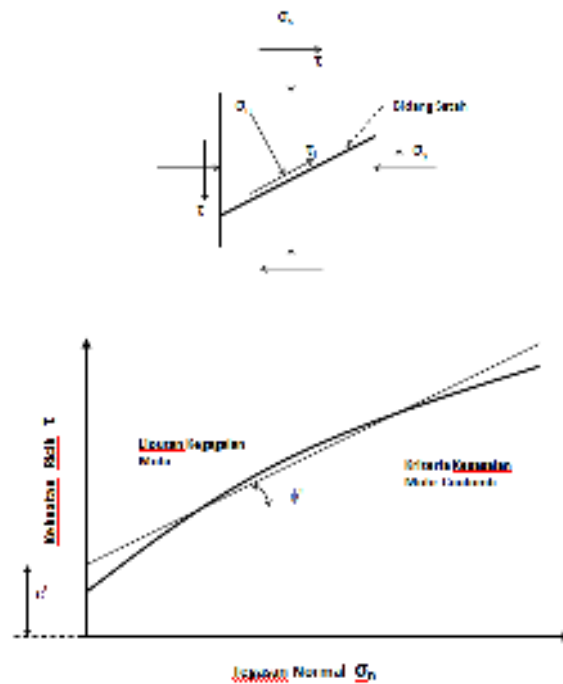
$$\tau_f = f(\sigma_n) \quad (2.1)$$

di mana  $\tau_f$  ialah kekuatan geser pada bidang bidan dan  $\sigma_n$  ialah tegangan normal pada bidang bidan. Oleh karenanya hubungan kekuatan geser runtuh dapat dilihat pada Persamaan (2.1). Manakala kekuatan geser runtuh ( $\tau_f$ ) di suatu titik pada suatu keadaan tertentu telah dikemukakan oleh Coulomb (1776) sebagai suatu fungsi linear

terhadap tegangan normal ( $\sigma_n$ ) pada bidang keadaan tersebut dititik yang sama sebagai berikut.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.2)$$

di mana  $c$  ialah kohesi ( $\text{kN/m}^2$ ) dan  $\phi$  ialah sudut geser dalam drajat. Persamaan (2.2) ini dipanggil kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Selubung keruntuhan dan kriteria tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Selimut keruntuhan Mohr dan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

Pada keadaan sampel jenuh, maka tegangan normal jumlah ialah tegangan normal efektif ( $\sigma'$ ) ditambah tegangan air pori ( $u$ ) yaitu:

$$\sigma_t = \sigma' + u \quad (2.3)$$

Jika tegangan efektif ( $\sigma'$ ) dalam persamaan (2.3) diperolehi, maka dengan Persamaan (2.2) akan menjadi

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.4)$$

di mana  $c'$  ialah kohesi efektif dan  $\phi'$  ialah sudut geser dalam efektif.

### 2.3.2 Pola Bidang Keruntuhan

Seperti dinyatakan oleh kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, keruntuhan geser akan terjadi apabila tegangan geser pada bidang mencapai nilai yang diberikan oleh persamaan (2.4). Gambar 2.4(a) menunjukkan pola bidang keruntuhan dengan bidang utama dan  $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$  masing-masing adalah tegangan utama efektif dan tegangan kecil efektif. Bidang keruntuhan didapati membentuk sudut dengan bidang utama. Gambar 2.4(b) pula menunjukkan bagaimana menentukan sudut dan hubungan antara  $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$ , yang merupakan plot bulatan Mohr untuk keadaan tegangan seperti dalam Gambar 2.4(a) (Das, 2006). Dari Gambar 2.4(a) diperoleh  $\theta$  senilai

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \quad (2.5)$$

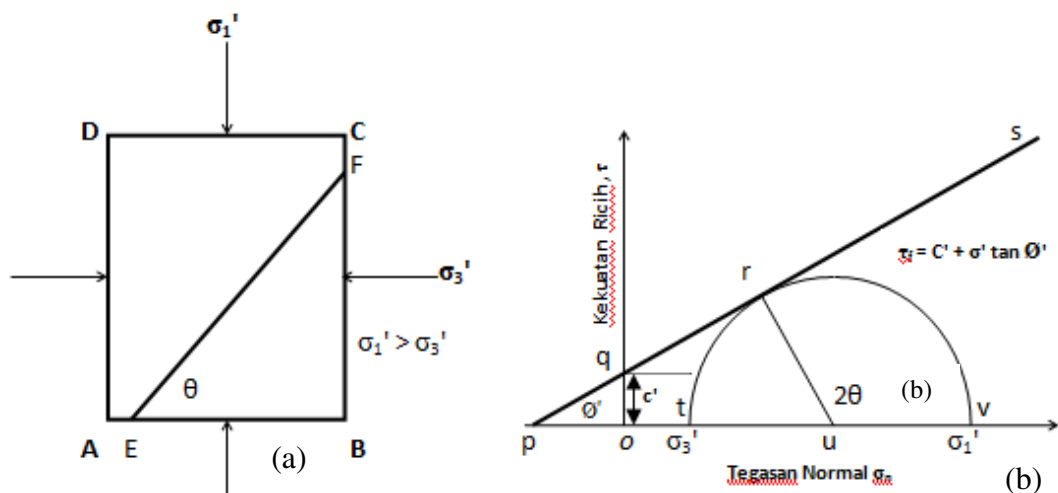
Manakala Gambar 2.8(b) pula menunjukkan

$$\frac{ur}{up} = \sin \phi' \quad (2.6)$$

$$up = op + ou = c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (2.7)$$

di mana

$$ur = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (2.8)$$



**Gambar 2.4** Pola pada bidang keruntuhan tanah dengan bidang utama

Sekiranya Persamaan (2.7) dan (2.7) diganti kedalam Persamaan (2.6), maka persamaan berikut boleh diperolehi.

$$\sin \emptyset = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{c' \cot \emptyset' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}} \quad (2.9)$$

atau

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \left( \frac{1 + \sin \emptyset'}{1 - \sin \emptyset'} \right) + 2c' \left( \frac{\cos \emptyset'}{1 - \sin \emptyset'} \right) \quad (2.10)$$

sedangkan

$$\left( \frac{1 + \sin \emptyset'}{1 - \sin \emptyset'} \right) = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\emptyset'}{2} \right) \quad (2.11)$$

dan

$$\left( \frac{\cos \emptyset'}{1 - \sin \emptyset'} \right) = \tan \left( 45^\circ + \frac{\emptyset'}{2} \right) \quad (2.12)$$

dengan demikian

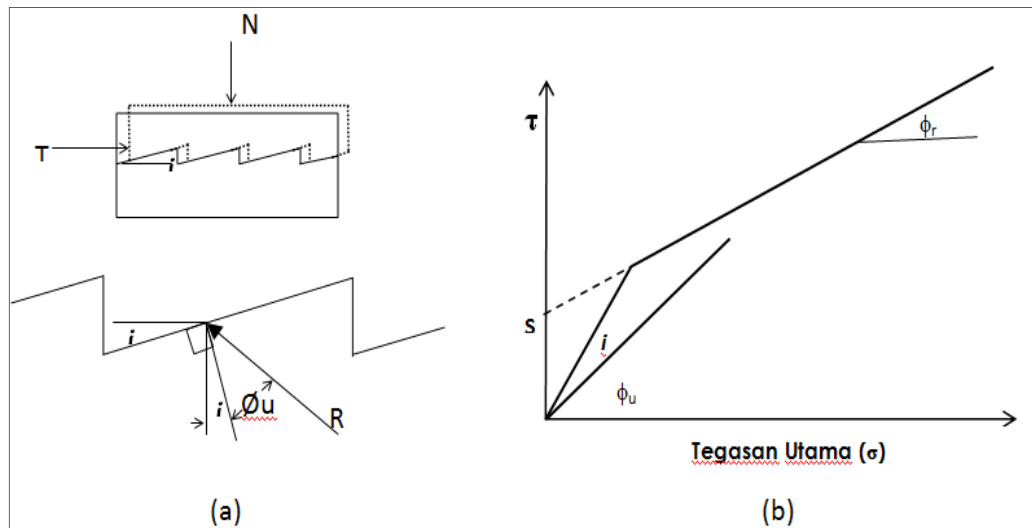
$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\emptyset'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45^\circ + \frac{\emptyset'}{2} \right) \quad (2.13)$$

Persamaan (2.12) disebut juga sebagai kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Kriteria tersebut mengandaikan bahwa bila sejumlah keadaan tegangan diketahui yaitu masing-masing menghasilkan keruntuhan geser pada tanah, satu garis sentuh akan dapat digambarkan pada bulatan Mohr. Garis sentuh itu disebut selubung keruntuhan tanah. Menurut Bishop (1966) dan Craig (1987), keadaan tanah tidak mungkin berada di atas selubung keruntuhan tersebut.

### 2.3.3 Pengaruh Kekasaran Pada Permukaan Bidang Keruntuhan Batuan

Ketika uji triaksial dijalankan pada batuan termasuk juga pada clay shale, keadaan tegangan keliling yang rendah akan menyebabkan peningkatan sudut geser dalam berbanding dengan menggunakan tegangan keliling yang lebih besar (Patton, 1966). Sudut geser dalam ini akan bertambah sebanyak  $i$  drajat karena pengaruh kekasaran pada permukaan bidang yang terjadi. Bila permukaan bidang yang terjadi itu mulus, maka sudut geser dalam yang terjadi pada tegangan geser puncak ialah  $\phi_u$ . Gambar 2.5 menunjukkan asas bagi hukum Patton bagi sudut geser dalam yang

terjadi akibat tegangan keliling yang rendah ialah  $\phi_u + i$ . Berdasarkan beberapa penelitian,  $\phi_u$  adalah antara  $21^\circ$  sehingga  $40^\circ$  (Goodman, 1989). Penelitian lain seperti Byerlee (1978) mendapati  $\phi_u$  ialah  $40^\circ$ . Pertambahan sudut geser dalam  $i$  akibat pengaruh kekasaran bidang keruntuhan adalah antara  $0^\circ$  hingga  $40^\circ$  atau lebih pada keadaan tegangan keliling yang kecil (Goodman, 1989).



**Gambar 2.5** Hukum Pattons untuk kekasaran pada liputan keruntuhan (a) dan kriteria dua garis lurus kekuatan geser dari hukum Patton (b) (Patton, 1966)

Untuk kriteria dua garis lurus kekuatan geser dari hukum Patton, persamaan kekuatan gesernya diperolehi pada Persamaan (2.14) untuk tegangan yang kecil dan Persamaan (2.15) untuk tegangan yang besar. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\tau = \sigma \tan (\phi_u + i) \quad (2.14)$$

dan

$$\tau = S + \sigma \tan \phi_r \quad (2.15)$$

Bagi kebanyakan tujuan, adalah memadai menggantikan  $\phi_r$  dengan  $\phi_u$  ke dalam persamaan kedua karena nilai-nilai ini adalah dekat. Data sebenar menunjukkan peralihan dari kelerengan awal pada  $\phi_u + i$  menjadi kelerengan akhir  $\phi_r$ . Banyak penelitian yang telah disampaikan berkenaan dengan teori ini diantaranya oleh Ladanyi dan Archambault (1970), Jaeger (1971) dan Barton (1973). Semua penelitian terdahulu telah dikaji oleh Goodman (1989).

### 2.3.4 Pengaruh Faktor Joint ( $F_j$ ) Terhadap Kekuatan Geser Batuan

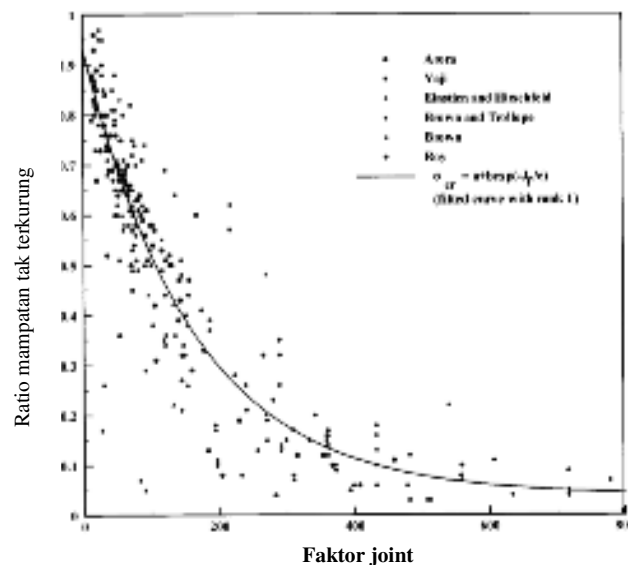
Tegangan mampatan tanah yang merupakan suatu sifat mekanik tanah bergantung kepada sifat-sifat indeks dan fisik tanah, gangguan tanah dan sejarah geologi tanah. Namun bagi batuan yang telah mengalami proses pelapukan, faktor joint ( $F_j$ ) batuan boleh mempengaruhi tegangan mampatan dari uji tekanan tak terkurung ataupun uji triaksial. Ini disebabkan karena clay shale juga memiliki perilaku yang sama seperti batuan. Faktor joint ( $F_j$ ) adalah ratio tegangan mampatan batuan joint terhadap batuan kukuh. Pengaruh faktor joint terhadap tegangan ratio mampatan uji tekanan tak terkurung dapat dilihat pada Gambar 2.16 berikut (Jade dan Sitharam, 2003). Daripada gambar tersebut, faktor joint ( $F_j$ ) ialah

$$F_j = \frac{J_n}{n r} \quad (2.16)$$

di mana  $J_n$  adalah jumlah joint dalam setiap meter kedalaman dengan  $n$  ialah parameter pola yang bergantung kepada orientasi dari  $\theta$ ,  $r$  ialah parameter kekasaran yang bergantung pada keadaan joint yaitu

$$r = \frac{\tau_j}{\sigma_{nj}} \quad (2.17)$$

di mana  $\tau_j$  ialah kekuatan geser sepanjang joint, dan  $\sigma_{nj}$  ialah tegangan normal pada joint.



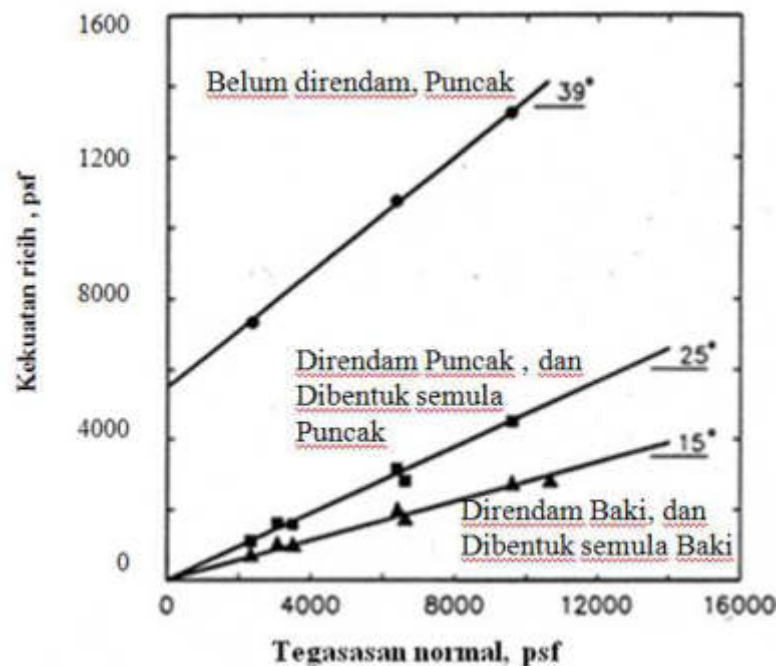
**Gambar 2.6** Pengaruh faktor joint terhadap ratio unconfined compression test (Jade dan Sitharam, 2003)



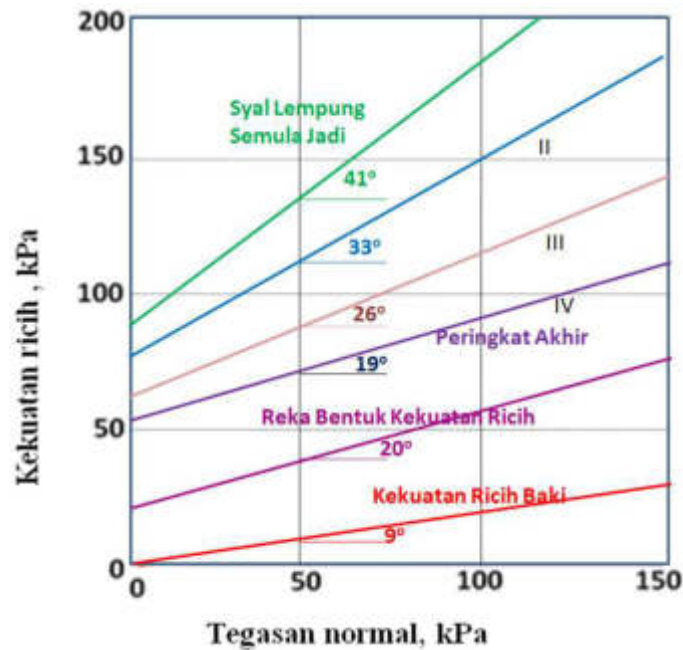
### 2.3.5 Kekuatan Geser Clay Shale

Hasil uji geser langsung yang tersalir (*Drained Direct Shear Box Test*) menunjukkan kekuatan geser clay shale akan menurun secara mendadak dari keadaan tanah tidak terganggu menjadi terganggu. Kekuatan geser tanah yang terganggu pada keadaan sisa akan mengecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (Timothy dan Duncan, 1991). Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa kohesi  $c$  pada tegangan puncak sebesar 5,750 psf. Manakala pada tegangan sisa, kohesi  $c$  ialah 0 psf.

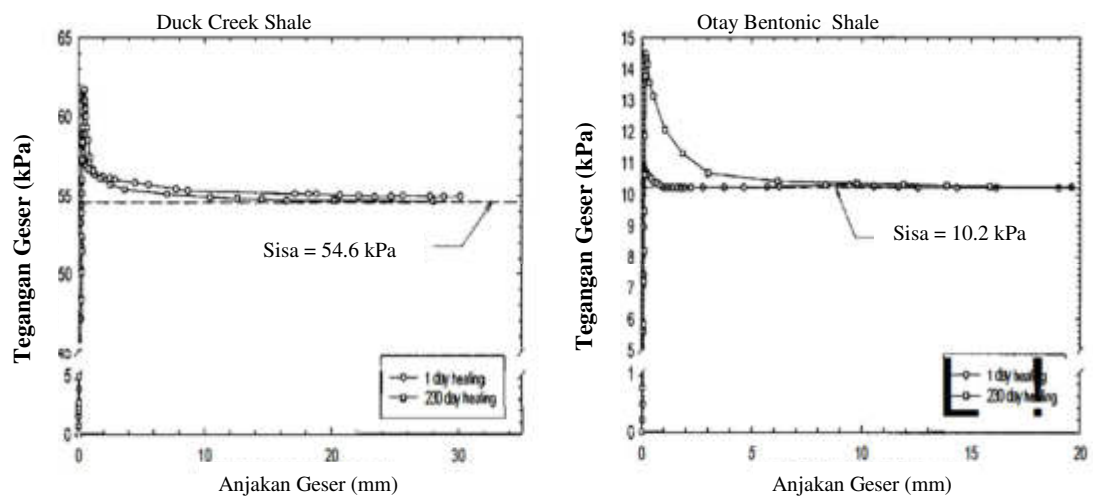
Kekuatan geser clay shale akibat pengaruh gangguan sampel dan proses pelapukan dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Gartung, 1986). Kekuatan geser mula-mula  $c = 85$  kPa dan  $\phi = 41^\circ$  dilihat berkurang akibat proses pelapukan. Semakin besar tahap pelapukan maka semakin menurun kekuatannya. Pada keadaan tegangan sisa, kekuatan geser yang diperolehi ialah  $c = 0$  kPa dan  $\phi = 9^\circ$ . Dari hasil uji geser cincin (Timothy *et al.*, 2005a), kekuatan regangan tanah clay shale akibat proses pemulihan kekuatan geser setelah sisa dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.7** Perubahan kekuatan geser clay shale (Timothy dan Duncan, 1991)



**Gambar 2.8** Perubahan kekuatan geser clay shale akibat pelapukan di lapangan (Gartung, 1986)

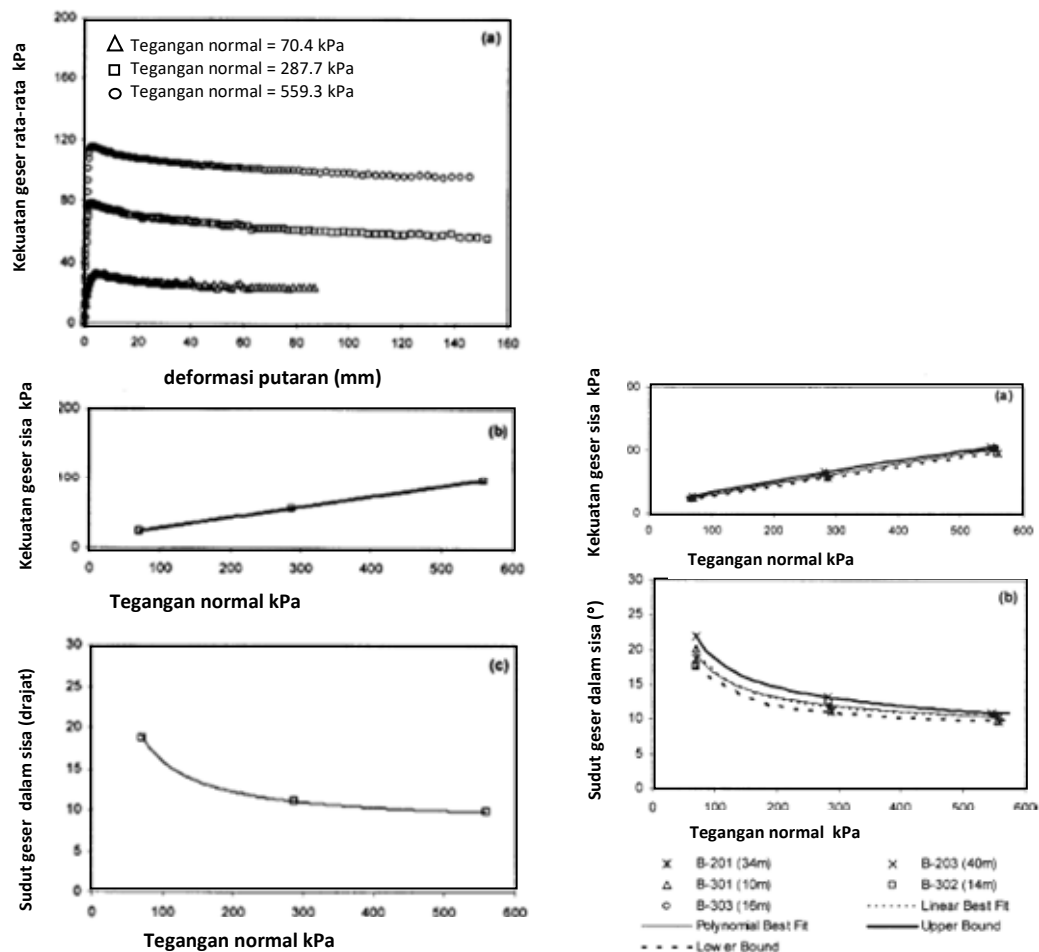


**Gambar 2.9** Hubungan tegangan dan regangan geser dari uji pemulihan pada shale Duck Creek dan shale Otay Bentonic (Timothy *et al.*, 2005a)

Kekuatan geser sisa clay shale telah banyak dibahas oleh beberapa peneliti terdahulu. Antaranya ialah uji geser cincin pada Gambar 2.10 (Mandar dan Robert, 2005; Timothy *et al.*, 2005b; Timothy dan Hisham, 1994; Timothy dan Duncan, 1991). Sementara itu, masih banyak peneliti lain yang membincangkan tentang kekuatan geser sisa pada tanah clay shale dengan melakukan uji geser cincin.

Parameter kekuatan geser sisa dari clay shale ini adalah sangat penting, terutama dalam analisis kestabilan lereng yang telah mengalami gelongsoran seperti yang dibahas oleh Timothy dan Hisyam (1998) dan; Timothy *et al.*, (2005c).

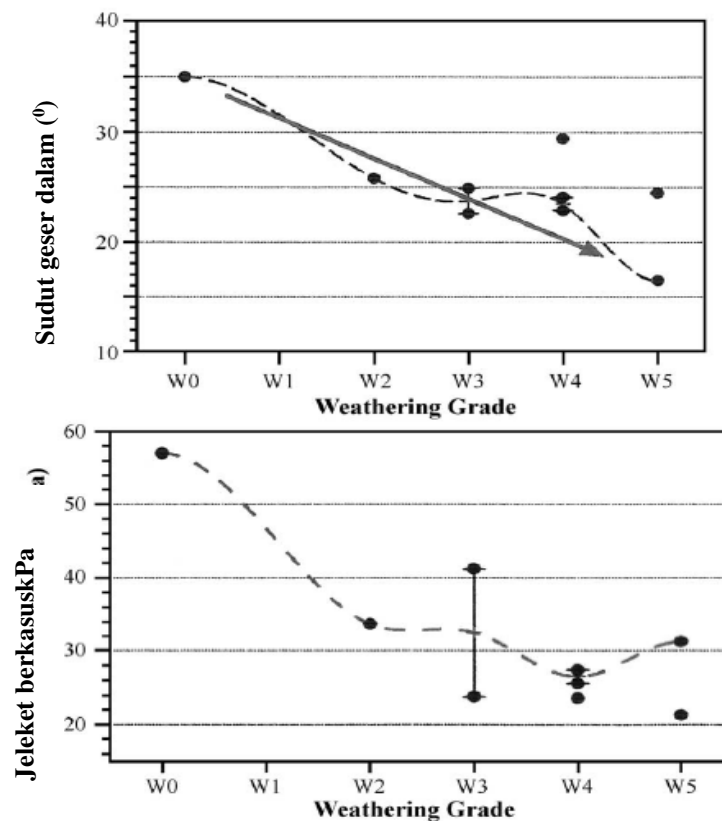
Dalam penelitian terdahulu (Mesri dan Diaz, 1986), hubungan antara perbedaan sudut geser dalam efektif pada tegangan jumlah ( $\phi'$ ) dengan sudut geser dalam pada tegangan sisa efektif ( $\phi_r'$ ) telah diperoleh dari 24 sampel clay shale. Perubahan minimum dari sudut geser dalam jumlah efektif ( $\phi'$ ) adalah  $34^\circ$  berkurang pada sudut geser dalam sisa efektif ( $\phi_r'$ )  $25^\circ$  atau 26.5%. Manakala perubahan maksimum dari sudut geser dalam jumlah efektif ( $\phi'$ ) bernilai  $24^\circ$  berkurang pada sudut geser dalam sisa efektif ( $\phi_r'$ ) bernilai  $5^\circ$  atau 79.2%.



**Gambar 2.10** Hasil uji geser cincin pada lokasi -1 tanah batu lempung (Mandar dan Robert, 2005)

## 2.4 Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Proses Pelapukan

Clay shale di formasi Subang meliputi satu kawasan luas di utara wilayah Jawa Barat, Indonesia. Apabila terbuka kepada atmosfer dan hidrosfir, kekuatan gesernya semakin berkurang hingga menyebabkan beberapa masalah signifikan dalam pelbagai disain (Sadisun *et al.*, 2005). Proses pelapukan tersebut menyebabkan perubahan isi sampel dan penurunan kekuatan tegangan bebas (Sadisun *et al.*, 2002). Penurunan kekuatan geser clay shale dan beberapa jenis batuan dengan uji tukul (*Schmidt Hammer Test*) akibat proses pelapukan telah dikaji melalui uji lapangan dengan menghubungkan pengamatan pelapukan terhadap hasil angka tukul Schmidt (Sadisun *et al.*, 2001; Sadisun *et al.*, 2006). Pengamatan pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam dan kohesi dapat dilihat pada Gambar 2.11 (Emberhardt *et al.*, 2004).

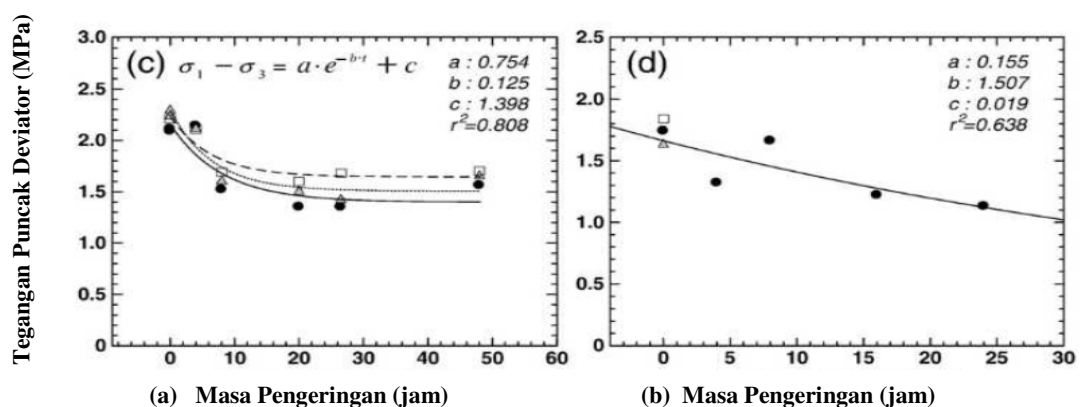


**Gambar 2.11** Gred pelapukan W<sub>0</sub> (mula-mula) hingga W<sub>5</sub> (sangat terpelapukan) terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Emberhardt *et al.*, 2004)

Penelitian pengaruh dari pengeringan udara terhadap perubahan kekuatan geser Marl Taylor dan Shale Navarro telah dilakukan dengan uji triaksial secara bertahap. Daripada penelitian tersebut, perubahan kekuatan geser didapati terjadi dengan pengeringan udara hanya sehingga 48 jam. Gambar 2.16 menunjukkan dua sampel uji tersebut saja. Pengeringan dengan masa seperti itu, sudah terjadi perubahan kekuatan geser. Gambar sampel-sampel dari uji triaksial dapat dilihat pada Gambar 2.12. Manakala perubahan tegangan sisih akibat masa pengeringan dapat dilihat dalam Gambar 2.13. Tabel 2.1 pula menunjukkan senarai perubahan kohesi dan sudut geser dalam akibat pengeringan udara (Youn dan Tonon, 2010). Penelitian yang dilakukan oleh Reißmüller (1977) mendapati pengurangan kohesi efektif terjadi dengan bertambahnya gred pelapukan dari gred ke-0 sebanyak 57 kPa hingga gred ke-5 sebanyak 36 kPa yang dilakukan dengan uji kotak geser.



**Gambar 2.12** Gambar keruntuhan sampel (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro selepas uji triaksial tahap berbilang (Youn dan Tonon, 2010)



**Gambar 2.13** Hubungan tegangan sisih puncak (MPa) dengan masa pengeringan 48 jam (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro (Youn dan Tonon, 2010)

**Tabel 2.1** : Pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Youn dan Tonon, 2010)

Formasi	Kekuatan Geser	Masa Pengeringan					
		0 jam	4 jam	8 jam	16 jam	24 jam	48 jam
Marl Taylor	$\phi_u$ (°)	1.1	1.5	2.0	2.7	3.2	3.5
	Kohesi (kPa)	1050	833	775	665	6.23	598
Shale Navarro	$\phi_u$ (°)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	*
	Kohesi (kPa)	733	682	634	549	4.75	*

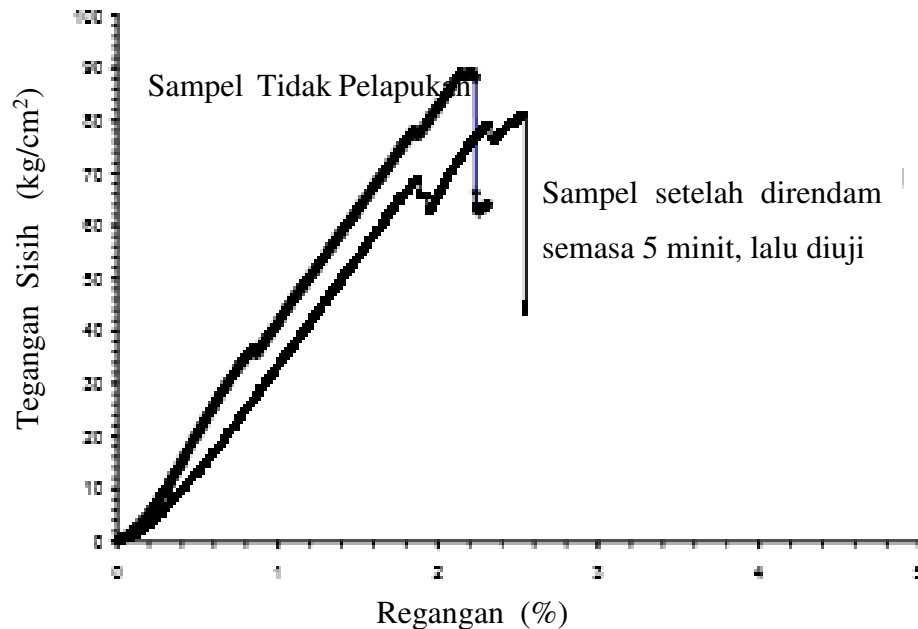
\*) tidak dapat diuji karena sampel hancur

Kohesi sisa pada masa asal sebesar 41.7 kPa menurun hingga menjadi 13 kPa atau 31.2% setelah masa tiga siklus belangsung. Sudut geser dalam sisa pada masa asal bernilai 45° menurun sehingga menjadi 33° atau 73.3% setelah tiga siklus belangsung (Pineda *et al.*, 2014b). Penelitian yang dilakukan oleh Bayin *et al.* (2013) melalui uji triaksial tersalir (CD), mendapati pada batas cecair (LL) 40% sudut geser dalam sisa ( $\phi_r$ ) mengecil daripada 27° menjadi 12° manakala LL menurun daripada 115% menjadi 44.4%. Manakala melalui uji pembalikan geser langsung (RDS), pada LL = 40% sudut geser dalam sisa ( $\phi_r$ ) mengecil daripada pada 22° menjadi 9°, manakala LL menurun daripada = 115% menjadi 41%. Melalui uji geser cincin (RS), pada batas cecair (LL) 40% sudut geser dalam sisa ( $\phi_r$ ) mengecil daripada 17° menjadi 8°, manakala LL berkurang daripada = 115% menjadi 47% (Bayin *et al.*, 2013).

Hasil uji tertinggi dari sudut geser dalam sisa terjadi pada uji triaksial tersalir (CD) adalah 27° pada batas cecair (LL) 40%. Pada uji reversal direct shear (RDS) ketika sudut geser dalam sisa = 22°, LL = 40%, atau berkurang 81.5% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (CD). Pada uji geser cincin (RS) sudut geser dalam sisa adalah 17° pada LL = 40%, atau berkurang 63% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (CD) (Bayin *et al.*, 2013).

Penelitian kasus pembasahan dan pengeringan juga telah dilakukan pada tanah Pamploma Marl dengan unconfined compression test (*unconfined compression test*). Sebelum dilakukan uji geser sampel ia direndam selama 5 menit seperti pada

Gambar 2.14 (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008). Metode perendaman ini akan digunakan pada clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang dalam uji triaksial dengan siklus pembasahan dan pengeringan.



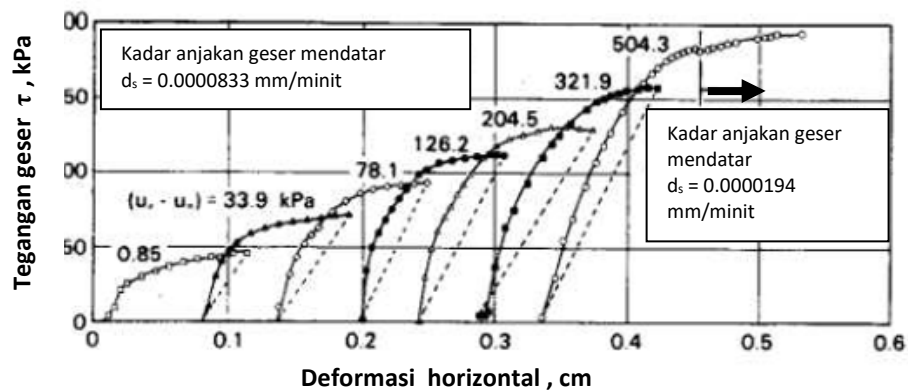
**Gambar 2.14** Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008)

## 2.5 Penentuan Kekuatan Geser Dengan Sistem Tahap Berbilang (*multistage system*)

Kekuatan geser adalah sesuatu yang sangat penting di dalam sifat mekanik tanah yang perlu diketahui untuk menentukan kestabilan asas, dinding penahan tanah, kestabilan lereng dan galian serta hal-hal lainnya dalam disain geoteknik. Untuk mencari jawapan atas permasalahan dalam disain geoteknik, kekuatan geser biasanya diperoleh dari uji di laboratorium ke atas sampel terpadat dari uji gerudi teras. Di dalam menentukan parameter kekuatan geser di laboratorium, sekurang-kurangnya tiga sampel uji yang sama sifat indeksnya diperlukan. Untuk mengurangkan kasudari ketidakseragaman sifat-sifat indeks dari ketiga-tiga sampel uji tersebut, maka uji triaksial dengan tahap berbilang adalah cara mudah untuk

menyimpulkan hasil ujinya. Uji dengan tahap berbilang ini hanya memerlukan satu sampel spesimen yang boleh dikenakan tegangan keliling secara bertahap.

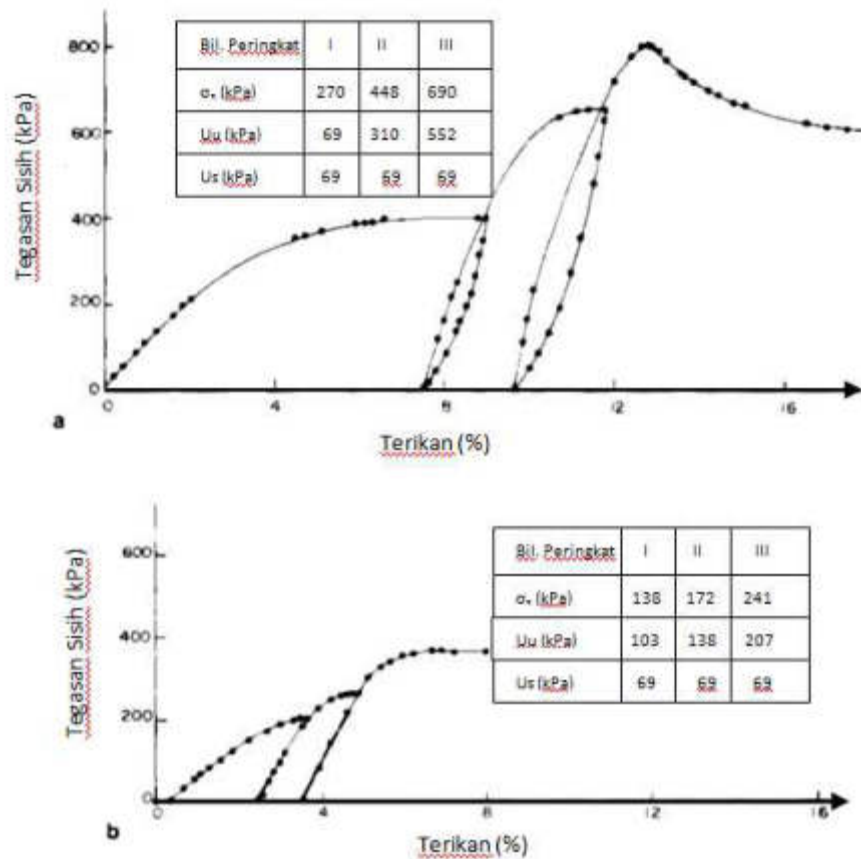
Uji kekuatan geser di laboratorium dengan tahap berbilang diperkenalkan oleh beberapa penelitian terdahulu sejak sekian lama. Uji tahap berbilang pada tanah pasir tak jenuh dengan uji geser langsung telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Gullic (1970), Gan *et al.* (1988) serta Nam (2011). Penambahan tegangan normal pada masa tegangan geser menghampiri tegangan maksimum, akan mengakibatkan peningkatan kembali tegangan geser hingga menghampiri tegangan geser maksimum yang kedua (Gan *et al.*, 1988; Gullic, 1970) dan (Nam, 2011). Hasil tegangan dan ubah bentuk sisi dari uji geser langsung dengan tahap berbilang dapat dilihat pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Hubungan tegangan geser dan ubah bentuk sisi dari uji kekuatan geser dengan geser langsung dengan tahap berbilang (Gan *et al.*, 1988; Gan dan Fredlund, 1988)

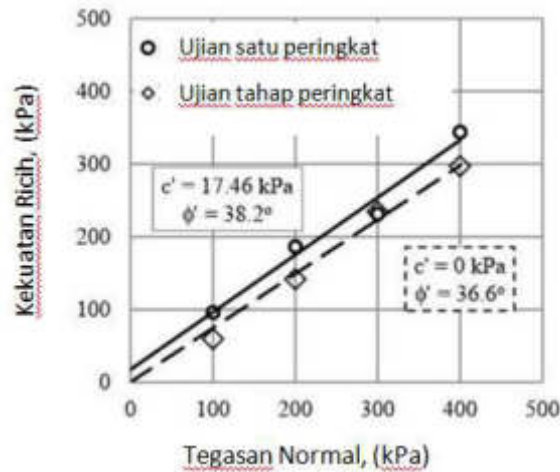
Uji tahap berbilang dengan uji triaksial adalah suatu uji yang sangat rasional, hal ini dikembangkan oleh para peneliti untuk mengelak ketidakseragaman daripada dari tiga sampel dalam uji triaksial. Metode ini telah digunakan oleh Kim (1979) dalam uji triaksial pada batuan dan Ravi et al (2011) melalui uji triaksial CD pada pasir yang keras. Uji triaksial dengan tahap berbilang juga sangat signifikan hasilnya bila dilakukan pada tanah yang tak jenuh (Ho dan Fredlund, 1982). Hubungan tegangan regangan dari uji triaksial dengan tahap berbilang pada batuan Granit (Ho dan Fredlund, 1982) dapat dilihat pada Gambar 2.16.





**Gambar 2.16** Hubungan tegangan regangan pada material granit dari uji triaksial dengan tahap berbilang pada batuan Granit pada (a) sample 5 dan (b) sampel 22 (Ho dan Fredlund, 1982)

Penilaian dari uji kekuatan geser standar dengan uji dengan tahap berbilang pada uji geser langsung memberikan hasil yang sedikit lebih kecil dari uji standar dengan menggunakan tiga sampel (Hormdee *et al.*, 2012). Uji triaksial dengan menggunakan alat kawalan tegangan telah dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik (Balazs dan Akoz, 2013). Perbedaan hasil kekuatan geser dari uji standar geser langsung dengan tahap berbilang dapat dilihat pada Gambar 2.17 (Hormdee *et al.*, 2012). Manakala hasil nilai dari kekuatan geser bila digunakan pada keregangannya yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.2, di mana terdapat perbedaan hasil kekuatan geser terjadi ketika penambahan tegangan keliling diambil pada 3% regangan, pada asimptot dan pada 15% regangan. Hasil kekuatan geser paling maksimum diperoleh bila tegangan menjadi asimptot pada sampel (Hormdee *et al.*, 2012).



**Gambar 2.17** Perbedaan hasil kekuatan geser dari uji standar geser langsung dengan tahap berbilang (Hormdee *et al.*, 2012)

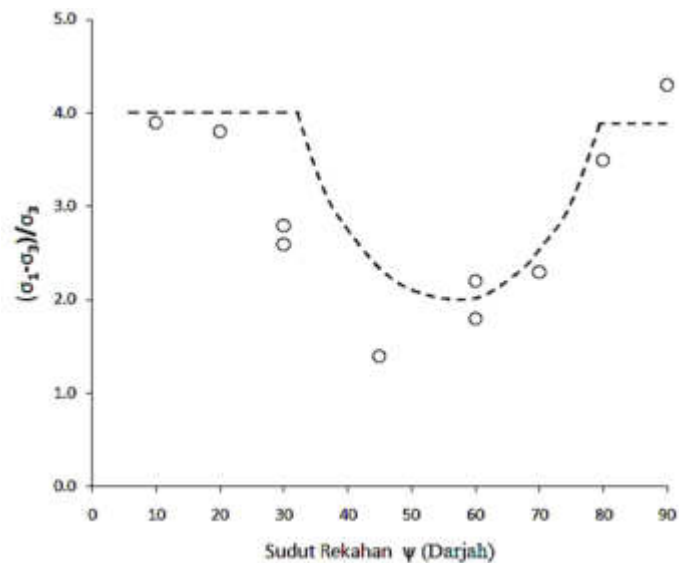
**Tabel 2.2** : Hasil nilai kekuatan geser dari Tanah Khoen Kaen Loess (Hormdee *et al.*, 2012)

$\sigma_n$ kPa	Nilai uji penelitian $\tau$ pada regangan 3 %, kPa	Nilai $\tau_f$ diperoleh dari nilai asimtot, kPa	Nilai yang diramalkan $\tau_f$ menggunakan regangan geser sebanyak 15%, kPa
100	50.4	62.9	59.4
200	115.3	153.8	141.8
300	166.1	263.2	234.4
400	265.2	312.5	297.0

## 2.6 Garis Joint (*Fracture Line*) Pada Sampel Tak Terganggu

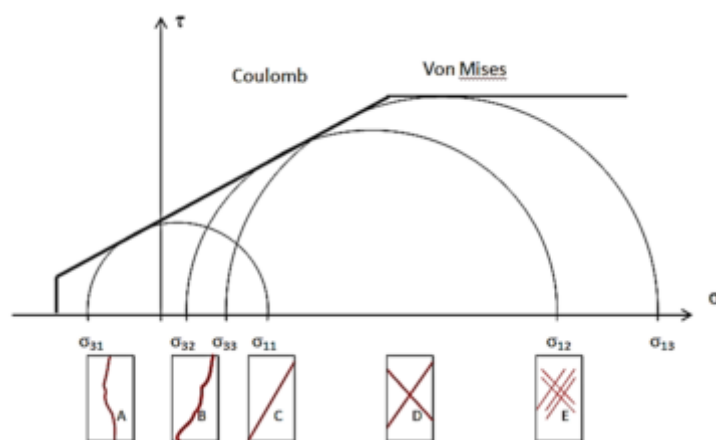
Kebanyakan penulis melaporkan kewujudan tingkah laku yang sama pada pasir di bawah uji disalirkan dan tak tersalir untuk Granit yang terpelapukan. Walau bagaimanapun, disebabkan oleh perubahan kekuatan mampatan mengikut arah tegangan utama bidang terpelapukan dari Granit, kekuatan geser adalah jauh lebih kecil daripada spesimen homogen yang kukuh (Kamon, 1987) melaporkan penurunan sebanyak 30% - 50% dari kekuatan geser cenderung terjadi pada sudut garis patah antara 40° dan 80° (Akai *et al.*, 1984). Pengurangan kekuatan telah

diperhatikan oleh Akai *et al.* (1984) yang secara kebetulan sama dengan teori Jaeger (1971) dan bersifat anisotropi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.18.



**Gambar 2.18** Hubungan ratio tegangan dengan sudut rekahan sampel (Jaeger, 1971; Kamon, 1987)

Sudut joint yang terjadi pada sampel uji triaksial tarikan mengikuti bentuk sampel A sebagaimana pada Gambar 2.19 (Barton, 2014). Pada Gambar 2.19 manakala sudut joint yang terjadi pada sampel uji triaksial mampatan mengikuti bentuk sampel B, C, D atau E, dan sangat bergantung kepada magnitud tegangan yang diperlukan hingga sampel hancur dan mencapai tegangan puncaknya (Barton, 2014).



**Gambar 2.19** Selimut keruntuhan Coulomb dan Von Mises serta sudut joint batuan yang terjadi (Barton, 2014).

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Pendahuluan**

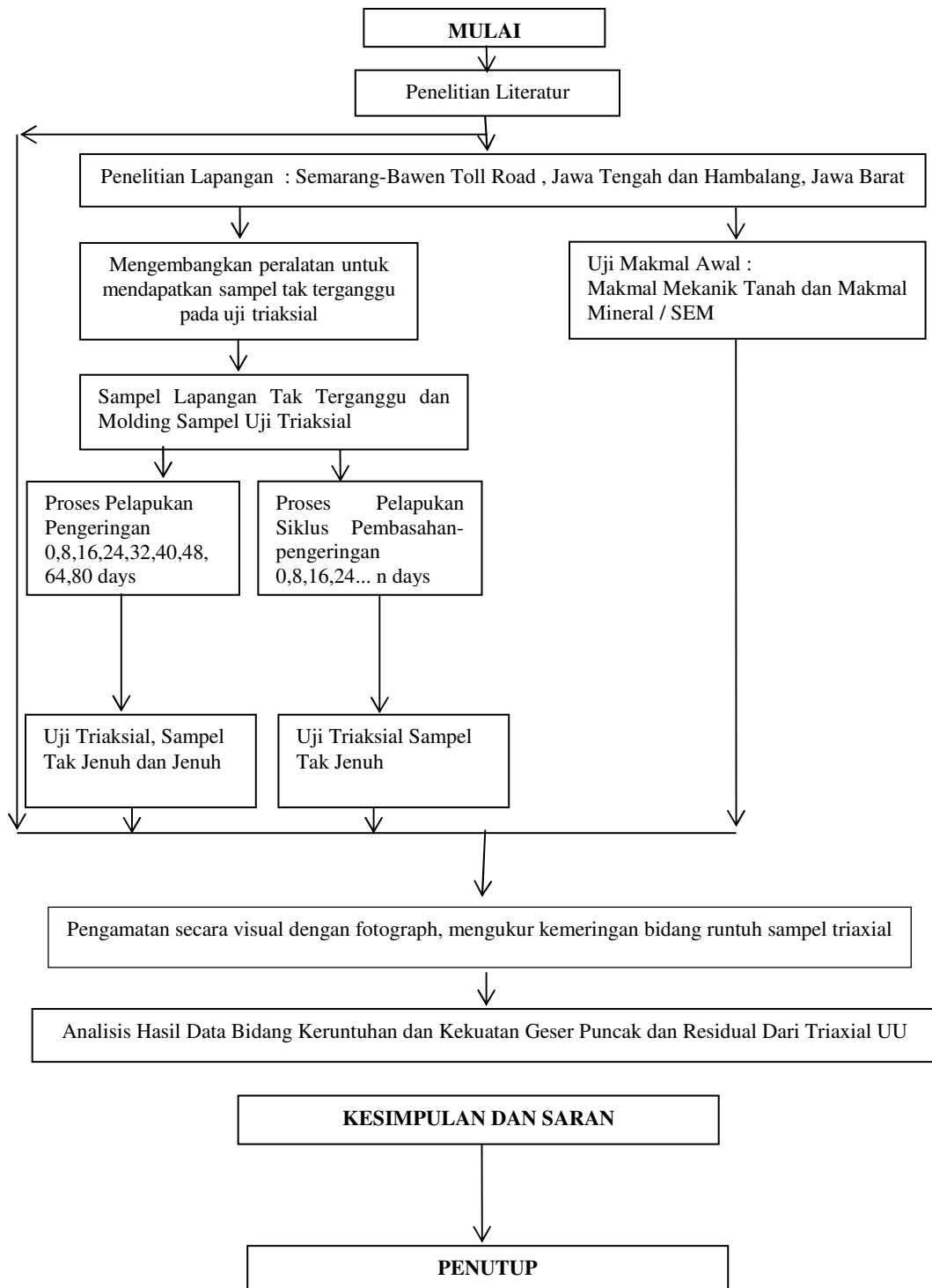
Pada penelitian ini, uji laboratorium mekanik tanah clay shale menjadi bagian utama dari metodologi penelitian, yaitu uji triaksial dari sampel tak terganggu. Sampel clay shale yang dikaji ialah dari Semarang-Bawen Jawa Tengah dan Hambalang Jawa Barat yang diperoleh dari uji galian dengan pengeboran. Sehingga sejumlah sampel yang diperoleh diharapkan memiliki sifat indeks terutama berat isi dan kadar air yang seragam.

Uji triaksial di laboratorium dilakukan pada sampel yang dilakukan proses pelapukan dengan cara pengeringan serta pengeringan dan pembasahan. Dua proses pelapukan ini akan dibuat pemodelannya dengan menggunakan ruang pengering serta perendaman dan pengeringan. Kasus dari dua proses pelapukan tersebut pada setiap masa sampel dikaji melalui uji triaksial. Uji triaksial ini menggunakan suatu metode tahap berbilang untuk menentukan kekuatan geser residual. Kekuatan ini terbagi kepada dua yaitu kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan. Sebelum dan sesudah setiap pengujian triaxial dilakukan pengamatan sampel secara visual dengan melakukan pengambilan gambar. Setelah pengujian sampel akan hancur dan akan membentuk pola kehancuran dengan bidang runtuhnya. Bidang runtuh ini selalu diamati dengan mengukur sudut kemiringan bidang geser.

Untuk menjawab objektif penelitian yang telah dinyatakan, maka suatu disain dan diagram alir penelitian dibuat supaya penelitian ini tersusun secara sistematis. Pada diagram alir penelitian juga dapat dilihat uji lain yang dilakukan dengan pelbagai analisis metode yang telah dipilih untuk menonjolkan kepentingan penelitian yang bermanfaat bagi ilmu rekayasa geoteknik pada masa akan datang.

### **3.2 Disain dan Diagram Alir Penelitian**

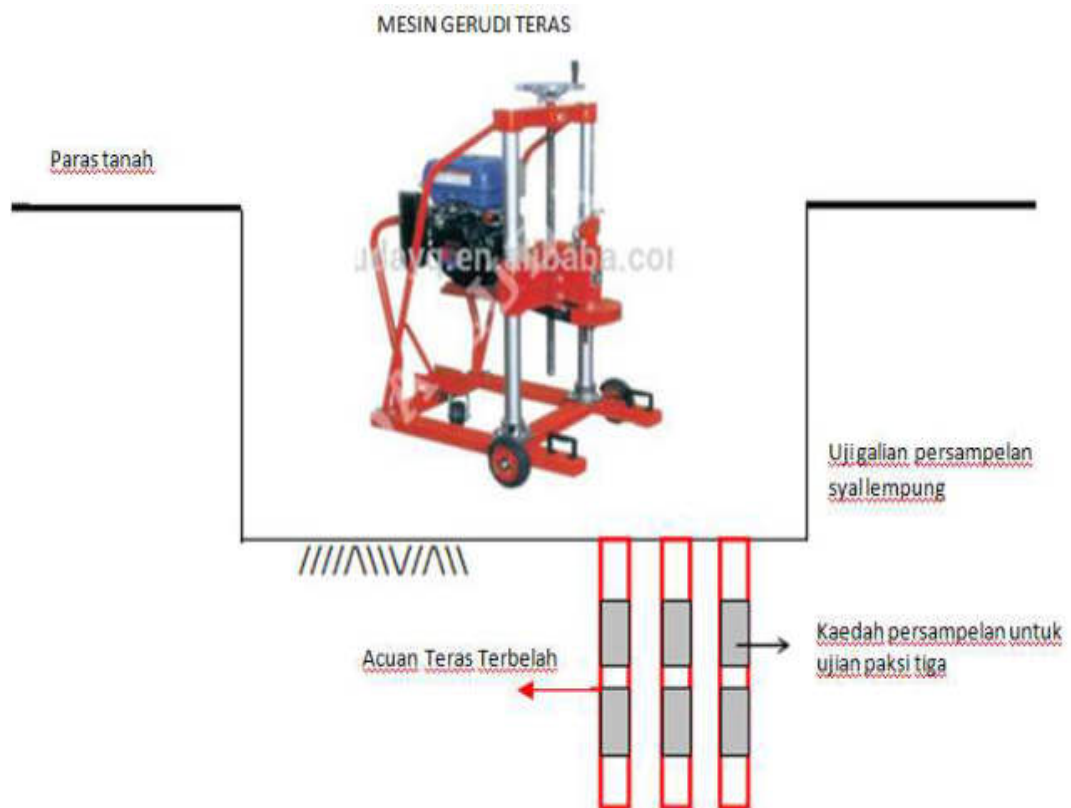
Uji triaksial unconsolidated undrained (*Triaxial UU Test*) dilakukan pada sampel clay shale yang telah melalui dua proses pelapukan pada masa yang telah ditentukan. Analisis data laboratorium dan validasi data dilakukan untuk mendapatkan hasil perubahan kekuatan geser terhadap proses pelapukan serta hubungannya perbandingan hasil pengujian triaxial jenuh dan tak jenuh serta kemiringan bidang keruntuhan sampel. Disain dan diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir kerja penelitian pola keruntuhan uji triaxial clay shale

### 3.3 Metode Persampel Uji Triaksial

Sampel untuk uji triaksial diperoleh dari uji lubang galian (*test pit*) clay shale hingga kedalaman tertentu, dengan memastikan dasar galian clay shale belum mengalami pelapukan. Lubang galian clay shale tersebut berukuran 1.2 m lebar, 2 m panjang dan 1 m dalam. Sampel uji triaksial diperoleh di lapangan dengan melakukan pengeboran menggunakan peralatan mesin gerudi teras, dan menggunakan acuan teras yang boleh terbelah (*split single core barrel*) dengan bit penerasan model terubahsuai. Sampel uji triaksial yang diperoleh adalah berdiameter 37 mm hingga 38 mm dan berketinggian 70 mm hingga 78 mm. Metode persampelan untuk uji triaksial adalah seperti pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



**Gambar 3.2** Metode persampelan tak terganggu pada lapangan untuk uji triaksial di laboratorium



**Gambar 3.3** Pengembangan acuan teras yang boleh terbelah (*split single core barrel*) (a), pelepasan kepala acuan teras (b), hasil sampel clay shale (c), sampel clay shale dibalut plastik hitam (d), sampel clay shale dimasukkan dalam PVC siap dihantar ke laboratorium (e).



### **3.4 Uji Laboratorium Mekanik Tanah**

Semua uji laboratorium dilakukan mengikut standardan ASTM (*American Standard for Testing Material*) dan dilakukan di laboratorium mekanik tanah Geoinves di Jakarta.

#### **3.4.1 Uji Triaksial Unconsolidated Undrained (*UU Triaxial*)**

Uji triaksial unconsolidated undrained berdasarkan standardan ASTM (ASTM D 2850-87, 1989). Uji ini dilakukan pada sampel clay shale dengan proses pelapukan pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan.

#### **3.4.2 Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Serta Siklus Pembasahan dan Pengeringan**

Uji triaksial clay shale yang proses pelapukan dilakukan dengan proses pengeringan adalah uji triaksial unconsolidated undrained. Tiga sampel clay shale diambil untuk setiap keadaan, jenuh dan tak jenuh. Semasa pelapukan dilakukan dengan proses pengeringan, uji triaksial unconsolidated undrained dilakukan bila masa pengeringan tercapai, yaitu pada masa 0, 4, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 64 dan 80 hari. Pada sampel clay shale yang tak jenuh uji terus dilakukan, manakala untuk sampel clay shale yang jenuh, penepuan dilakukan sebelum uji dilaksanakan. Semasa pelapukan dijalankan dengan proses siklus pembasahan dan pengeringan, uji triaksial unconsolidated undrained dilakukan pada masa usia sampel 1 hari setelah pembasahan dan pada hari yang telah ditabelkan. Jumlah contoh clay shale yang dipakai ialah tiga sampel pada tiap-tiap uji.

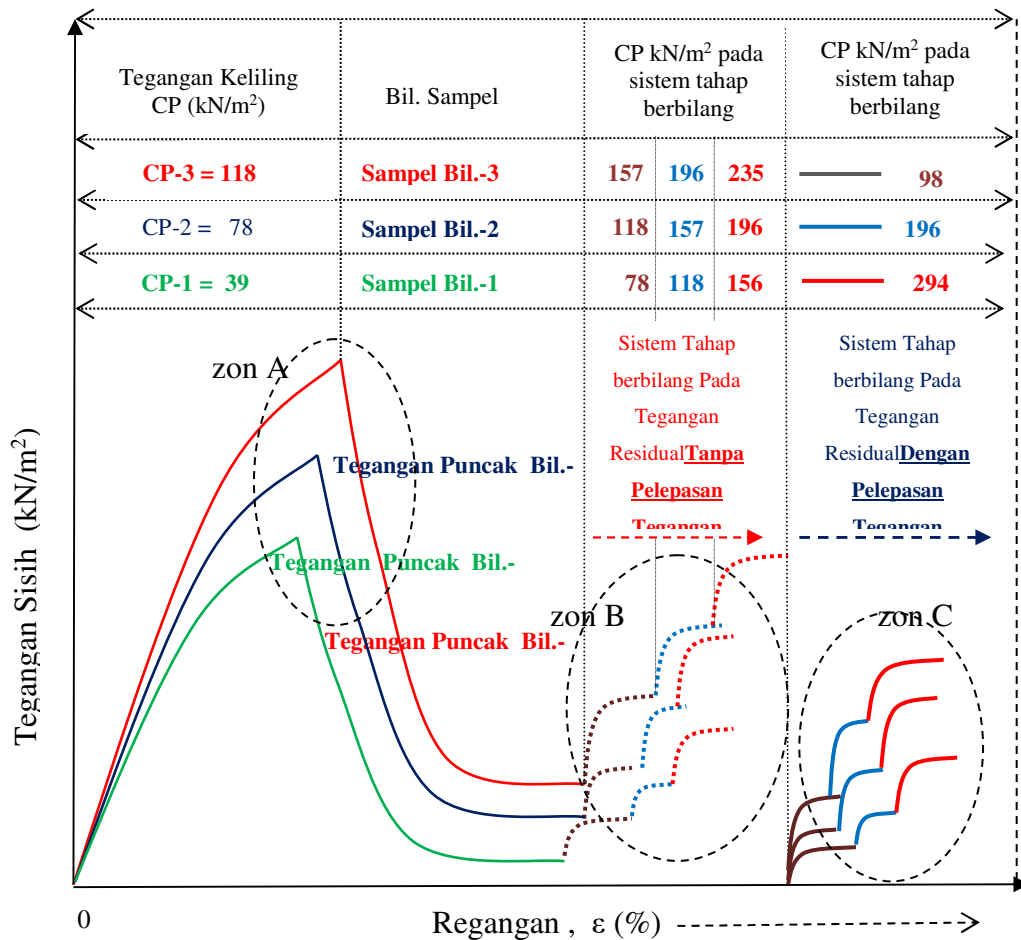
### 3.4.3 Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Clay Shale Tak Jenuh

Setiap sampel clay shale yang tak jenuh dikenakan tegangan keliling yang berbeda. Contohnya clay shale yang pertama diberikan tegangan keliling sebesar CP-1 = 39.2 kN/m<sup>2</sup> sehingga tegangan sisih mencapai tegangan puncak dan dilanjutkan lagi hingga mendapatkan tegangan residualnya. Ketika tegangan sisih stabil pada tegangan residual, uji dihentikan sementara dan dilanjutkan semula dengan menggunakan sistem tahap berbilang (*tahap berbilang system*) yaitu dengan menaikkan tegangan keliling secara bertahap. Tegangan keliling untuk sampel clay shale yang pertama naik daripada CP-1 = 39 kN/m<sup>2</sup> menjadi CP-2 = 78 kN/m<sup>2</sup> hingga tegangan sisih stabil. Kemudian, tegangan keliling ditambah lagi menjadi CP-3 = 118 kN/m<sup>2</sup> hingga akhirnya CP-4 = 157 kN/m<sup>2</sup>.

Perkara serupa diteruskan pada sampel clay shale yang kedua dengan tegangan keliling awal CP-2 adalah 78 kN/m<sup>2</sup> dan sampel clay shale yang ketiga dengan kekuatan tegangan keliling awal CP-3 sebesar 118 kN/m<sup>2</sup>. Tabel tegangan keliling uji triaksial tak jenuh yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.4.

**Tabel 3.1** : Perubahan tegangan keliling pada keadaan awal dan pada keadaan residual dengan sistem tahap berbilang (*multystage system*) pada uji triaksial tak jenuh

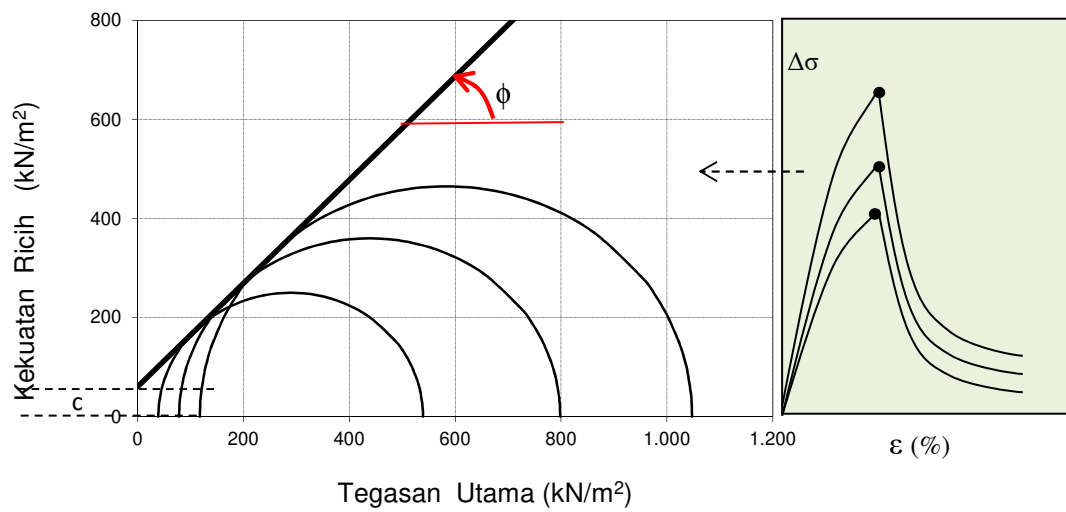
Contoh Uji	Tegangan keliling awal ( kN/m <sup>2</sup> )	Tambahkan Tegangan Keliling dengan Sistem Tahap berbilang , (kN/m <sup>2</sup> )		
		CP-1	CP-2	CP-3
1	39	78	118	157
2	78	118	157	196
3	118	157	196	235



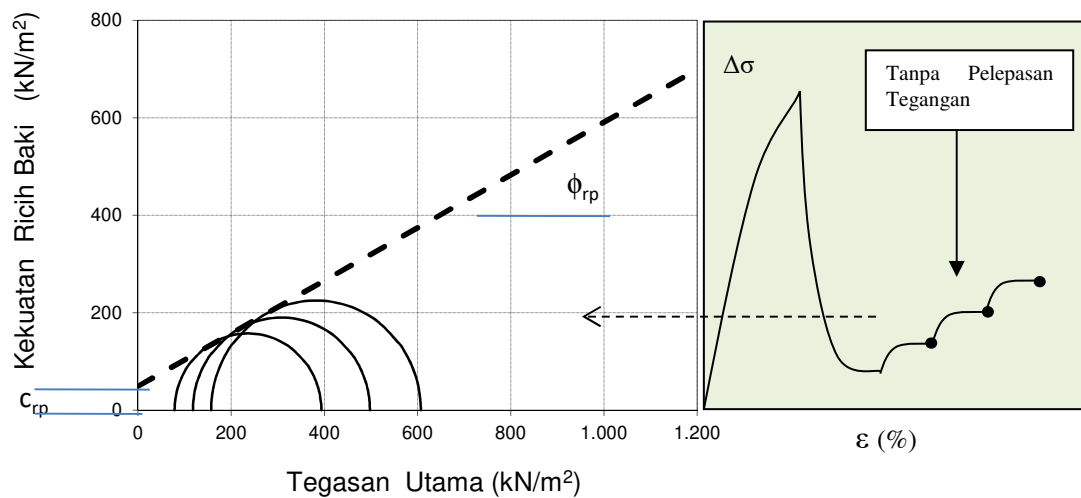
**Gambar 3.4** Tegangan sisih terhadap regangan tiga sampel clay shale pada tegangan keliling CP-1= 39 kN/m<sup>2</sup>, CP-2= 78 kN/m<sup>2</sup> & CP-3= 118 kN/m<sup>2</sup>, yang dilanjutkan dengan sistem tahap berbilang pada keadaan residual

Dari uji triaksial sampel clay shale tak jenuh hubungan tegangan regangan pada keadaan tegangan puncak (zon A) dapat diperolehi. Dilanjutkan hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan (zon B) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan (zon C) adalah seperti pada Gambar 3.4. Parameter kekuatan geser berupa kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) yang diperolehi pada tegangan puncak (zon A), tegangan residual tanpa pelepasan tegangan (zon B) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan (zon C), masing-masing adalah seperti pada Gambar 3.5, 3.6 dan 3.7. Untuk mendapatkan parameter kekuatan geser residual,

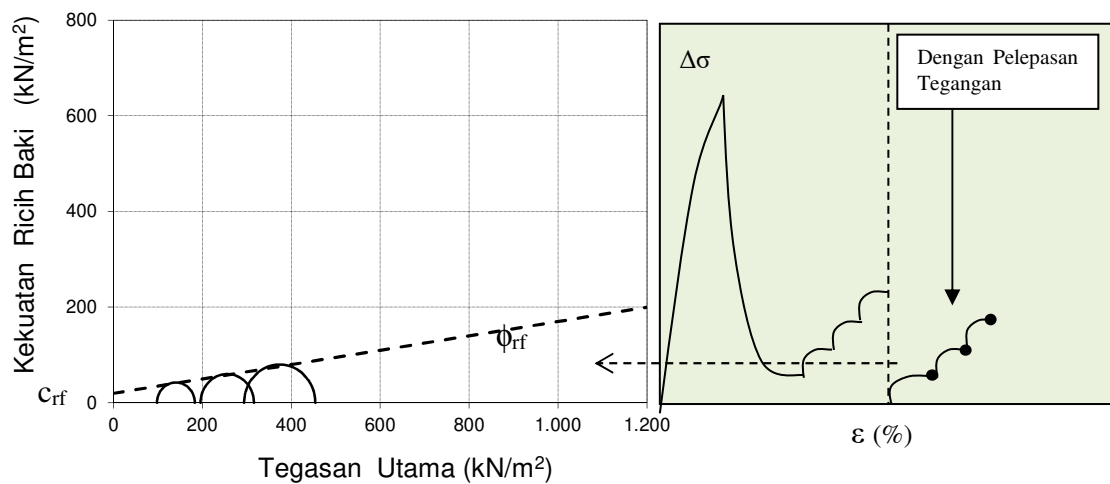
setiap sampel clay shale diuji dengan sistem tahap berbilang dan menghasilkan kohesi residual( $c_r$ ) dan sudut geser dalam residual( $\phi_r$ ) yang unconsolidated undrained.



**Gambar 3.5** Penentuan kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh unconsolidated undrained (UU) pada tegangan puncak



**Gambar 3.6** Penentuan kohesi residual( $c_{rp}$ ) dan sudut geser dalam residual( $\phi_{rp}$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh unconsolidated undrained (UU) pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan



**Gambar 3.7** Penentuan kohesi residual( $c_{rf}$ ) dan sudut geser dalam residual( $\phi_{rf}$ ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh uncossiltated undrained pada tegangan residualdengan pelepasan tegangan

### 3.4.4 Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Sampel Clay Shale Jenuh

Tahap tegangan keliling pada uji sampel clay shale jenuh yang digunakan sama seperti pada sampel tak jenuh, namun sebelum uji dilakukan, sampel clay shale dijenuhkan ketika pengeringan tertentu tercapai melalui penepuan yang sesuai dengan standar ASTM. Semasa uji dilakukan sampel clay shale jenuh itu melalui sistem tahap berbilang sebelum tegangan sisih puncak (*strain hardener*) ataupun pada keadaan tegangan sisih residualtercapai.

Ketika dilakukan tegangan sisih, perubahan tegangan air pori yang terjadi pada sampel clay shale dikaji. Oleh karenanya, hasil yang didapati dari uji sampel clay shale jenuh berupa kekuatan geser pada keadaan kekuatan geser jumlah dan kekuatan geser efektif.

### 3.5 Proses Pelapukan di Laboratorium

Proses pelapukan dilakukan di laboratorium dengan dua proses, yaitu proses pengeringan serta proses pembasahan dan pengeringan.

#### (i) Proses Pengeringan

Semasa pelapukan secara pengeringan dilakukan pada masa 0, 4, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 64 dan 80 hari, pengeringan sampel dilakukan dengan cahaya matahari tetapi terlindung dari air hujan. Pengeringan sampel dilakukan di dalam ruang yang atapnya telus cahaya dan mempunyai peredaran udara yang cukup. Oleh karenanya, cahaya matahari dapat mengeringkan sampel tanah tetapi dilindungi dari air hujan. Ruang pengeringan dapat dilihat pada Gambar 3.8b (Geoinves, 2014).

Selama proses pengeringan dilakukan, perubahan isi sampel sampel tanah diukur dengan alat pengubah isi sampel (*volumetric change*) pada setiap hari. Perubahan isi sampel dapat diukur dengan mengetahui perubahan tinggi dan diameter sampel. Perubahan tersebut diperolehi dengan meletakkan tiga alat pencatat perubahan diameter dan satu alat pencatat perubahan ketinggian sampel tanah seperti pada Gambar 3.8a (Geoinves, 2014).

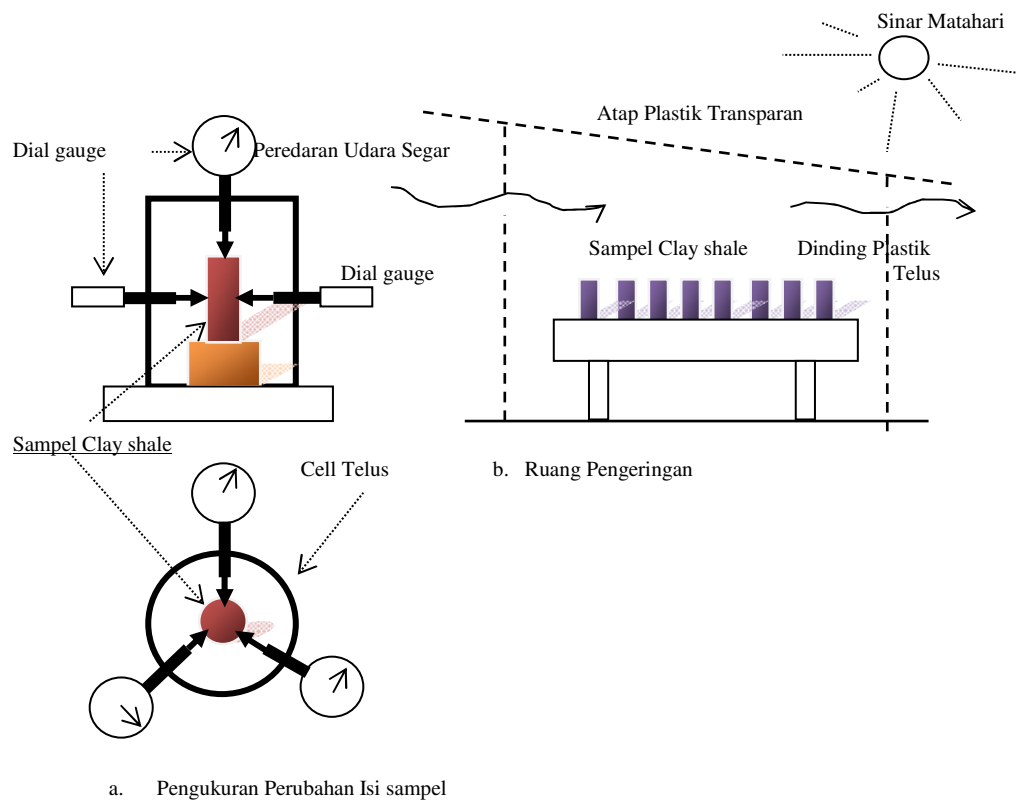
#### (ii) Proses Pembasahan dan Pengeringan

Semasa pelapukan dengan proses pembasahan dan pengeringan semua sampel yang akan diuji perlu melalui pengeringan dan pembasahan secara sekaligus. Metode pengeringan dan pembasahan dilakukan mengikut cara berikut:

- (a) Sampel clay shale terganggu untuk uji agihan ukuran bijian dilakukan pengeringan dan pembasahan dengan perubahan masa pembasahan sekali dalam masa 8 hari pengeringan, 2 kali dalam masa 8 hari pengeringan dan 3 kali dalam masa 8 hari pengeringan. Perubahan ini dilakukan bagi mendapatkan suatu model pengaruh jumlah hujan yang turun dalam masa tertentu terhadap kecepatan pelapukan clay shale. Pembasahan dilakukan dengan hanya merendam sampel dalam air

selama masa 5 menit dan mengeringkannya kembali. Tabel 3.2, 3.3, 3.4 dan 3.5 menunjukkan perubahan pembasahan sehingga 80 hari.

- (b) Pada sampel clay shale tidak terganggu untuk uji triaksial, sampel direndam 2 kali dalam masa 8 hari pengeringan, dan uji triaksial dilakukan pada masa usia sampel 0, 8, 16, 24, 32, 40 hingga 80 hari. Tabel 3.8 menunjukkan disain tabel sampel tak terganggu dengan pengeringan dan pembasahan sehingga 80 hari.



**Gambar 3.8** Uji pengukuran perubahan isi sampel (a) dan ruang pengeringan (b)

**Tabel 3.2 :** Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (1 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)

Uji Laboratorium	Masa (Hari)											
	0	4	8	12	16	diteruskan	72	76	80			
Kadar Air (w)	✓	Rendam 5 min.	✓	Rendam 5 min.	✓	diteruskan	✓	Rendam 5 min.	✓			
Distribusi Ukuran Butiran (GSD)	✓		✓		✓	diteruskan	✓					
Pengukuran Perubahan Isi sampel	✓		✓		✓	✓	diteruskan		✓			

**Tabel 3.3 :** Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (2 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)

Uji Laboratorium	Masa (Hari)														
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	diteruskan ...	72	74	76	78	80
Kadar Air (w)	✓	Rendam 5 min.		Rendam 5 min.	✓	Rendam 5 min.		Rendam 5 min.	✓	diteruskan ...	✓	Rendam 5 min.		Rendam 5 min.	
Distribusi Ukuran Butiran (GSD)	✓				✓				✓	diteruskan ...	✓				
Pengukuran Perubahan Isi sampel	✓				✓				✓	diteruskan ...	✓				

**Table 3.4:** Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (3 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)

Uji Laboratorium	Masa (Hari)														
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	diteruskan ...	72	74	76	78	80
Kadar Air (w)	✓	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	✓	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	✓	diteruskan ...	✓	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	Rendam 5 min.	
Distribusi Ukuran Butiran (GSD)	✓				✓				✓	diteruskan ...	✓				
Pengukuran Perubahan Isi sampel	✓				✓				✓	diteruskan ...	✓				



**Tabel 3.5 :** Tabel uji triaksial pada clay shale dengan pembasahan dan pengeringan dengan 2 kali rendam/ 8 hari, hingga masa 40 hari

Hari		
Uji Triaksial 0 hari	Pengeringan	Hari ke 0 ~ 2
	Rendam 5 min	Hari ke 2
	Pengeringan	Hari ke 2 ~ 6
	Rendam 5 min	Hari ke 6
Uji Triaksial 8 hari	Pengeringan	Hari ke 6 ~ 10
	Rendam 5 min	Hari ke 10
	Pengeringan	Hari ke 10 ~ 14
	Rendam 5 min	Hari ke 14
Uji Triaksial 16 hari	Pengeringan	Hari ke 14 ~ 18
	Rendam 5 min	Hari ke 18
	Pengeringan	Hari ke 18 ~ 22
	Rendam 5 min	Hari ke 22
Uji Triaksial 24 hari	Pengeringan	Hari ke 22 ~ 26
	Rendam 5 min	Hari ke 26
	Pengeringan	Hari ke 26 ~ 30
	Rendam 5 min	Hari ke 30
Uji Triaksial 32 hari	Pengeringan	Hari ke 30 ~ 34
	Rendam 5 min	Hari ke 34
	Pengeringan	Hari ke 34 ~ 38
	Rendam 5 min	Hari ke 38
Uji Triaksial 40 hari	Pengeringan	Hari ke 40

### 3.6 Jenis dan Lokasi Laboratorium Penguji

Tabel 3.6 di bawah ini menerangkan jenis-jenis uji dan lokasi laboratorium untuk uji tersebut. Semua persiapan peralatan laboratorium dan uji lapangan dimasukkan di dalam Lampiran A.

**Tabel 3.6 :** Jenis pengujian dan lokasi laboratorium

Bil.	Jenis uji	Tempat laboratorium uji
1	Kadar air, sifat indeks, batas Atterberg, berat tentu, distribusi ukuran butiran	Laboratorium mekanika tanah GEOINVES, Jakarta
2	Uji triaksial (tak jenuh dan jenuh)	Laboratorium mekanika tanah GEOINVES, Jakarta
3	Proses pengeringan dan pengeringan pembasahan	Laboratorium mekanika tanah GEOINVES, Jakarta
4	Uji perubahan isi sampel pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan	Laboratorium mekanika tanah GEOINVES, Jakarta

### 3.7 Uji Pendahuluan di Laboratorium

Uji pendahuluan di laboratorium dari sampel tidak terganggu dan terganggu meliputi uji sifat-sifat indeks, fisik dan mekanik menggunakan uji triaksial. Uji tersebut dilakukan di laboratorium mekanik tanah seperti pada Gambar 3.9. Uji mineralogi dengan *X-Ray Diffraction* dan SEM clay shale untuk mengetahui jenis mineral, komposisinya serta gambar mikrolingkupik dilakukan di laboratorium mineralogi. Jenis uji awal di laboratorium yang dilakukan pada clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang dapat dilihat pada Table 3.7.



**Gambar 3.9** Uji di laboratorium mekanik tanah Geoinves di Jakarta (Geoinves, 2014)

**Table 3.7** : Jenis uji awal di laboratorium clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang

Jenis Uji		Semarang-Bawen	Hambalang
<b>Sifat fisik</b>			
	Distribusi ukuran butiran ( <i>soil distribution</i> )		
	Pasir	✓	✓
	Lanau	✓	✓
	Lempung	✓	✓
<b>Sifat mekanik</b>			
	Kekuatan Geser	✓	✓
	Kohesi jumlah dan efektif	✓	✓
	Sudut geser dalam jumlah dan efektif	✓	✓
	Kohesi unconsolidated undrained residual tanpa pelepasan tegangan (jumlah)	✓	✓
	Kohesi unconsolidated undrained residual tanpa pelepasan tegangan (efektif)	✓	✓
	Sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (jumlah)	✓	✓
	Sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (efektif)	✓	✓

Keterangan : ✓, diuji

**Table 3.8** : Hasil uji batas Atterberg clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang

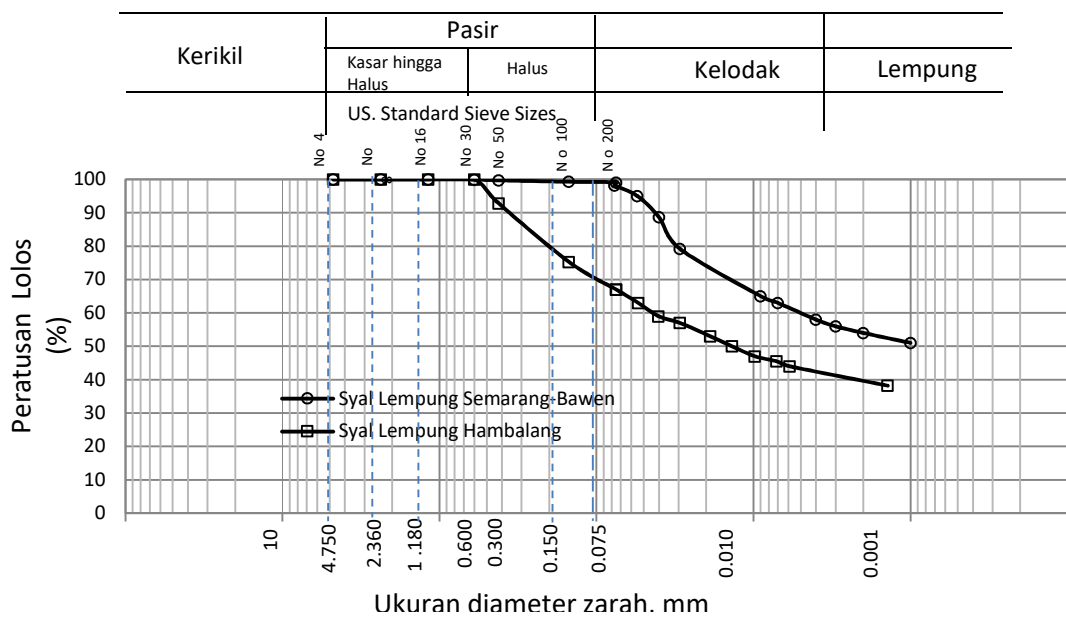
Bil.	Lokasi Clay shale	Batas cecair (LL)	Batas plastik (PL)	Indeks keplastikan (PI)
1	Semarang-Bawen	59.12	29.89	29.23
2	Hambalang	25.12	14.12	11.00

**Gambar 3.10** Hasil sampel tak terganggu clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang di dalam ruang pengeringan

### 3.7.1 Sifat Fisik

Dari uji sifat fisik clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang yang dilakukan dengan uji analisis ayakan dan hidrometer, diperoleh bahwa analisis kuantitatifnya berbeda. Kadar pasir pada clay shale Hambalang adalah 33% lebih

besar dari kadar pasir clay shale Semarang-Bawen sebanyak 0.92%. Manakala kadar lanau dan lempung dari clay shale Semarang-Bawen lebih besar bila berbanding dengan clay shale Hambalang. Dari kedua clay shale ini, clay shale Semarang-Bawen didominasi oleh butiran halus sebanyak 99.1%, manakala clay shale Hambalang 67%. Oleh karena komposisi dan sifat fisik kedua clay shale ini berbeda maka sifat dan perilaku juga adalah berbeda apabila clay shale terpelapukan. Hasil uji sifat fisik clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang dapat dilihat pada Gambar 3.11, manakala pada Table 3.9 terdapat ringkasan hasil uji sifat indeks dan sifat fisik clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang.



**Gambar 3.11** Distribusi ukuran butiran clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang

**Table 3.9** : Hasil uji sifat fisik clay shale Semarang- Bawen dan Hambalang

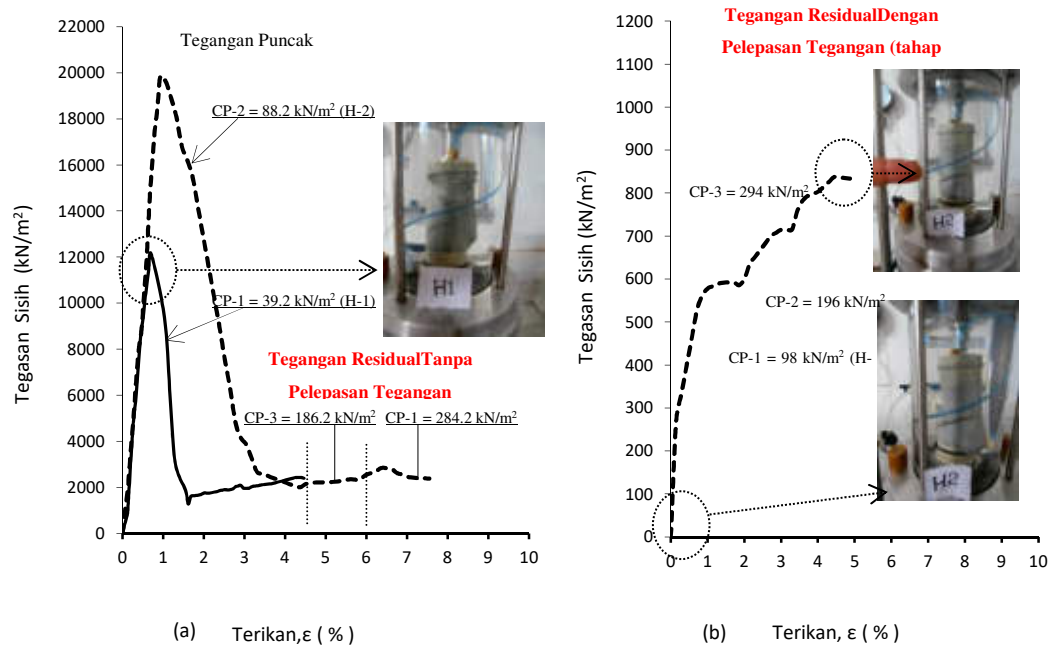
No.	Parameter	Simbol	Semarang-Bawen	Hambalang	Unit
			Nilai	Nilai	
1	Taguran ukuran butiran ( <i>soil distribution</i> )				
	Pasir		0.92	32.98	%
	Lanau		45.08	27.02	%
	Lempung		54	40.00	%

### **3.7.2 Sifat Mekanik Dengan Uji Triaksial Unconsolidated Undrained (UU)**

Uji triaksial dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan parameter kekuatan geser berupa kohesi dan sudut geser dalam. Parameter kekuatan geser diperoleh pada keadaan tegangan puncak dan tegangan residual pada sampel clay shale tak jenuh dan jenuh, sehingga diperoleh kekuatan geser jumlah dan kekuatan geser efektif dari uji ini. Manakala kekuatan geser residual dilakukan dengan metode tahap berbilang pada keadaan tegangan tanpa pelepasan tegangan yang dilanjutkan dengan pelepasan tegangan.

#### **3.7.2.1 Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Clay Shale Tak Jenuh**

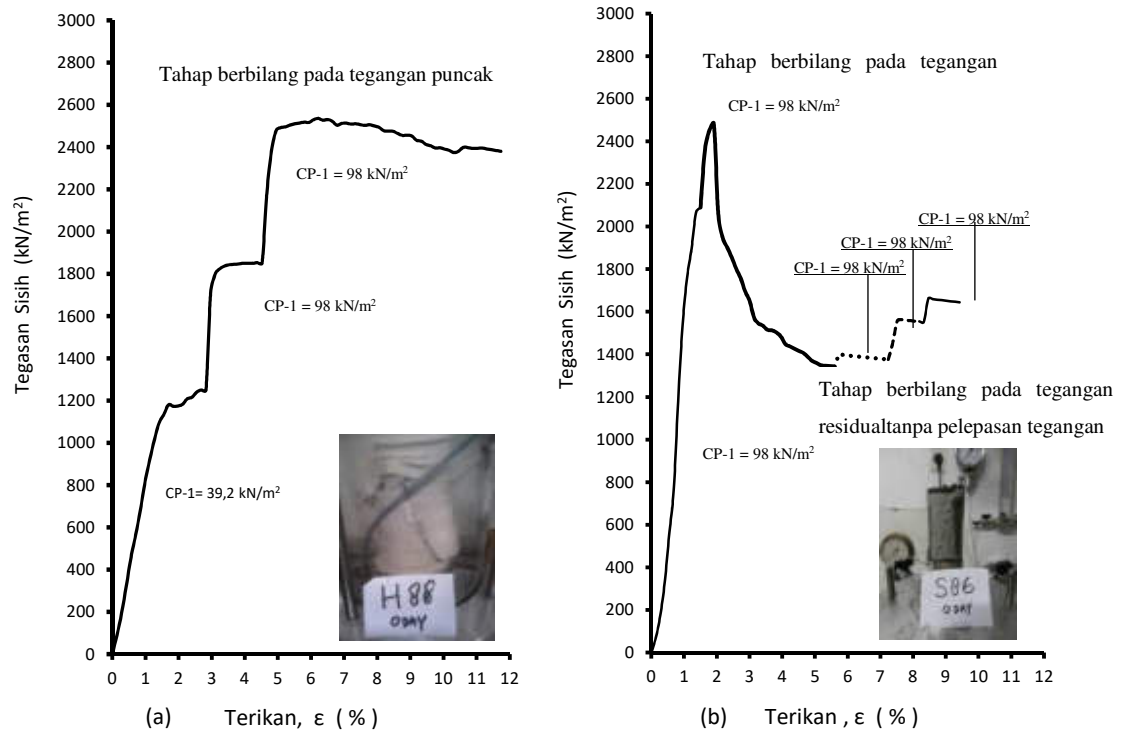
Clay shale yang sering juga diistilahkan sebagai batuan lempung adalah bahan batuan yang terdiri daripada mineral lempung. Dengan demikian perilaku tegangan regangan uji triaksial menyerupai tegangan regangan batuan pada umumnya. Pada uji triaksial atau uji lainnya, batuan memiliki kekuatan lebih daripada tanah lainnya sehingga pada tegangan keliling yang kecil akan menghasilkan tegangan sisih yang tinggi. Hasil tegangan regangan clay shale dari uji triaksial pada peringkat awal pada keadaan tegangan puncak, tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dapat dilihat pada Gambar 3.12(a). Manakala tegangan residual dengan pelepasan tegangan dapat dilihat pada Gambar 3.12(b).



**Gambar 3.12** Perilaku tegangan regangan dari uji triaksial mula-mula dengan tahap berbilang pada tegangan residual. (a) Pada keadaan tegangan puncak dan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan Sampel H-1, H-2 dan (b) pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan Sampel H-2

### 3.7.2.2 Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Dengan Metode Tahap Berbilang

Metode tahap berbilang pada uji triaksial biasanya dilakukan untuk menjimatkan penggunaan sampel. Dengan hanya satu sampel tiga nilai tegangan sisih maksimum boleh diperolehi pada setiap tegangan keliling yang digunakan. Dengan demikian untuk menentukan kohesi dan sudut geser dalam, tiga lingkaran Mohr akan diperolehi. Dalam penelitian ini hasil kekuatan geser diperolehi daripada dua standar uji triaksial, yaitu dengan standar uji triaksial dengan minimum 2 sampel yang dipakai atau dengan standar uji triaksial metode tahap berbilang. Contoh hasil uji triaksial dengan metode tahap berbilang dapat dilihat pada Gambar 3.13.



**Gambar 3.13** (a) Tegangan regangan pada uji triaksial tahap berbilang clay shale Hambalang (H-88) pada keadaan tegangan puncak dengan tahap berbilang dan (b) pada clay shale Semarang-Bawen (S-86) pada keadaan puncak dan keadaan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan

### 3.7.2.3 Kekuatan Geser Pada Clay Shale Tak Jenuh

Perkara yang utama dalam penelitian adalah mengenai sifat mekanik dari clay shale, karena sifat ini adalah menjadi penyebab utama keruntuhan pada lereng. Uji triaksial unconsolidated undrained dilakukan untuk mendapatkan nilai sebenar dari kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) pada sampel tak terganggu clay shale tak jenuh dan jenuh.

Kekuatan geser ( $c$  dan  $\phi$ ) yang diperoleh dalam uji triaksial unconsolidated undrained ini, didapat pada keadaan tegangan puncak, serta pada tegangan residual. Pada tegangan residual dibezakan pula antara kekuatan geser pada keadaan tanpa

pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan. Nilai kekuatan geser pada clay shale yang jenuh, juga diperoleh pada keadaan tegangan jumlah dan tegangan efektif.

Hasil uji awal dari clay shale yang belum terpelapukan menunjukkan bahwa kekuatan geser clay shale tak jenuh pada tegangan puncak sangat besar, kohesi ( $c$ ) clay shale Hambalang adalah  $450 \text{ kN/m}^2$  dan Semarang-Bawen adalah  $700 \text{ kN/m}^2$ . Manakala sudut geser ( $\phi$ ) dalam clay shale Hambalang adalah  $78.4^\circ$  dan Semarang-Bawen adalah  $59.4^\circ$ . Nilai kekuatan geser tak jenuh pada tegangan puncak ( $c$  dan  $\phi$ ) akan menurun pada keadaan tegangan residualtanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$  dan  $\phi_{rp}$ ). Dan pada keadaan tegangan residualdengan pelepasan tegangan, kekuatan geser ini akan semakin berkurang nilainya ( $c_{rf}$  dan  $\phi_{rf}$ ).

#### 3.7.2.4 Kekuatan Geser Pada Clay Shale Jenuh

Pada uji awal dengan keadaan sampel clay shale jenuh, maka hasil kekuatan geser yang diperolehi adalah lebih kecil dibandingkan dengan clay shale yang tak jenuh. Pada clay shale Hambalang, kohesi pada keadaan tegangan jumlah adalah  $195 \text{ kN/m}^2$ , manakala pada keadaan tegangan efektif adalah  $190 \text{ kN/m}^2$ . Kemudian pada clay shale Semarang-Bawen, kohesi pada keadaan tegangan jumlah sama besar dengan keadaan tegangan efektif yaitu  $300 \text{ kN/m}^2$ .

Pengurangan kekuatan geser clay shale pada keadaan jenuh serupa dengan clay shale tak jenuh. Namun setiap uji dilakukan untuk memperolehi hasil kekuatan geser pada keadaan tegangan jumlah dan tegangan efektif. Tegangan efektif diperoleh dengan mengurangkan tegangan jumlah ( $\sigma_{tot}$ ) dengan tegangan air pori ( $u$ ), seperti Persaman 4.4 berikut.

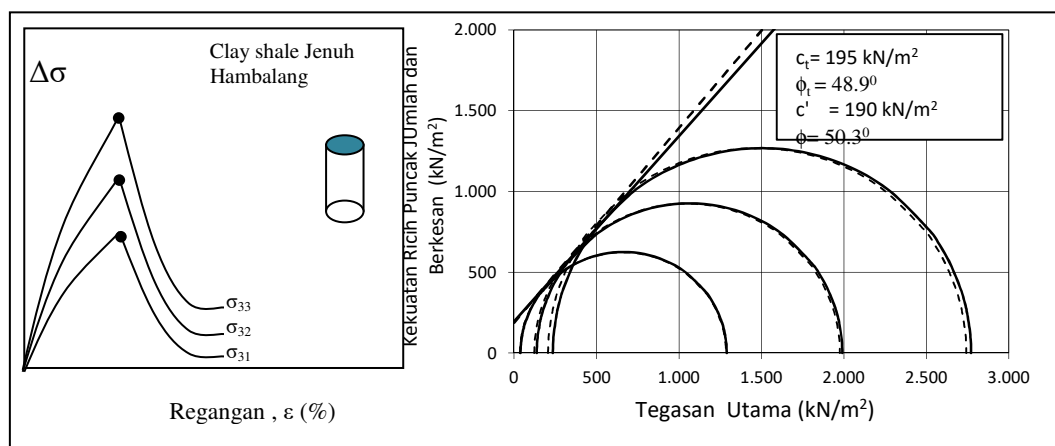
$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - u \quad (4.4)$$

Tegangan jumlah dan tegangan efektif dihitung dalam tegangan sisih dan tegangan keliling untuk menentukan kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) dengan menggunakan gambar *Mohr-Coulomb*.

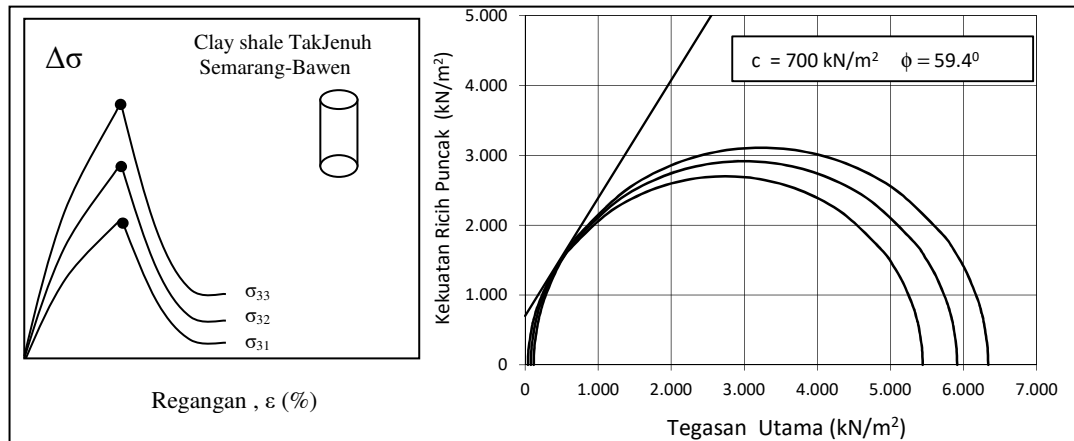


Tegangan air pori ( $u$ ) pada clay shale yang terjadi pada uji triaksial semasa pembebanan dilakukan setelah sampel terlebih dahulu dalam keadaan jenuh, menunjukkan hasil yang tidak terlalu signifikan perubahan tegangan air porinya. Ini terjadi kerana sifat indeks dari clay shale sangat berbeda sekali dengan lempung lainnya. Berat isi dari clay shale adalah besar, seperti batuan pada umumnya. Manakala angka pori ( $e$ ) sangat kecil, sehingga air sukar untuk meresap pada clay shale ini. Penepuan sampel clay shale dilakukan mengikut standardan *American Standard for Testing Material (ASTM)* yang memerlukan masa penepuan hingga 4 hari. Hal ini sangat berbeda sekali jika dibandingkan dengan lempung lainnya melalui metode ASTM yang hanya memerlukan masa maksimum 24 jam.

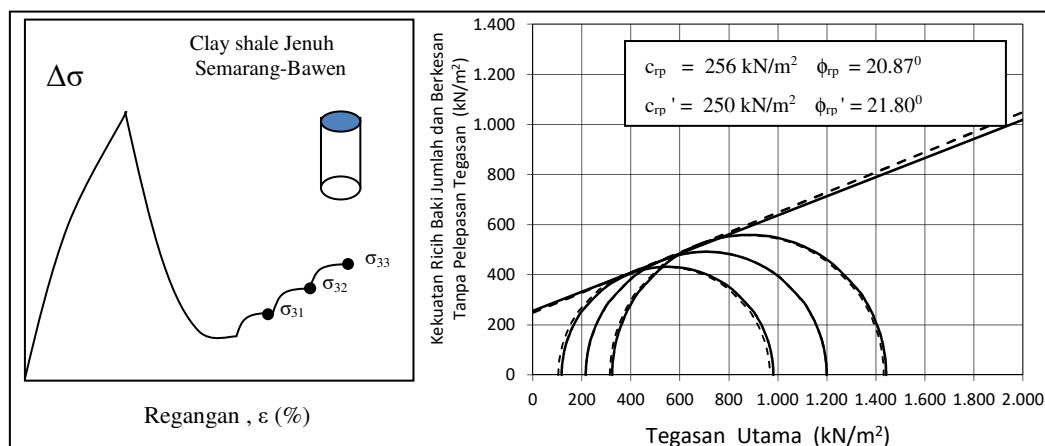
Hasil kekuatan geser residual clay shale pada keadaan asal yang diperoleh dari tegangan jumlah atau pun tegangan efektif telah diperoleh melalui metode tanpa pelepasan tegangan dan dengan perlepasan tegangan. Kekuatan geser residual dengan perlepasan tegangan lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan geser residual tanpa perlepasan tegangan. Oleh kerana keadaan perubahan tegangan air pori tidak terlalu mempengaruhi uji triaksial clay shale jenuh, dan kekuatan geser yang dihasilkan tidak mempunyai perbezaan yang signifikan. Hasil gambar *Mohr-Coulomb* dari uji triaksial dapat dilihat pada Gambar 3.14, Gambar 3.15, Gambar 3.16 dan Gambar 3.17.



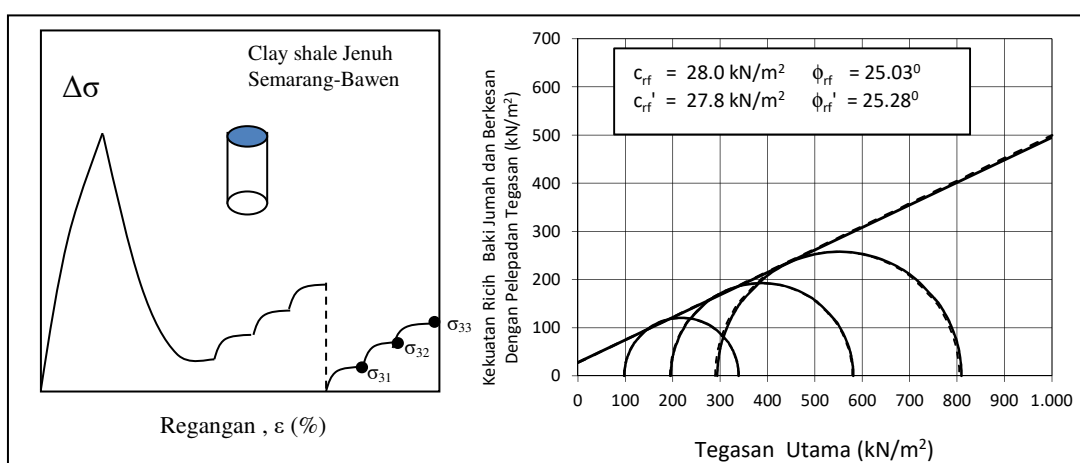
**Gambar 3.14** Gambar Mohr-Coloumb clay shale Hambalang mula-mula (H-88), sampel jenuh pada tegangan puncak dan efektif dengan uji triaksial tahap berbilang



**Gambar 3.15** Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-37, S-38, S-39), sampel tak jenuh pada tegangan puncak



**Gambar 3.16** Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan



**Gambar 3.17** Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan dengan uji tahap berbilang triaksial

### 3.8 Perilaku Bidang Keruntuhan

Perilaku bidang keruntuhan clay shale Semarang-Bawen pada keadaan tak jenuh dengan jelas dilihat perubahannya pada masa asal dan setelah uji selesai dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.18 dan Gambar 3.19

Sampel S-37, S-38 dan S-39 adalah sampel mula-mula clay shale Semarang-Bawen sebelum dilakukan proses pelapukan. Pada Gambar 3.18 kelihatan seluruh sampel dalam keadaan segar dan lunak. Setelah dilakukan uji triaksial ketiga sampel tak jenuh tersebut mengalami keruntuhan dan membentuk bidang keruntuhan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.19. Adakalanya bidang keruntuhan berupa satu garis yang membentuk sudut pada arah mendatar, tetapi adakalanya bidang keruntuhan yang terbentuk lebih dari satu garis dengan berbagai magnitud sudut yang terjadi seperti yang dilihat pada S-38 dan S-39 dalam Gambar 3.19.



**Gambar 3.18** Sampel S-37, S-38 dan S-39 pada keadaan asal sebelum uji



**Gambar 3.19** Gambar bidang keruntuhan S-37, S-38 dan S-39 setelah uji triaksial terjadi

## **BAB 4**

### **PENGARUH PELAPUKAN SYAL LEMPUNG TERHADAP KEKUATAN GESER DAN BIDANG KERUNTUHAN**

#### **4.1 Pendahuluan**

Perubahan kekuatan geser pada tegangan puncak akibat proses pengeringan hingga hari ke-80 telah dilakukan pada keadaan awal sampel yang berbeda, yaitu pada sampel tak jenuh dan sampel jenuh. Dan pada sampel jenuh diperoleh kekuatan geser pada tegangan jumlah dan tegangan efektif. Pada bagian ini perubahan kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) pada tegangan puncak terhadap waktu pengeringan hingga hari ke-80 dibahas. Perkara yang paling penting dalam penelitian ini adalah menentukan kekuatan geser residual clay shale di laboratorium akibat pelapukan. Secara teorinya, kekuatan geser residual diperoleh dari graf tegangan regangan setelah melewati tegangan puncaknya, dan mencapai suatu garis yang asimtot. Pada sampel dan tegangan keliling yang berbeda, tegangan residual ini dapat ditentukan kekuatan geser residual daripada graf lingkaran Mohr.

Untuk mengurangi kasus perbedaan sifat fisik sampel masing-masing, maka uji triaksial dengan tahap berbilang adalah merupakan penyelesaiannya. Tiga lingkaran Mohr dapat dibuat dalam menentukan kekuatan geser dengan hanya menggunakan satu sampel saja (Anderson, 1974; Ho dan Fredlund, 1982; Hormdeed *et al.*, 2012; Kim, 1979; Ravi *et al.*, 2011; Scuhanics dan Debreczeni, 2013). Uji di laboratorium untuk menentukan kekuatan geser dengan uji geser langsung juga

merupakan penyelesaian untuk memperoleh kekuatan geser pada tanah pasir (Gullic, 1970; Nam, 2011) serta dilakukan juga pada joint batuan pasir (Gu *et al.*, 2003). Pada penelitian ini telah dilakukan uji triaksial dengan sistem tahap berbilang, khususnya dalam menentukan kekuatan geser residual. Ini dilakukan setelah graf tegangan regangan telah mencapai keadaan residual. Tahap kenaikan tegangan keliling diberikan secara bertahap untuk memperoleh tegangan puncak residual pada setiap tegangan keliling. Metode ini telah dilakukan pada clay shale tak jenuh dan jenuh. Metode uji kekuatan geser residual pada keadaan seperti ini disebut kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan, karena tegangan keliling terus ditambahkan dan bacaan kenaikan tegangan dilanjutkan. Manakala setelah uji pada tegangan keliling yang ketiga selesai dilakukan, semua tegangan keliling dihapuskan. Kemudian uji tiga paksi dilanjutkan kembali dengan memberikan tegangan keliling secara bertahap untuk menentukan kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan.

Dengan adanya joint pada batuan yang bermacam orientasi pada clay shale akibat peristiwa pelapukan, maka ini menyebabkan perilaku tegangan regangan yang berbeda antara clay shale dengan lempung lainnya. Jika clay shale memiliki perilaku seperti batuan, maka perilaku tegangan regangan juga adalah sama dengan batuan. Perkara ini terjadi pada perilaku tegangan regangan pada keadaan tegangan residual. Oleh yang demikian orientasi joint pada batuan akan menentukan tegangan puncak dan tegangan residual dalam menetapkan kekuatan geser puncak dan kekuatan geser residual (Kulatilake *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2016).

#### **4.2 Perbedaan Perilaku Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Dari Tegangan Puncak Hingga Tegangan Residual Akibat Proses Pengeringan**

Perubahan perilaku pengurangan kekuatan geser clay shale akibat proses pengeringan secara sendiri dan terpisah antara tegangan jumlah, tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan telah dibahas. Pada bagian ini pembahasan adalah mengenai perubahan kekuatan geser dari keadaan tegangan puncak hingga tegangan residual dalam satu graf. Perubahan yang dimaksudkan ialah magnitud pengurangan kekuatan geser residual tanpa

pelepasan tegangan dan kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan terhadap kekuatan geser pada tegangan puncak.

Pengurangan kekuatan geser residual dihitung pada waktu asal sebelum terjadi pelapukan yang dibandingkan kepada kekuatan geser pada tegangan puncak asal sebelum terjadi pelapukan. Nilai keseluruhan diperkirakan dalam peratus pengurangan kekuatan geser yang diperolehi daripada data perubahan kekuatan geser pada Lampiran B.

#### **4.2.1 Clay Shale Tak Jenuh**

Secara umumnya, perilaku kekuatan geser daripada tegangan puncak kepada tegangan residual jangkaku berkurang. Perkara serupa terjadi pada kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan kepada kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan. Besarnya pengurangan ini secara kuantitatif sangatlah diperlukan sebagai rujukan dalam menentukan kekuatan geser residual sebagai sumbangan penelitian dalam kerja pedisain geoteknikal.

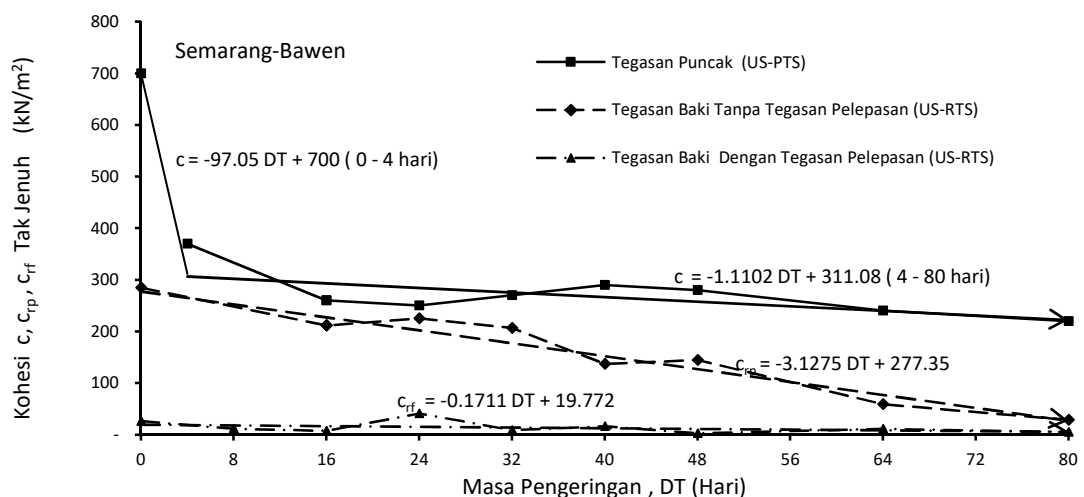
Pada clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, kohesi pada tegangan puncak rata-rata ( $c$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $700 \text{ kN/m}^2$ . Manakala pada asal kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) adalah  $285 \text{ kN/m}^2$  atau  $40.71\%$ . Sementara kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) bernilai  $26.7 \text{ kN/m}^2$  atau  $3.81\%$  dari keadaan asal kohesi pada tegangan puncak.

Apabila pengurangan kohesi residual clay shale tak jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) adalah  $29 \text{ kN/m}^2$  atau  $4.1\%$ . Sementara pada hari ke-80 kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) sebesar  $5 \text{ kN/m}^2$  atau  $0.7\%$  dari keadaan asal kohesi pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) dan tegangan residual

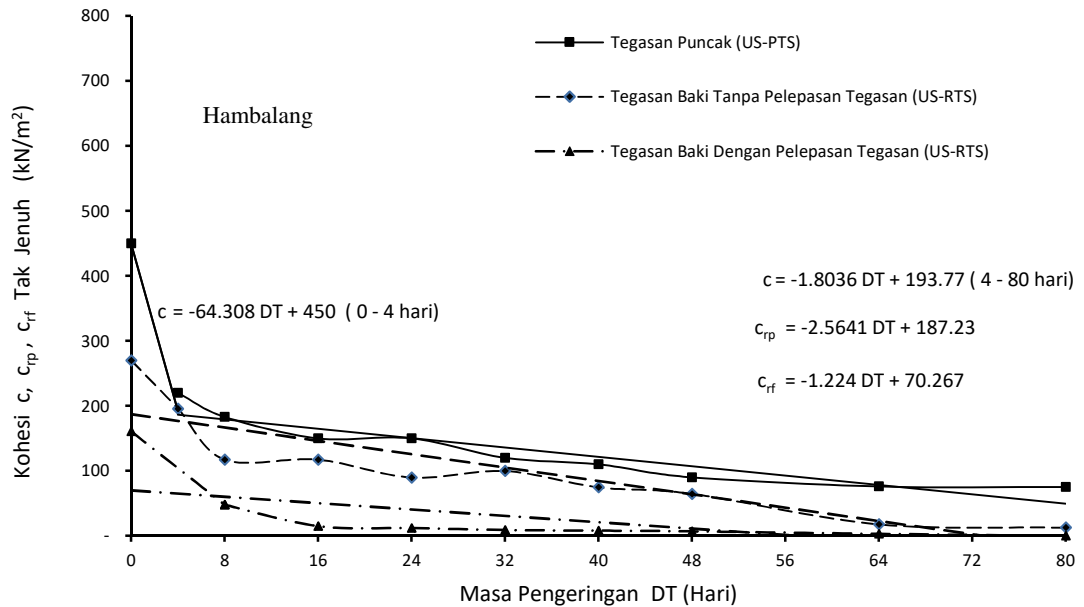
dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Pada clay shale tak jenuh Hambalang, kohesi pada tegangan puncak rata-rata ( $c$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $450 \text{ kN/m}^2$ . Manakala pada nilai asal kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) adalah  $270 \text{ kN/m}^2$  atau  $40\%$ . Sementara kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) bernilai  $161 \text{ kN/m}^2$  atau  $35.8\%$  dari keadaan asal kohesi pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual clay shale tak jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) adalah  $13 \text{ kN/m}^2$  atau  $2.9\%$ . Sementara pada hari ke-80 kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) bernilai  $0 \text{ kN/m}^2$  atau  $0\%$  dari keadaan asal kohesi pada tegangan puncak atau tidak memiliki kohesi. Sementara pada tempoh hari ke 64 pengeringan masih memiliki kohesi residual bernilai  $3 \text{ kN/m}^2$ .

Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.2. Gambar tersebut mempunyai persamaan garis regresi yang merupakan fungsi antara kohesi yang berkenaan dengan waktu pengeringan ( $DT$ ).



**Gambar 4.1** Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh clay shale Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual ( $c_{rp}$  dan  $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan



**Gambar 4.2** Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual ( $c_{rp}$  dan  $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan

Pada clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam pada tegangan puncak rata-rata ( $\phi$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan sebesar  $59.4^\circ$ . Manakala sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) adalah  $46^\circ$  atau  $77.8\%$  dari sudut geser dalam pada tegangan puncak. Sementara sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) adalah  $23.5^\circ$  atau  $39.6\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam pada tegangan puncak.

Apabila pengurangan sudut geser dalam residual clay shale tak jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) adalah  $8.9^\circ$  atau selebihnya tinggal  $15\%$ . Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) adalah  $3.1 \text{ kN/m}^2$  atau selebihnya tinggal  $5.2\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



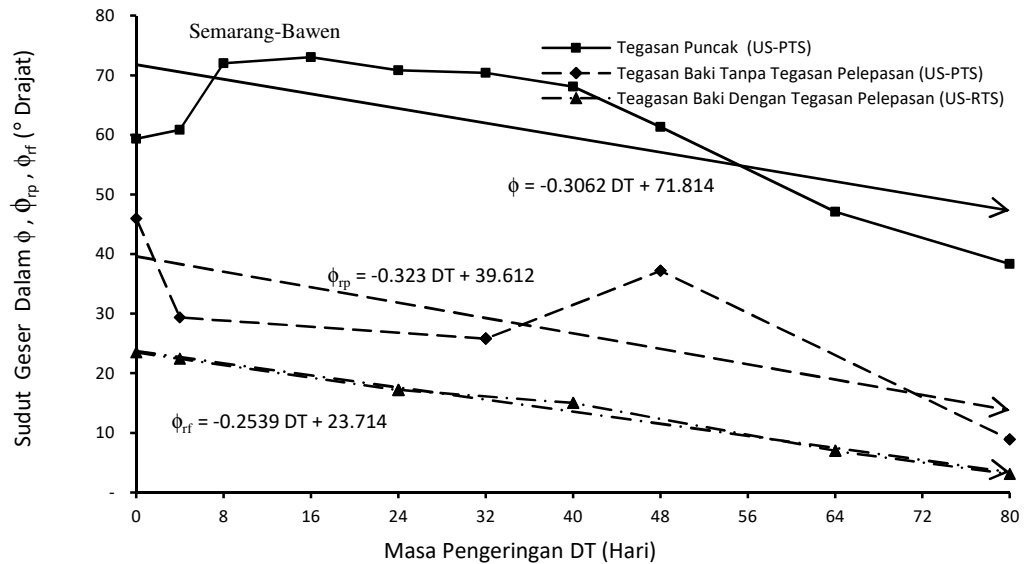
Pada clay shale tak jenuh Hambalang, sudut geser dalam pada tegangan puncak rata-rata ( $\phi$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $78.4^\circ$ . Manakala pada keadaan asal sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) adalah  $45^\circ$  atau  $57.4\%$  dari sudut geser dalam pada tegangan puncak. Sementara sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) adalah  $22^\circ$  atau  $28.1\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam pada tegangan puncak. Apabila pengurangan sudut geser dalam residual clay shale tak jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) adalah  $12.9^\circ$  atau  $16.5\%$ . Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) adalah  $6.1^\circ$  atau  $7.9\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam pada tegangan puncak atau tidak memiliki sudut geser dalam langsung.

Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada gambar tersebut juga terkandung persamaan garis regresi yang merupakan fungsi antara sudut geser dalam yang berkenaan dengan waktu pengeringan (DT).

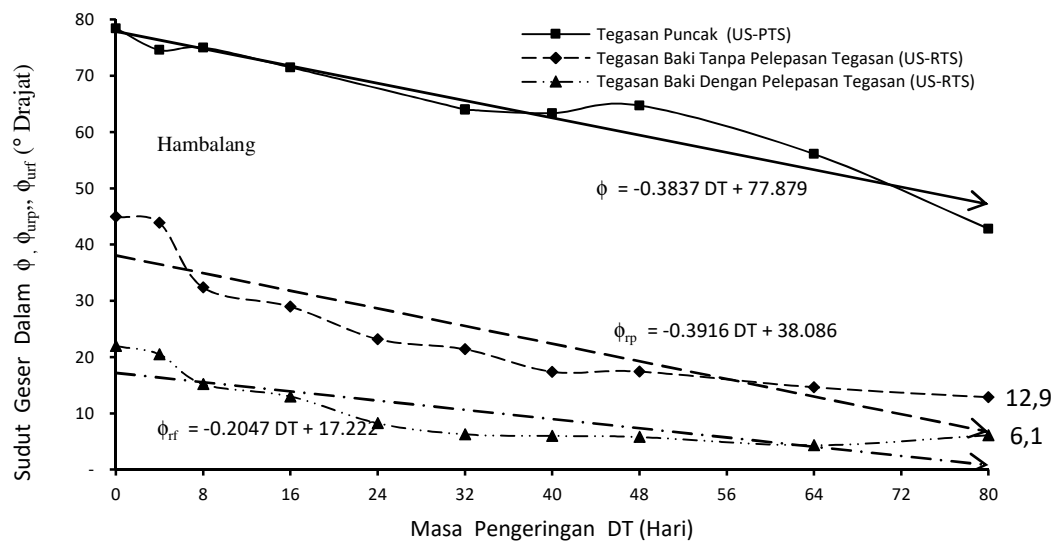
Penelitian terdahulu mengenai pengurangan kekuatan geser telah dilakukan pada pekerjaan galian clay shale formasi The Keuper. Kohesi (c) pada clay shale asal gred I adalah 90 kPa dan berkurangan akibat proses pelapukan. Sehingga pada gred ke-IV menjadi 52 kPa atau  $57.8\%$ . Manakala pada keadaan tegangan residual kohesi menjadi 0 kPa atau  $0\%$  (tidak berkohesi). Sudut geser dalam asal bernilai  $41^\circ$  berkurang pada gred ke-IV menjadi  $26^\circ$  atau  $3.4\%$ . Manakala pada keadaan tegangan residual sudut geser dalam ( $\phi_r$ ) bernilai  $9^\circ$  atau  $22\%$ . Perubahan kekuatan geser ini dapat dilihat pada Gambar 2.12 (Gartung, 1986).

Laporan penelitian perubahan kekuatan geser residual pada beberapa batuan lempung Fron Range Colorado (Dewoolkar dan Robert, 2005), bahwa sudut geser dalam residual berhubungan dengan tegangan normal efektif, batas cecair (LL) serta indeks keplastikan (PI). Sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) adalah  $30^\circ$  berkurang hingga

5.5°. Berkurangnya sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) ini terjadi antara rentang tegangan normal efektif 30 kPa hingga 960 kPa, atau LL antara 30% hingga 100% dan PI antara 5% hingga 60% (Dewoolkar dan Robert, 2005).



**Gambar 4.3** Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual ( $\phi_{rp}$  dan  $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan.



**Gambar 4.4** Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual ( $\phi_{rp}$  dan  $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan

#### 4.2.2 Perbedaan Pengurangan Kohesi Pada Clay Shale Jenuh

Pada clay shale jenuh Semarang-Bawen, kohesi jumlah asal pada tegangan puncak rata-rata ( $c_i$ ) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan bernilai  $300 \text{ kN/m}^2$ . Manakala pada asalnya kohesi residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rpt}$ ) adalah  $172 \text{ kN/m}^2$  atau  $57.3\%$ . Sementara kohesi residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $c_{rft}$ ) adalah  $28 \text{ kN/m}^2$  atau  $9.3\%$  dari keadaan asal kohesi jumlah pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual jumlah clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rpt}$ ) adalah  $35 \text{ kN/m}^2$  atau  $11.7\%$ . Sementara pada hari ke-80 kohesi residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $c_{rft}$ ) adalah  $4.67 \text{ kN/m}^2$  atau  $1.6\%$  dari keadaan asal kohesi jumlah pada tegangan puncak.

Kohesi efektif asal clay shale jenuh Semarang-Bawen pada tegangan puncak rata-rata ( $c'$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan bernilai  $300 \text{ kN/m}^2$ . Manakala nilai asal kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}'$ ) adalah  $172 \text{ kN/m}^2$  atau  $57.2\%$ . Sementara kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}'$ ) adalah  $28 \text{ kN/m}^2$  atau selebihnya tinggal  $9.3\%$  dari keadaan asal kohesi efektif pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual efektif clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}'$ ) adalah  $37 \text{ kN/m}^2$  atau  $12.2\%$ . Sementara pada hari ke-80 kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}'$ ) adalah  $8 \text{ kN/m}^2$  atau  $2.8\%$  dari keadaan asal kohesi efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan kohesi jumlah dan kohesi efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan kohesi jumlah dan kohesi efektif clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.5.

Pada clay shale jenuh Hambalang, kohesi jumlah asal pada tegangan puncak rata-rata ( $c_i$ ) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $195 \text{ kN/m}^2$ . Manakala pada keadaan asal kohesi residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rpt}$ ) adalah  $100 \text{ kN/m}^2$  atau  $51.3\%$ . Sementara kohesi residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $c_{rft}$ ) sebesar  $17 \text{ kN/m}^2$  atau  $8.7\%$  dari keadaan asal kohesi jumlah

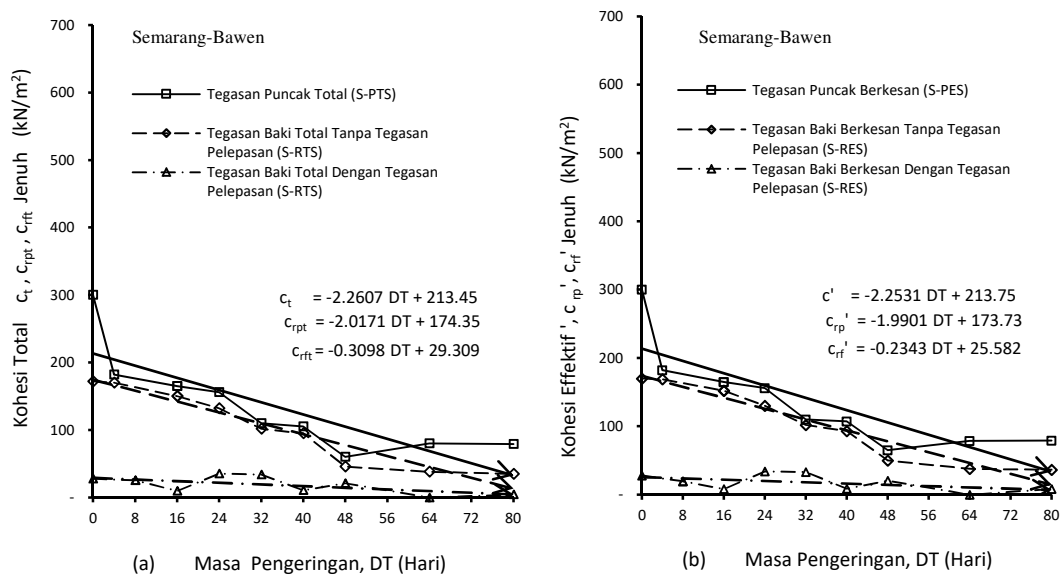
pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual jumlah clay shale jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rpt}$ ) adalah 9 kN/m<sup>2</sup> atau 4.6%. Sementara pada hari ke-80 kohesi residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $c_{rft}$ ) adalah 0 kN/m<sup>2</sup> atau 0% dari keadaan asak kohesi jumlah pada tegangan puncak. Pada hari ke-64 kohesi residual jumlah dengan pelepasan tegangan adalah 4 kN/m<sup>2</sup>.

Kohesi efektif asal clay shale jenuh Hambalang pada tegangan puncak rata-rata ( $c'$ ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah 190 kN/m<sup>2</sup>. Manakala pada keadaan asalnya kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $C_{urp}'$ ) adalah 98 kN/m<sup>2</sup> atau 57.6%. Sementara kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}'$ ) adalah 17 kN/m<sup>2</sup> atau 8.9% dari keadaan asal kohesi efektif pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual efektif clay shale jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}'$ ) adalah 9 kN/m<sup>2</sup> atau 4.7%. Sementara pada hari ke-80 kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $c_{rft}'$ ) adalah 0 kN/m<sup>2</sup> atau 0% dari keadaan asal kohesi efektif pada tegangan puncak. Pada hari ke-64 kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan adalah 4 kN/m<sup>2</sup>. Perbedaan pengurangan kohesi jumlah dan kohesi efektif clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $c$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.6. Pada gambar tersebut terkandung persamaan garis regresi yang merupakan fungsi antara kohesi yang berkenaan dengan waktu pengeringan (DT).

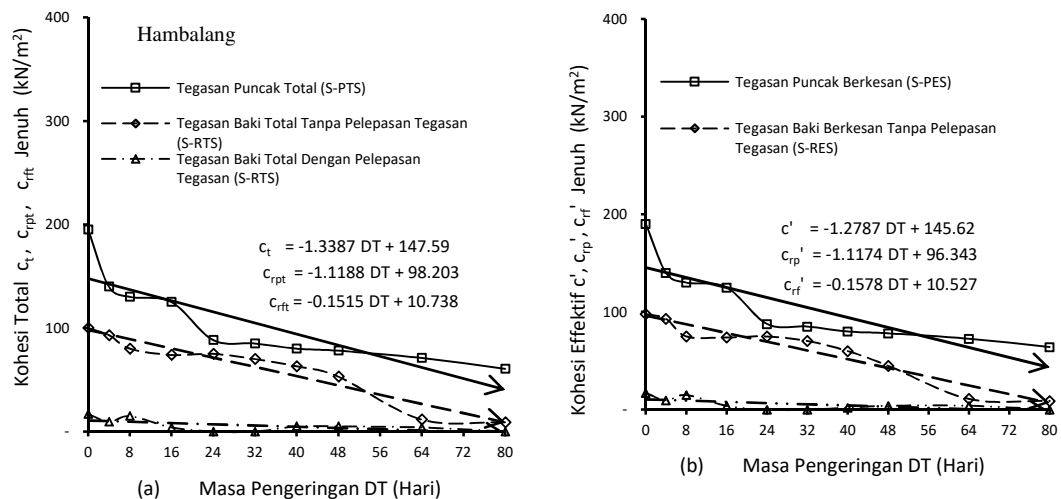
Dari penelitian terdahulu seperti pada Gambar 2.10, kohesi berkasusaan ( $c'$ ) clay shale tanpa rendaman pada tegangan puncak adalah 269 kN/m<sup>2</sup> berkurang menjadi 0 kN/m<sup>2</sup> bila direndam pada tegangan puncak efektif maupun pada tegangan residual efektif. Sementara sudut geser dalam pada tegangan puncak efektif ( $\phi'$ ) bernilai 39° menurun bila sampel direndam menjadi 25° atau selebihnya tinggal 64.1%. Sudut geser dalam efektif berkurangan lagi bila pada tegangan residual efektif

sehingga sudut geser dalam residualnya efektif ( $\phi_r'$ ) menjadi  $15^0$  atau 38.5% (Timothy *et al.*, 1991).

Dari uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol, kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dilakukan dalam 3 siklus. Kohesi puncak asal sebesar 108 kPa dan kohesi residual asal adalah 41.7 kPa atau 38.6%. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, kohesi puncak menjadi 17 kPa atau 15.7%, manakala kejelikitan residual menjadi 13 kPa atau 12% (Pineda *et al.*, 2014a; Pineda *et al.*, 2014b).



**Gambar 4.5** Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan jumlah (b) pada tegangan efektif



**Gambar 4.6** Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan jumlah (b) pada tegangan efektif

#### 4.2.3 Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Pada Clay Shale Jenuh

Pada clay shale jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam jumlah asal pada tegangan puncak rata-rata ( $\phi_t$ ) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $53.2^\circ$ . Manakala pada keadaan asal sudut geser dalam residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rpt}$ ) adalah  $27.4^\circ$  atau  $51.5\%$ . Sementara sudut geser dalam residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rft}$ ) bernilai  $25.3^\circ$  atau  $47.5\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam jumlah pada tegangan puncak. Apabila pengurangan sudut geser dalam residual jumlah clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rpt}$ ) adalah  $10.9^\circ$  atau selebihnya tinggal  $20.4\%$ . Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rft}$ ) adalah  $4.6^\circ$  atau  $8.6\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam jumlah pada tegangan puncak.

Sudut geser dalam efektif ( $\phi'$ ) asal clay shale jenuh Semarang-Bawen pada tegangan puncak rata-rata asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $53.2^\circ$ . Manakala pada asalnya sudut geser dalam residual efektif

tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}'$ ) adalah  $28.1^\circ$  atau  $52.8\%$ . Sementara sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}'$ ) adalah  $25.3^\circ$  atau  $47.5\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam efektif pada tegangan puncak. Apabila pengurangan sudut geser dalam residual efektif clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}'$ ) adalah  $10.3^\circ$  atau  $19.3\%$ . Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}'$ ) adalah  $4.6^\circ$  atau  $8.6\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan sudut geser dalam jumlah dan sudut geser dalam efektif clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.7.

Pada clay shale jenuh Hambalang, sudut geser dalam jumlah asal pada tegangan puncak rata-rata ( $\phi_t$ ) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan sebesar  $48^\circ$ . Manakala pada keadaan asal sudut geser dalam residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rpt}$ ) adalah  $31.2^\circ$  atau  $65\%$ . Sementara sudut geser dalam residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rft}$ ) adalah  $15^\circ$  atau  $31.3\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam jumlah pada tegangan puncak. Apabila pengurangan sudut geser dalam residual jumlah clay shale jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual jumlah tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rpt}$ ) adalah  $10.2^\circ$  atau  $21.3\%$ . Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual jumlah dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rft}$ ) adalah  $6.8^\circ$  atau  $14.2\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam jumlah pada tegangan puncak.

Sudut geser dalam efektif asal clay shale jenuh Hambalang pada tegangan puncak rata-rata ( $\phi'$ ) dalam keadaan asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah  $51.5^\circ$ . Manakala pada keadaan asal sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}'$ ) adalah  $31.9^\circ$  atau  $62\%$ . Sementara sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}'$ ) adalah  $15^\circ$  atau  $29.1\%$  dari keadaan asal sudut geser dalam efektif pada tegangan puncak. Apabila pengurangan

sudut geser dalam residual efektif clay shale jenuh Hambalang ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga waktu ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}'$ ) adalah  $10.7^\circ$  atau selebihnya tinggal 20.8%. Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}'$ ) adalah  $6.8^\circ$  atau 13.3% dari keadaan asal sudut geser dalam residual efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan sudut geser dalam jumlah dan sudut geser dalam residual efektif clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak ( $\phi$ ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut sudah terkandung persamaan garis regresi yang merupakan fungsi antara sudut geser dalam yang berkenaan dengan waktu pengeringan (DT).

Kekuatan geser clay shale jenuh pada keadaan tegangan jumlah dan tegangan residual terlihat tidak terlalu signifikan perbedaannya. Bahkan banyak nilai kohesi maupun sudut geser dalam pada tegangan jumlah nilainya sama dengan kohesi dan sudut geser dalam pada tegangan residual efektif. Ini terjadi pada tegangan jumlah, tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan.

Penelitian terdahulu dari dua puluh empat jenis clay shale telah diperoleh hubungan antara perbedaan sudut geser dalam residual efektif pada tegangan jumlah ( $\phi'$ ) dengan sudut geser dalam pada tegangan residual efektif ( $\phi_r'$ ). Pada Gambar 4.9 perubahan minimum dari sudut geser dalam jumlah efektif ( $\phi'$ ) adalah  $34^\circ$  berkurangan pada sudut geser dalam residual efektif ( $\phi_r'$ )  $25^\circ$  atau 26.5%. Manakala perubahan maksimum dari sudut geser dalam jumlah efektif ( $\phi'$ ) bernilai  $24^\circ$  berkurangan pada sudut geser dalam residual efektif ( $\phi_r'$ ) bernilai  $5^\circ$  atau 79.2% (Mesri dan Diaz, 1986).

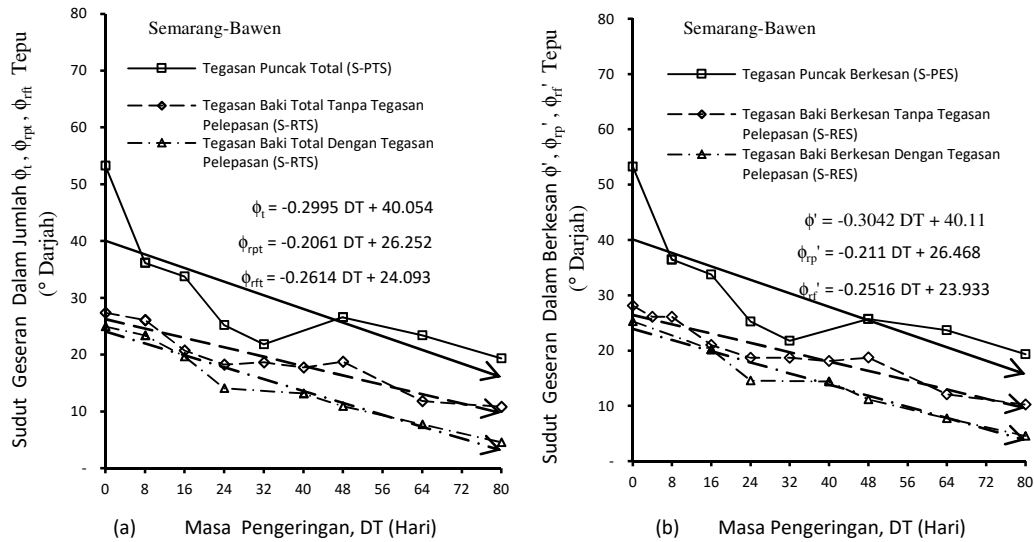
Magnitud sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) clay shale amat tergantung kepada batas cecair (LL). Kadar pengurangan sudut geser dalam residual terhadap kenaikan batas cecair berbentuk garis tidak linear. Semakin besar batas cecair clay shale maka sudut geser dalam residual semakin berkurangan. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual ini lebih signifikan pada rentang batas cecair antara 30%



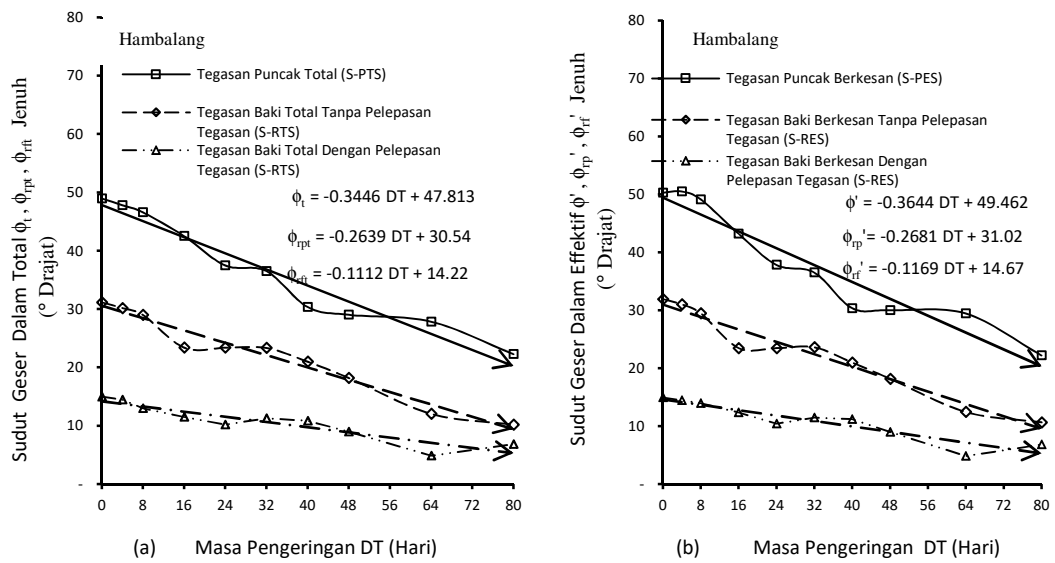
hingga 100%. Selepas batas cecair lebih besar dari 100%, pengurangan sudut geser dalam residual sudah tak signifikan lagi. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual dengan batas cecair dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pada Gambar 4.9 juga terdapat hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang sebagai bentuk validasi dalam penelitian mengenai kekuatan geser residual.

Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol, kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dilakukan dalam tiga siklus. Sudut geser dalam puncak ( $\phi$ ) asal adalah  $46^\circ$  dan sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) asal adalah  $45^\circ$  atau 97.8%. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, sudut geser dalam puncak menjadi  $36^\circ$  atau 78.2%, manakala sudut geser dalam residual menjadi  $33^\circ$  atau 71.7% (Pineda *et al.*, 2014a; Pineda *et al.*, 2014b).

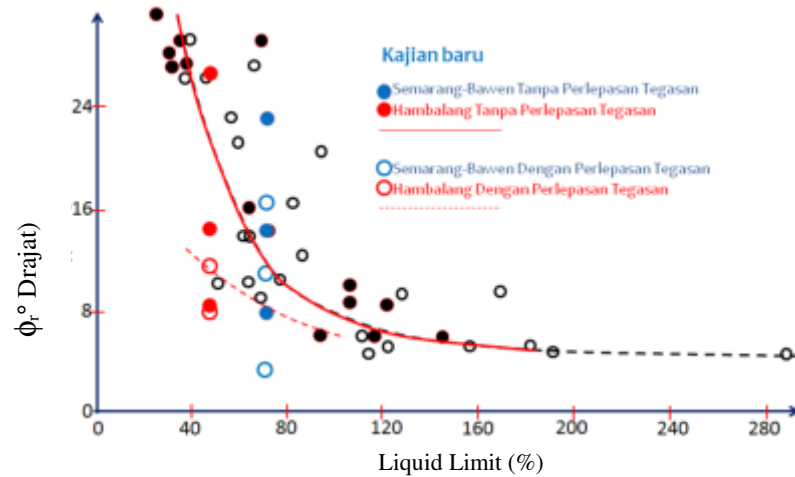
Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada keadaan asal, dapat dilihat pada Tabel 4.1. Manakala hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada keadaan asal dengan waktu hari ke-80 proses pengeringan dapat dilihat pada Tabel 4.2. Sementara penelitian terdahulu berkenaan dengan hasil penelitian sebagai wujud validasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.3



**Gambar 4.7** Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif



**Gambar 4.8** Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale jenuh Hambalang dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif



**Gambar 4.9** Hubungan antara sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) dengan batas cair LL (Mesri dan Diaz, 1986)

#### 4.2.4 Perbedaan Kekuatan Geser Pada Tegangan Jumlah Dan Tegangan Efektif

Pada clay shale jenuh melalui uji triaksial jangkaku diperoleh tegangan jumlah dan tegangan efektif, bisa dalam keadaan tegangan puncak, tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan. Manakala dari tegangan tersebut diperoleh kekuatan geser jumlah dan kekuatan geser efektif, yang akan menghasilkan kohesi jumlah dan kohesi efektif ( $c_t$  dan  $c'$ ) serta sudut geser dalam jumlah dan sudut geser dalam efektif ( $\phi_t$  dan  $\phi'$ ).

Untuk memperoleh perbedaan secara kuantitatif antara kekuatan geser jumlah dan efektif, maka pada penelitian berikut telah kumpulkan semua data kekuatan geser pada tegangan jumlah dan tegangan efektif. Data tersebut juga termasuk kekuatan geser yang diperoleh dari tegangan puncak, tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan. Kemudian dibuatkan hubungan antara kekuatan geser jumlah dan kekuatan geser efektif dengan menentukan persamaan linear yang menyatakan hubungan fungsi kekuatan geser efektif dan kekuatan geser jumlahnya. Dari Gambar 4.10 didapati bahwa kohesi efektif ( $c'$ ) clay shale Semarang-Bawen adalah 99% dari kohesi jumlah. Sedangkan dari Gambar 4.11 diperolehi bahwa kohesi efektif ( $c'$ ) clay shale Hambalang adalah 99.5% dari kohesi jumlah. Dengan demikian pada kedua clay shale tersebut didapati

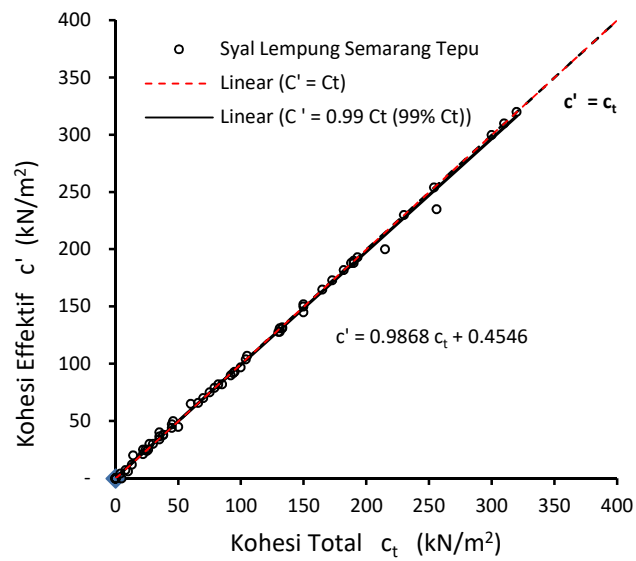
bahwa kohesi efektif adalah lebih kecil dari kohesi jumlah, dengan kadar pengurangan antara 0.5% hingga 1%.

Dari Gambar 4.12 didapati bahwa sudut geser dalam efektif ( $\phi'$ ) clay shale Semarang-Bawen adalah 0.4% lebih besar daripada sudut geser dalam jumlah ( $\phi_t$ ). Sedangkan dari Gambar 4.13 diperoleh bahwa sudut geser dalam efektif ( $\phi'$ ) clay shale Hambalang adalah 0.8% lebih besar daripada sudut geser dalam jumlah ( $\phi_t$ ). Dengan demikian pada kedua clay shale tersebut diperoleh bahwa sudut geser dalam efektif sedikit lebih besar dari sudut geser dalam jumlah, kenaikannya antara 0.4% hingga 0.8%. Dapat disimpulkan bahwa perubahan kekuatan geser efektif terhadap kekuatan geser jumlahnya pada clay shale tidak terlalu signifikan dengan perubahan lebih kecil dari 1%. Hal ini disebabkan karena clay shale memiliki susunan butiran tanah yang kecil dan sangat mampat, sehingga tegangan air pori yang dihasilkan sangat kecil.

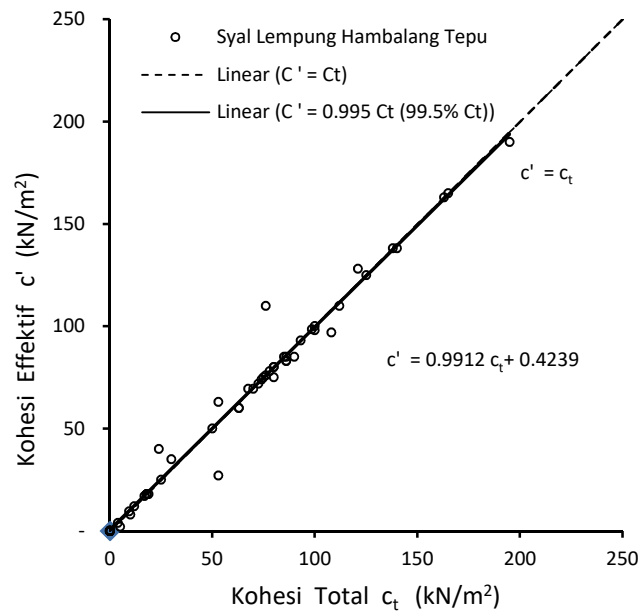
Pada penelitian terdahulu perbedaan kekuatan geser pada tegangan efektif antara tegangan puncak dan tegangan residual. Hubungan antara sudut geser dalam residual efektif ( $\phi_r'$ ) jangkalu lebih kecil daripada sudut geser residual jumlah efektif ( $\phi'$ ). Uji ini dilakukan kepada 24 jenis shale dan 10 jenis mineral murni. Dari seluruh sampel tersebut, terdapat empat mineral murni di mana  $\phi_r' = \phi'$ , yaitu pada mineral Mikrokrystalin Silika dengan ukuran  $20\% < 2\mu\text{m}$ ,  $90\% < 50\mu\text{m}$ , Kuarza dengan ukuran lanau bulat dan butiran seragam, Montmorillonit Karbon Tetraklorit agregat dan Kaolinit Karbon Tetrakloride agregat (Mesri dan Diaz, 1986).

Penelitian mengenai kaskomposisi mineral terhadap perbedaan kekuatan geser pada pada tegangan puncak dan pada tegangan efektif telah dikaji oleh Ajmera (2012). Ratio perbedaan antara sudut geser dalam efektif ( $\phi'$ ) dan sudut geser dalam tak tersalir ( $\phi$ ) adalah setengah pada mineral Montmorillonit hingga dua kali pada mineral Kaolinit sudut geser dalam tak tersalir ( $\phi$ ) (Ajmera *et al.*, 2012). Hubungan antara sudut geser dalam efektif tersalir dan sudut geser dalam tak tersalir dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.

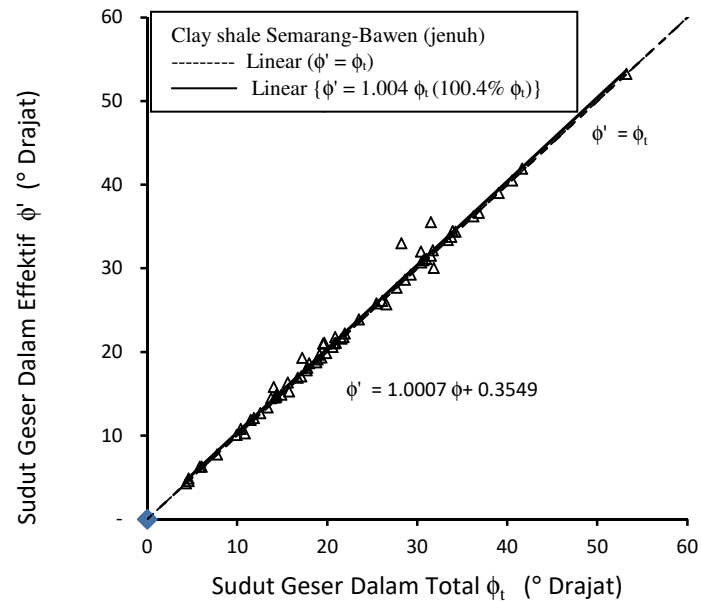
Validasi antara hasil penelitian dan penelitian terdahulu berkenaan perbedaan kekuatan geser pada tegangan jumlah dan tegangan efektif dapat dilihat pada Tabel 4.4.



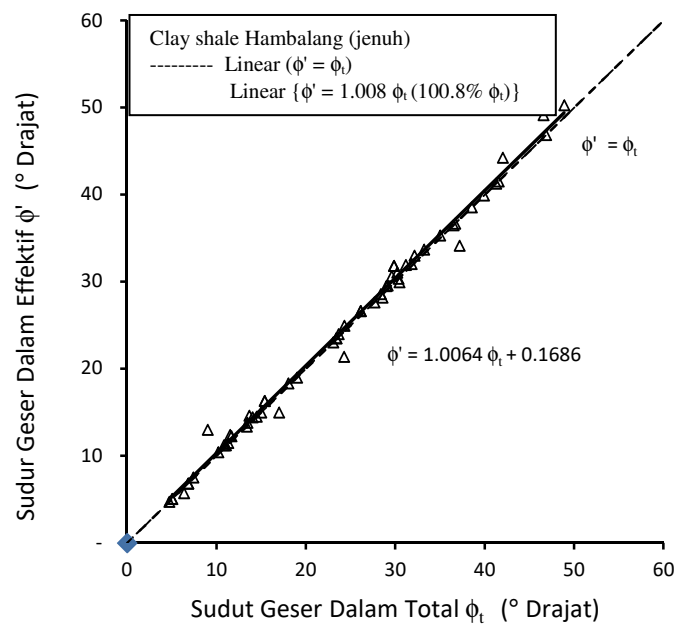
**Gambar 4.10** Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Semarang-Bawen



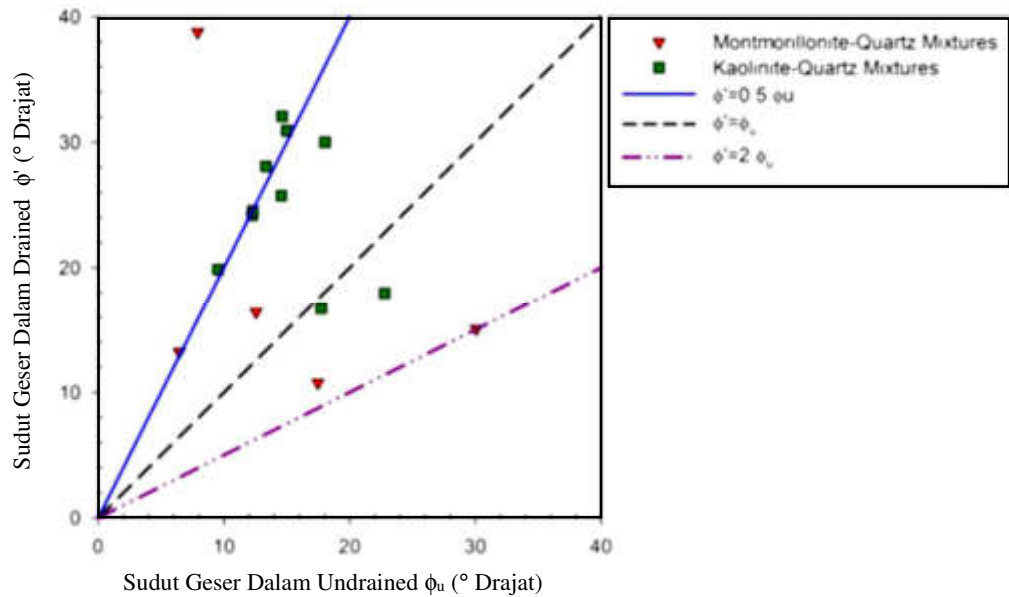
**Gambar 4.11** Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Hambalang



**Gambar 4.12** Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Semarang-Bawen



**Gambar 4.13** Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Hambalang



**Gambar 4.14** Hubungan antara  $\phi_u$  Undrained dengan  $\phi'$  Drained (Ajmera *et al.*, 2012)

**Tabel 4.1** : Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada waktu semula jadi

Lokasi	Sampel Mula-mula		Pada Sampel Mula-mula (0 hari)							
	Tegangan Puncak		Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan				Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan			
	c kN/m <sup>2</sup>	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$c_{rp}$ kN/m <sup>2</sup>	(%) Selebihnya	$\phi_{rp}$ ( $^{\circ}$ )	(%) Selebihnya	$c_{rf}$ kN/m <sup>2</sup>	(%) Selebihnya	$\phi_{rf}$ ( $^{\circ}$ )	(%) Selebihnya
Tak Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Jumlah)										
Hambalang	450	78.4	270	60.0	45	57.4	161	35.8	22	28.1
Semarang-Bawen	700	59.4	285	40.7	46.0	77.4	26.7	3.8	23.5	39.6
Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Jumlah)										
Hambalang	195	48	100	51.3	31.2	64.9	17	8.7	15	31.3
Semarang-Bawen	300	53.24	172	57.3	27.4	515	28	9.3	25.29	47.5
Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Efektif)										
Hambalang	190	51.5	98	51.6	31.9	62.0	17	8.9	15	29.1
Semarang-Bawen	300	53.24	171.5	57.2	28.1	52.8	27.8	9.27	25.3	47.5

**Tabel 4.2 :** Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada waktu semula jadi serta waktu hari ke-80

Lokasi	Pada sampel mula mula		Pada Sampel Hari ke-80							
	Tegangan Puncak		Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan				Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan			
	c kN/m <sup>2</sup>	$\phi$ (°)	c <sub>rp</sub> kN/m <sup>2</sup>	(%) Selebihnya	$\phi_{rp}$ (°)	(%) Selebihnya	c <sub>rf</sub> kN/m <sup>2</sup>	(%) Selebihnya	$\phi_{rf}$ (°)	(%) Selebihnya
Tak Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Jumlah)										
Hambalang	450	78.4	13	2.89	12.9	16.45	0	0.00	6.1	7.78
Semarang-Bawen	700	59.4	29	4.14	8.9	14.98	5	0.71	3.1	5.22
Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Jumlah)										
Hambalang	195	48	9	4.62	10.2	21.25	0	0.00	6.8	14.17
Semarang-Bawen	300	53.24	35	11.67	10.85	20.38	4.67	1.56	4.57	8.58
Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Efektif)										
Hambalang	190	51.5	9	4.74	10.7	20.78	0	0.00	6.84	13.28
Semarang-Bawen	300	53.24	36.5	12.17	10.25	19.25	8.33	2.78	4.57	8.58



**Tabel 4.3 :** Penelitian terdahulu yang dibahas berhubungan dengan hasil penelitian berupa perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual.

Penulis	Penelitian terdahulu
(Gartung , 1986).	<p><b>Penelitian terdahulu pada pekerjaan galian clay shale formasi The Keuper.</b></p> <p>a. Kohesi (<math>c</math>) clay shale asal pada gred I adalah 90 kPa akan menurun pada gred ke-IV menjadi 52 kPa atau 57.8%. Manakala pada keadaan tegangan residual kohesi akan menjadi 0 kPa atau selebihnya tinggal 0% (tidak jelekit).</p> <p>b. Sudut geser dalam asal adalah <math>41^\circ</math> menurun pada gred ke-IV bernilai <math>26^\circ</math> atau 63.4%. Manakala pada keadaan tegangan residual sudut geser dalam (<math>\phi_r</math>) adalah <math>9^\circ</math> atau 22%.</p>
(Dewoolkar dan Robert, 2005)	<p><b>Penelitian perubahan sudut geser dalam residual pada beberapa batuan lempung Fron Range Colorado</b></p> <p>Sudut geser dalam residual (<math>\phi_r</math>) adalah <math>3^\circ</math> berkurangan sehingga sebesar <math>5.5^\circ</math>. Pengurangan sudut geser dalam residual (<math>\phi_r</math>) ini terjadi antara rentang tegangan normal efektif 30 kPa hingga 960 kPa, atau LL antara 30% hingga 100% dan PI antara 5% hingga 60%</p>
(Timothy <i>et al.</i> , 1991).	<p>Kohesi berkawasan (<math>c'</math>) clay shale asal tanpa rendaman asal sebesar 5500 psf menurun menjadi 0 psf bila direndam. (<math>\phi'</math>) asal sebesar <math>39^\circ</math> akan berkurangan bila sampel direndam menjadi <math>25^\circ</math> atau 64.1%. Pada tegangan residual efektif (<math>\phi_r'</math>) menjadi <math>15^\circ</math> atau 38.5%.</p>
(Pineda <i>et al.</i> , 2014)	<p><b>Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol,</b> kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dalam 3 siklus.</p> <p>a. Kohesi puncak (<math>c</math>) asal adalah 108 kPa dan kohesi residual (<math>c_r</math>) asal sebesar 41.7 kPa atau 38.6%.</p> <p>Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, kohesi puncak menjadi (<math>c</math>) 17 kPa atau 15.7%, manakala kohesi residual (<math>c_r</math>) menjadi 13 kPa atau 12%.</p>

## Bersambung

Penulis	Penelitian terdahulu
(Mesri dan Diaz, 1986).	b. <b>Penelitian terdahulu dari 24 jenis clay shale pada hubungan <math>\phi'</math> dan <math>\phi_r'</math></b> a. Perubahan minimum dari $\phi'$ adalah $34^\circ$ berkurang kepada $\phi_r'$ bernilai $25^\circ$ atau 26.5%. b. Perubahan maksimum daripada $\phi'$ bernilai $24^\circ$ menurun $\phi_r'$ bernilai $5^\circ$ atau 79.2%
(Pineda <i>et al.</i> , 2014).	<b>Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol,</b> kasuspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dalam 3 siklus. a. Sudut geser dalam puncak ( $\phi$ ) asal adalah $46^\circ$ dan sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) asal adalah $45^\circ$ atau 97.8%. b. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, sudut geser dalam puncak ( $\phi$ ) menjadi $36^\circ$ atau 78.2%, manakala sudut geser dalam residual ( $\phi_r$ ) menjadi $33^\circ$ atau 71.7%

**Tabel 4.4 :** Penelitian terdahulu yang dibahas berhubungan dengan hasil penelitian berupa perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan jumlah dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p><b>Uji ini dilakukan sebanyak 24 jenis shale dan 10 jenis mineral murni</b></p> a. $\phi_r'$ jangkaku lebih kecil $\phi'$ b. Dari seluruh sampel tersebut, terdapat empat mineral murni di mana $\phi_r' = \phi'$ , yaitu pada mineral mikrokristalin silika dengan ukuran $20\% < 2\mu\text{m}$ , $90\% < 50\mu\text{m}$ , Kuarza dengan ukuran lanau bulat dan butiran seragam, montmorillonit karbon tertraklorit agregat dan kaolinit karbon tetraklorit agregat (Mesri dan Diaz, 1986).	<p><b>Hubungan kekuatan geser efektif terhadap kekuatan geser total clay shale</b></p> a. Pada clay shale Semarang-Bawen $c' = 0.99 c$ , kohesi efektif 99% dari kohesi total, manakala $\phi' = 1.004 \phi$ , sudut geser dalam efektif 100.4% dari sudut geser dalam total b. Pada clay shale Hambalang $c' = 0.995 c$ , kohesi efektif 99.5% dari kohesi total, manakala $\phi' = 1.008 \phi$ , sudut geser dalam efektif 100.8% dari sudut geser dalam total.

Bersambung

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p><b>Penelitian mengenai kasus komposisi mineral dan laju geser pada kekuatan geser lempung pengampul</b></p> <p>Ratio perbedaan antara sudut geser dalam efektif tersalir (<math>\phi'</math>) dan sudut geser dalam tak tersalir (<math>\phi</math>) adalah bahwa sudut geser dalam efektif tersalir (<math>\phi'</math>) sebesar setengah hingga dua kali sudut geser dalam tak tersalir (<math>\phi</math>), <math>\phi' = (0.5\sim 2) \phi</math> (Ajmera <i>et al.</i>, 2012).</p>	

#### 4.3 Perubahan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Siklus Pembasahan dan Pengeringan

Penelitian kasus pelapukan akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada clay shale tak jenuh yang dilakukan menunjukkan perilaku yang berbeda daripada proses pengeringan. Perilaku yang paling signifikan adalah perubahan fisik dan mekanik, di mana pada siklus pembasahan dan pengeringan ratio disintegritas ( $D_R$ ) lebih cepat berkurangan pada waktu yang sama apabila dibandingkan dengan proses pengeringan. Manakala kekuatan geser akibat siklus pembasahan dan pengeringan hanya dapat diuji sehingga waktu hari ke-32 untuk clay shale Hambalang dan maksimum hari ke-24 untuk clay shale Semarang-Bawen. Selepas waktu tersebut maka clay shale sudah tidak dapat diuji, karena sudah hancur.

Secara terperinci uji triaksial akibat siklus pembasahan dan pengeringan hanya dilakukan pembasahan dua kali dalam waktu 8 hari atau setiap 4 hari. Manakala pembasahan dilakukan dengan cara merendam sampel clay shale kedalam air dalam waktu 5 menit saja yang kemudian dilanjutkan dengan proses pengeringan lagi. Dipilihnya waktu 5 menit pada proses perendaman, karena tujuannya adalah hanya untuk membasahi sampel clay shale hingga ke dalam joint yang terjadi akibat proses pelapukan. Perkara ini tidak dimaksudkan untuk membuat sampel menjadi jenuh. Pengujian triaksial dari sampel ini hanya dilakukan pada hari ke-8, hari ke-16,

hari ke-24 untuk clay shale Semarang-Bawen dan ditambah hari ke-32 untuk clay shale Hambalang.

Pembasahan dengan perendaman sewaktu 5 menit disimulasikan sebagai kemampuan menyesuaikan keadaan akibat hujan hingga clay shale terendam oleh air hujan. Pada laboratorium dilakukan hanya dalam waktu 5 menit dengan harapan seluruh sampel sudah basah dan tidak menjadikan supaya sampel jenuh sepenuhnya. Walau bagaimanapun dalam 5 menit ini diharapkan seluruh joint clay shale yang ada sudah terpenuhi oleh air. Penelitian yang menyerupai juga telah dilakukan pada tanah Pamplopa Marl dengan uji uni aksial (UCS). Sebelum dilakukan uji geser sampel ia direndam dalam waktu 5 menit seperti pada Gambar 2.18 (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008). Tabel uji triaksial akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada clay shale Semarang-Bawen dan sayal lempung Hambalang yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4.5 :** Siklus pembasahan dan pengeringan clay shale dan tabel uji triaksial.

0	2	2	6	6	10	10	14	14	18	18	22	22	26	26	30	30
2	6	6	10	10	14	14	18	18	22	22	26	26	30	30	34	34
Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 Minit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 Minit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan
Uji triaksial hari ke : 0	Uji triaksial hari ke : 8			Uji triaksial hari ke : 16			Uji triaksial hari ke : 24			Uji triaksial hari ke : 32						

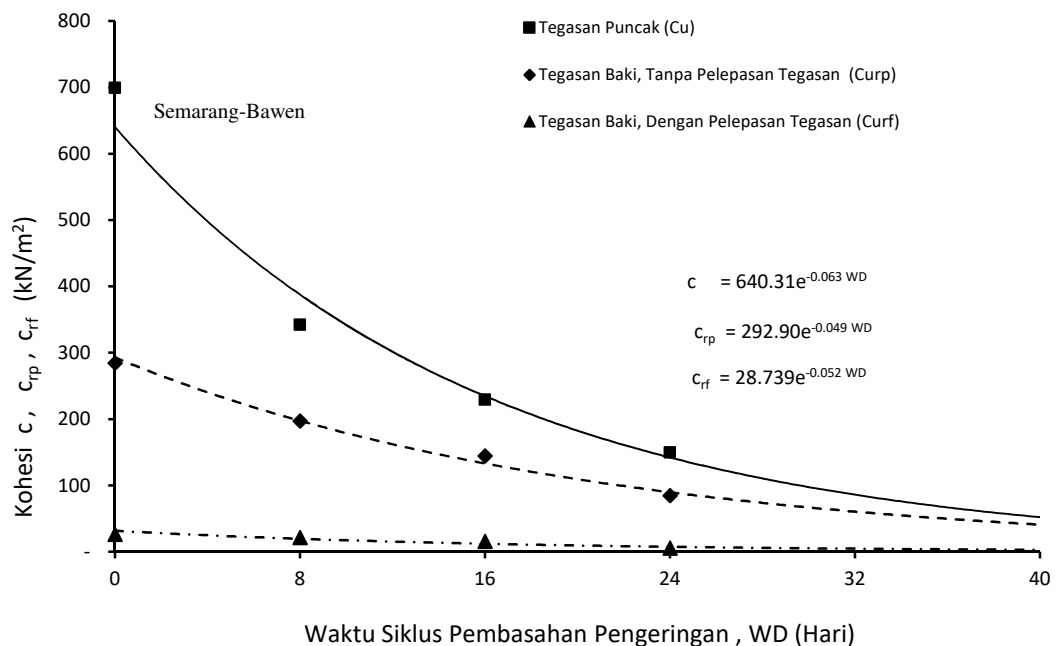
#### 4.3.1 Perbedaan Kohesi Clay shale Tak Jenuh

Pada clay shale tak jenuh Semarang-Bawen kohesi pada keadaan asal ( $c$ ) sebelum proses siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan adalah  $700 \text{ kN/m}^2$ . Manakala kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) pada keadaan asal adalah  $285 \text{ kN/m}^2$  atau  $40.7\%$ , sedangkan kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) pada asal adalah  $27 \text{ kN/m}^2$  atau  $3.8\%$ . Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, kohesi jumlah ( $c$ ) pada hari ke-24 adalah  $150 \text{ kN/m}^2$  atau  $21.4\%$ . Sedangkan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) pada hari ke-24 adalah  $85 \text{ kN/m}^2$  atau  $12.1\%$  dan kohesi residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-24 adalah  $6 \text{ kN/m}^2$  atau  $0.9\%$ . Perbedaan selisih pengurangan peratus kohesi residual akibat siklus pembasahan-pengeringan adalah lebih besar daripada akibat pengeringan pada waktu yang sama. Perkara ini karena kadar pelapukan pada clay shale akibat siklus pembasahan dan pembasahan adalah lebih cepat bila dibandingkan dengan proses pengeringan. Perubahan kohesi clay shale tak jenuh Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada tegangan puncak dan tegangan residual hingga waktu hari ke-24 dapat dilihat pada Gambar 4.15.

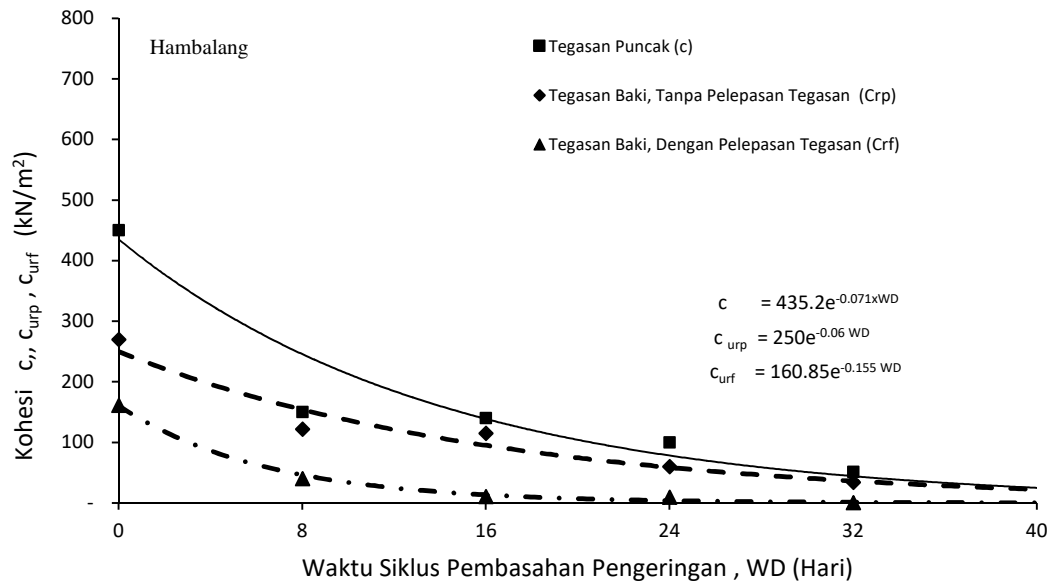
Kohesi clay shale Hambalang pada keadaan asal ( $c$ ) sebelum proses siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan adalah  $450 \text{ kN/m}^2$ . Manakala kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$ ) pada keadaan asal adalah  $270 \text{ kN/m}^2$  atau  $60\%$ , sedangkan kohesi residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$ ) pada asal adalah  $161 \text{ kN/m}^2$  atau  $35.8\%$ . Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Hambalang, kohesi jumlah ( $c$ ) pada hari ke-32 sebesar  $51 \text{ kN/m}^2$  atau  $11.3\%$ . Sedangkan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{urp}$ ) pada hari ke-32 adalah  $23 \text{ kN/m}^2$  atau  $5.2\%$  dan kohesi residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-32 adalah  $0.7 \text{ kN/m}^2$  atau  $0.1\%$ . Perubahan kohesi clay shale tak jenuh Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada tegangan puncak dan tegangan residual hingga waktu hari ke-32 dapat dilihat pada Gambar 4.16.

Penelitian terdahulu yang membincangkan perubahan kohesi puncak dan kohesi residual akibat pelapukan telah dilakukan pada batuan lempung Lilla arah

utara-timur dari Spanyol. Batuan lempung ini mengandung mineral Illit, Paligorskit, Dolomit dan Kuarza. Kekuatan geser batuan lempung jenuh Lilla diuji dengan geser langsung dengan tegangan efektif 100 kPa, 200 kPa dan 300 kPa dan dilakukan dalam sampel tersebut dengan kasuspelapukan akibat tiga siklus kelembapan relatif. Perubahan kekuatan geser terjadi pada keadaan tegangan puncak dan pada tegangan residual sewaktu tiga siklus berlangsung. Kohesi puncak pada keadaan asal sebesar 108 kPa berkurang hingga menjadi 17 kPa setelah waktu tiga siklus berlangsung, atau 15.6%. Manakala kohesi residual pada keadaan asal sebesar 41.7 kPa berkurang hingga menjadi 13 kPa setelah waktu tiga siklus berlangsung, atau 31.2% (Pineda *et al.*, 2014a). Magnitud perubahan kohesi residual diperoleh dari graf hubungan tegangan geser dan regangan melalui uji geser langsung dengan tegangan normal efektif yang berbeda.



**Gambar 4.15** Perubahan kohesi clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit



**Gambar 4.16** Perubahan kohesi clay shale Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit

#### 4.3.2 Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh

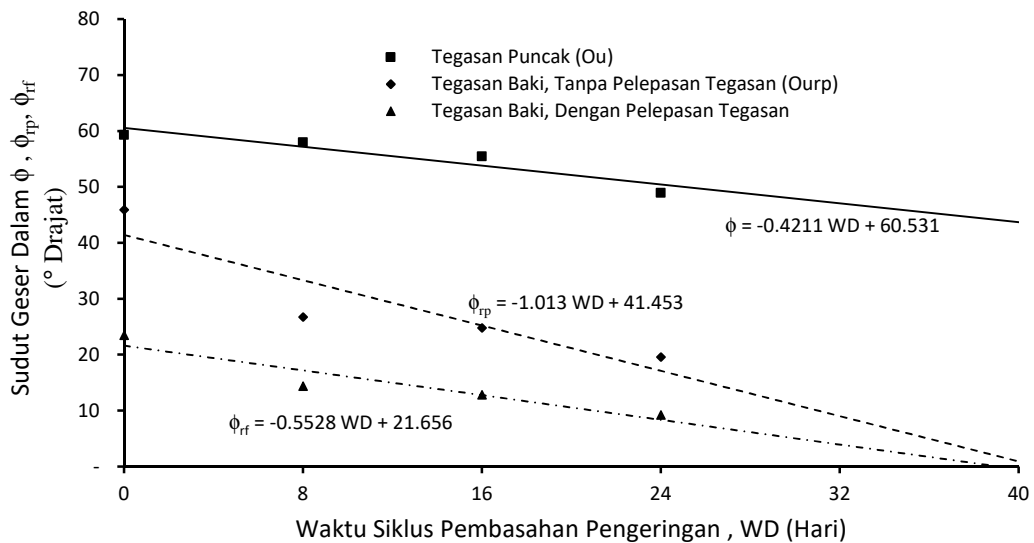
Sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen pada keadaan asal ( $\phi$ ) sebelum proses siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan sebesar  $59.4^\circ$ . Manakala sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) pada waktu asal adalah  $46^\circ$  atau 77.4 %, sedangkan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rf}$ ) pada asal adalah  $23.5^\circ$  atau 39.6%. Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam jumlah ( $\phi$ ) pada hari ke-24 menjadi  $49^\circ$  atau 82.5%. Sedangkan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) pada hari ke-24 adalah  $19.6^\circ$  atau 33% dan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-24 menjadi  $9.3^\circ$  atau 15.7%. Perubahan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada tegangan puncak dan tegangan residual hingga waktu hari ke-24 dapat dilihat pada Gambar 4.17.

Pada clay shale Hambalang, sudut geser dalam pada keadaan asal ( $\phi$ ) sebelum proses siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan adalah  $78.4^\circ$ . Sudut geser dalam asal yang terjadi besar, karena ada keadaan asal clay shale perilakunya adalah seperti kelakukaan batuan. Sudut geser dalam diperolehnya besar juga karena disebabkan oleh kasus kekasaran bidang bidang (*roughness effect*), di mana saat uji triaksial, tegangan sisi yang terjadi relatif kecil (Barton, 2014 dan Godman, 1989). Manakala sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) pada waktu asal menjadi  $45^\circ$  atau  $57.4\%$ , sedangkan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ( $\phi_{rt}$ ) pada asal adalah  $22^\circ$  atau  $28.1\%$ . Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Hambalang, sudut geser dalam jumlah ( $\phi$ ) pada hari ke-32 menjadi  $51.3^\circ$  atau  $65.4\%$ . Sedangkan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan ( $\phi_{rp}$ ) pada hari ke-32 adalah  $22.2^\circ$  atau  $28.3\%$  dan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-32 adalah  $6.7^\circ$  atau  $8.6\%$ . Perubahan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan pada tegangan puncak dan tegangan residual hingga waktu hari ke-32 dapat dilihat pada Gambar 4.18. Hasil penelitian dari perubahan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang akibat pelapukan siklus pembasahan dan pengeringan, dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.

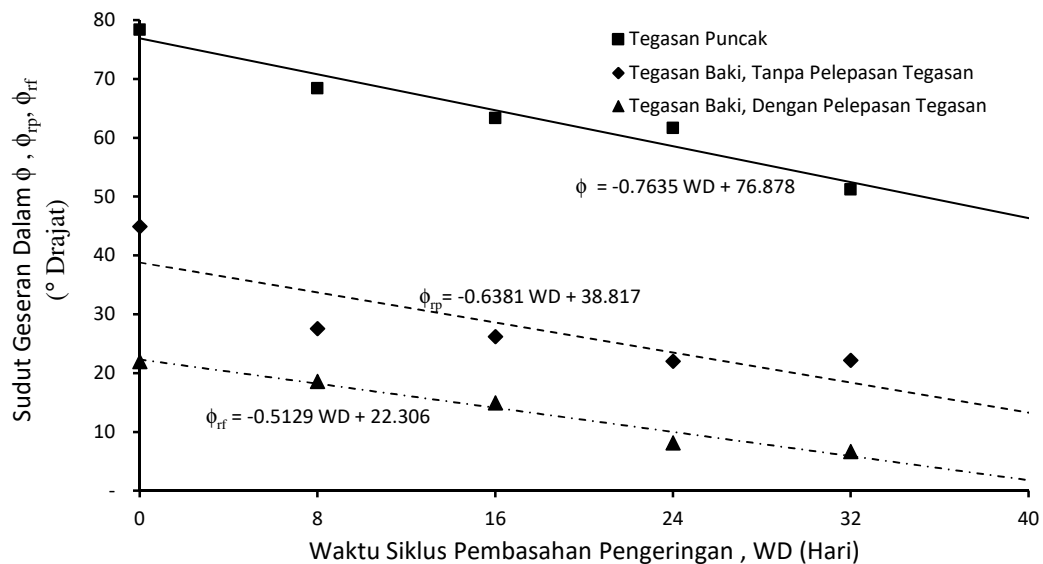
Penelitian terdahulu yang membicarakan perubahan sudut geser dalam puncak dan sudut geser dalam residual akibat pelapukan telah dilakukan pada batuan lempung Lilla dari Spanyol. Batuan lempung tersebut mempunyai mineral Illit, Paligorskit, Dolomit dan Kuarza. Kekuatan geser batuan lempung jenuh Lilla diuji dengan geser langsung dengan tegangan efektif 100 kPa, 200 kPa dan 300 kPa keatas sampel tersebut dengan kasuspelapukan akibat tiga siklus kelembapan relatif. Perubahan kekuatan geser terjadi pada keadaan tegangan puncak dan pada tegangan residual sewaktu tiga siklus berlangsung. Sudut geser dalam puncak pada keadaan asal sebesar  $46^\circ$  berkurangan hingga menjadi  $36^\circ$  setelah waktu tiga siklus terjadi, atau  $78.3\%$ . Manakala sudut geser dalam residual pada waktu asal adalah  $45^\circ$  dan berkurangan hingga menjadi  $33^\circ$  setelah terjadi waktu tiga siklus atau  $73.3\%$  (Pineda *et al.*, 2014b). Magnitud perubahan kohesi residual diperoleh dari graf hubungan



tegangan geser dan regangan melalui uji geser langsung dengan tegangan normal efektif yang berbeda.



**Gambar 4.17** Perubahan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit



**Gambar 4.18** Perubahan sudut geser dalam clay shale Hambalang akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan waktu pembasahan setiap 4 hari dengan waktu rendaman 5 menit

Penelitian terdahulu telah dilakukan menggunakan uji triaksial terkukuh tersalir (triaksial CD) pada campuran pasir dan kaolinite tanah tak jenuh (SK-17).

Pengurangan tegangan puncak terjadi akibat siklus pembasahan pengeringan dalam 3 siklus sehingga terjadi pengurangan kohesi. Akan tetapi akibat sedutan matriks, kohesi akan bertambah dengan bertambahnya sedutan matriks hingga mencapai 100 kPa (Goh *et al.*, 2014). Seperti dijelaskan asal, bahwa penelitian ini mengabaikan kasussedutan pada uji sampel clay shale tak jenuh. Sehingga persamaan kekuatan gesernya seperti yang dinyatakan dalam teori Coulomb.

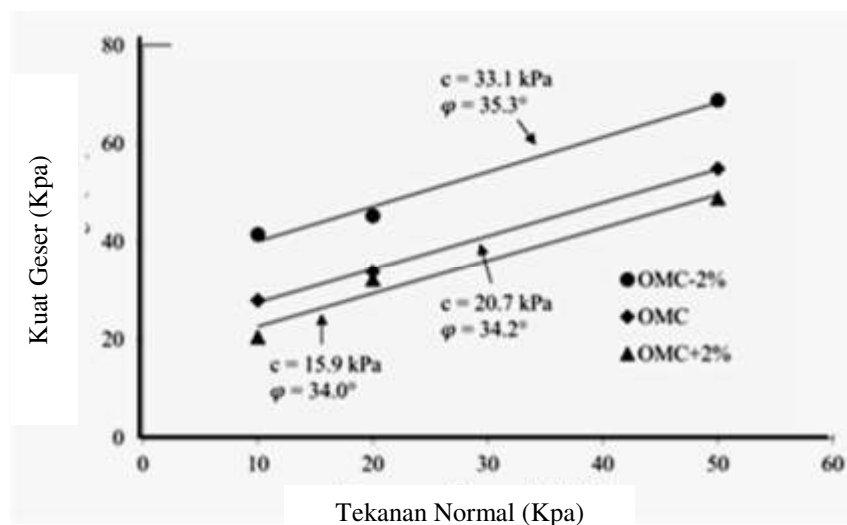
Pada penelitian lain banyak yang memperhatikan kasussedutan pada lempung tak jenuh, sehingga jika tegangan sedutan diperhitungkan maka parameter kekuatan geser yang dihasilkan akan lebih besar bila dibandingkan dengan mengabaikan tegangan sedutan. Penelitian mengenai kasussedutan pada lempung tak jenuh akibat tiga kali siklus pembasahan dan pengeringan telah menghasilkan persamaan kekuatan geser (Goh *et al.*, 2010)

Kasus dari siklus pembasahan dan pengeringan, pemanasan dan penyejukan dan pembekuan dan pencairan telah diuji sebanyak 50 siklus daripada enam jenis batuan pasir terhadap unconfined compression test. Rentang tegangan dari enam batuan pasir tersebut antara 12,124 kN/m<sup>2</sup> hingga 110,650 kN/m<sup>2</sup>. Hasil uji ekapaksi menghasilkan pengurangan rata-rata yang berbeda terhadap kasustiga penyebab pelapukan tersebut. Akibat siklus pembasahan dan pengeringan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 54% hingga 82% dari nilai asal. Manakala akibat siklus pemanasan dan penyejukan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 62% hingga 79%. Sedangkan akibat siklus pembekuan dan pencairan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 48% hingga 76% dari kekuatan asal (Hale dan Shakoor, 2003).

Pada clay shale Bearpaw Kanada yang disusun asal, uji untuk menentukan kekuatan geser pada beberapa tegangan telah dilakukan, diantara tegangan '*intact*, *fully softened*' dan tegangan residual. Hubungan tegangan geser dengan tegangan normal efektif menunjukkan bahwa terjadi pengurangan dari tegangan geser pada tegangan normal efektif yang sama. Dari uji yang dilakukan sudut geser dalam pada

keadaan intact  $\phi_i$  adalah  $43^\circ$ , sudut geser dalam pada keadaan '*fully softened*' bernilai  $21^\circ$  dan keadaan tegangan residual adalah  $9^\circ$  (Mesri dan Shahien, 2003).

Dalam penelitian lain, uji skala model tambak setinggi satu meter di laboratorium dengan contoh tanah yang dimampatkan pada kadar air yang optimum (OMC). Dari penelitian tersebut terjadi kasuspembasahan dan pengeringan dengan melakukan penambahan dan pengurangan kadar air optima (OMC) menjadi kadar air OMC+2 % dan OMC-2 %. Pada keadaan OMC, kohesi (c) diperoleh sebesar 20.7 kPa dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) sebesar  $34.2^\circ$ . Pada keadaan OMC-2 %, kohesi (c) bertambah menjadi 33.1 kPa manakala sudut geser dalam ( $\phi$ ) menjadi  $35.3^\circ$ . Pada keadaan OMC+2 % kohesi (c) berkurang menjadi 15.9 kPa manakala sudut geser dalam ( $\phi$ ) berkurang menjadi  $34^\circ$  (Hatami *et al.*, 2016). Hubungan graf Coulomb dari penelitian tersebut seperti pada Gambar 4.19. Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian dari kasussiklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser dapat dilihat pada Tabel 4.6.



**Gambar 4.19** Variasi kekuatan geser terhadap tegangan normal akibat penambahan dan pengurangan kadar air lebih kurang 2% dari OMC (Hatami *et al.*, 2016)

**Tabel 4.6 :** Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian dari kasus siklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser

Penulis	Penelitian terdahulu
<p>(Pineda <i>et al.</i>, 2014b).</p> <p>(Goh <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>(Hale dan Shakoor, 2003)</p>	<p><b>Pada batuan lempung jenuh Lilla</b></p> <p>a. <math>\phi = 46^\circ</math> pada waktu asal menurun hingga menjadi <math>36^\circ</math> setelah waktu tiga siklus terjadi, atau selebihnya tinggal 78.3%.</p> <p>b. <math>\phi_r = 45^\circ</math> pada waktu asal menurun hingga menjadi <math>33^\circ</math> setelah terjadi waktu tiga siklus atau selebihnya tinggal 73.3%.</p> <p><b>Pada campuran pasir dan kaolinite tanah tak jenuh (SK-17).</b></p> <p>Pengurangan tegangan puncak terjadi akibat siklus pembasahan pengeringan dalam 3 siklus sehingga terjadi pengurangan kohesi. Akan tetapi akibat sedutan matriks, kohesi akan bertambah dengan bertambahnya sedutan matriks hingga mencapai 100 kPa.</p> <p><b>Kasuspembasahan dan pengeringan, pemanasan dan penyejukan dan siklus pembekuan dan pencairan sebanyak 50 siklus.</b></p> <p>a. Rentang tegangan dari enam batuan pasir dengan uji ekapaksi tersebut antara 1723 psi hingga 15724 psi.</p> <p>b. Hasil uji ekapaksi menghasilkan pengurangan rata-rata yang berbeda terhadap kasustiga penyebab pelapukan tersebut.</p> <p>c. Akibat siklus pembasahan dan pengeringan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 54% hingga 82% .</p> <p>d. Akibat siklus pemanasan dan penyejukan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 62% hingga 79%.</p> <p>e. Akibat siklus pembekuan dan pencairan, kekuatan tegangan rata-rata pada siklus ke-50 dari enam sampel batuan pasir tinggal antara 48% hingga 76%.</p>
<p>(Mesri dan Shahien, 2003).</p>	<p><b>Pada clay shale Bearpaw Kanada yang disusun asal</b></p> <p>Sudut geser dalam pada keadaan intact (<math>\phi_i</math>) sebesar <math>43^\circ</math>, sudut geser dalam pada keadaan '<i>fully softened</i>' sebesar (<math>\phi</math>) <math>21^\circ</math> dan keadaan tegangan residual (<math>\phi_r</math>) adalah <math>9^\circ</math>.</p>
<p>(Hatami <i>et al.</i>, 2016)</p>	<p>Penambahan (+2%) dan pengurangan (-2%) kadar air kadar air optima (OMC)</p> <p>a. Pada keadaan OMC, kohesi (c) adalah 20.7 kPa dan sudut geser dalam (<math>\phi</math>) adalah <math>34.2^\circ</math>.</p> <p>b. Pada keadaan OMC kurang 2%, kohesi (c) bertambah menjadi 33.1 kPa, sudut geser dalam (<math>\phi</math>) menjadi <math>35.3^\circ</math>.</p> <p>c. Pada keadaan OMC lebih 2% kohesi (c) berkurang menjadi 15.9 kPa, sudut geser dalam (<math>\phi_u</math>) berkurang menjadi <math>34^\circ</math>.</p>

**Tabel 4.7 :** Hasil penelitian perubahan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga hari ke-24

Kekuatan geser	Simbol & Unit	Besaran Kekuatan Geser dan Pengurangan (%)				Persamaan Garis Pengurangan Kekuatan Geser	Waktu Terjadi
		Keadaan awal (kN/m <sup>2</sup> )	(%) Dari awal	WD 24 hari (kN/m <sup>2</sup> )	(%)		
Tegangan Total	c (kN/m <sup>2</sup> )	700	100.0	150	21.4 %	$c = 640.31e^{-0.063 WD}$	0 ~24 hari
	$\phi$ (drajat)	59.4	100.0	49	82.5 %	$\phi = -0.4211WD + 60.531$	0 ~ 24 hari
Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan	$c_{rp}$ (kN/m <sup>2</sup> )	285	40.7	85	12.1 %	$c_{rp} = 292.90e^{-0.049 WD}$	0 ~24 hari
	$\phi_{rp}$ (drajat)	46	77.4	19.6	33.0 %	$\phi_{rp} = -1.013 WD + 41.453$	0 ~ 24 hari
Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan	$c_{rt}$ (kNm <sup>2</sup> )	26.7	3.8	6	0.9 %	$c_{rt} = 28.739e^{-0.052 WD}$	0 ~24 hari
	$\phi_{rt}$ (drajat)	23.5	39.6	9.3	15.7 %	$\phi_{rt} = -0.5528 WD + 21.656$	0 ~ 24 hari

**Tabel 4.8 :** Hasil penelitian perubahan kekuatan geser clay shale Hambalang akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga hari ke-32

Kekuatan geser	Simbol & Unit	Besaran Kekuatan Geser dan Pengurangan (%)				Persamaan Garis Pengurangan Kekuatan Geser	Waktu Terjadi
		Keadaan awal(kN/m <sup>2</sup> )	(%) Dari awal	WD 32 hari (kN/m <sup>2</sup> )	(%)		
Tegangan Total	c (kN/m <sup>2</sup> )	450	100.0	51	11.3 %	$C = 354.88e^{-0.06 WD}$	0 ~32 hari
	$\phi$ (drajat)	78.4	100.0	51.3	65.4 %	$\phi = -0.76 WD + 76.88$	0 ~ 32 hari
Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan	$c_{rp}$ (kN/m <sup>2</sup> )	270	60.0	23.4	5.2 %	$c_{rp} = 250e^{-0.06 WD}$	0 ~32 hari
	$\phi_{rp}$ (drajat)	44.97	57.4	22.2	28.3 %	$\phi_{rp} = -0.63 WD + 38.8$	0 ~ 32 hari
Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan	$c_{rt}$ (kNm <sup>2</sup> )	161	35.8	0.67	0.1 %	$c_{rt} = 160.85e^{-0.155 WD}$	0 ~32 hari
	$\phi_{rt}$ (drajat)	22	28.1	6.72	8.6 %	$\phi_{rt} = -0.5129 WD + 22.306$	0 ~ 32 hari

#### 4.4 Perbandingan Sudut Joint Teori dan Sudut Joint Hasil Penelitian

Dari uji triaksial akibat proses pengeringan, lebih dari 120 spesimen sampel tak terganggu clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang yang diuji pada keadaan sampel jenuh dan tak jenuh. Keruntuhan sampel pada keadaan tegangan puncaknya akan terjadi. Pada keadaan itu maka sampel akan runtuh dan tegangan akan menurun hingga pada keadaan tegangan residual. Keruntuhan sampel ditunjukkan dengan turunnya tegangan sisih, dan terjadi joint pada sampel. Bentuk

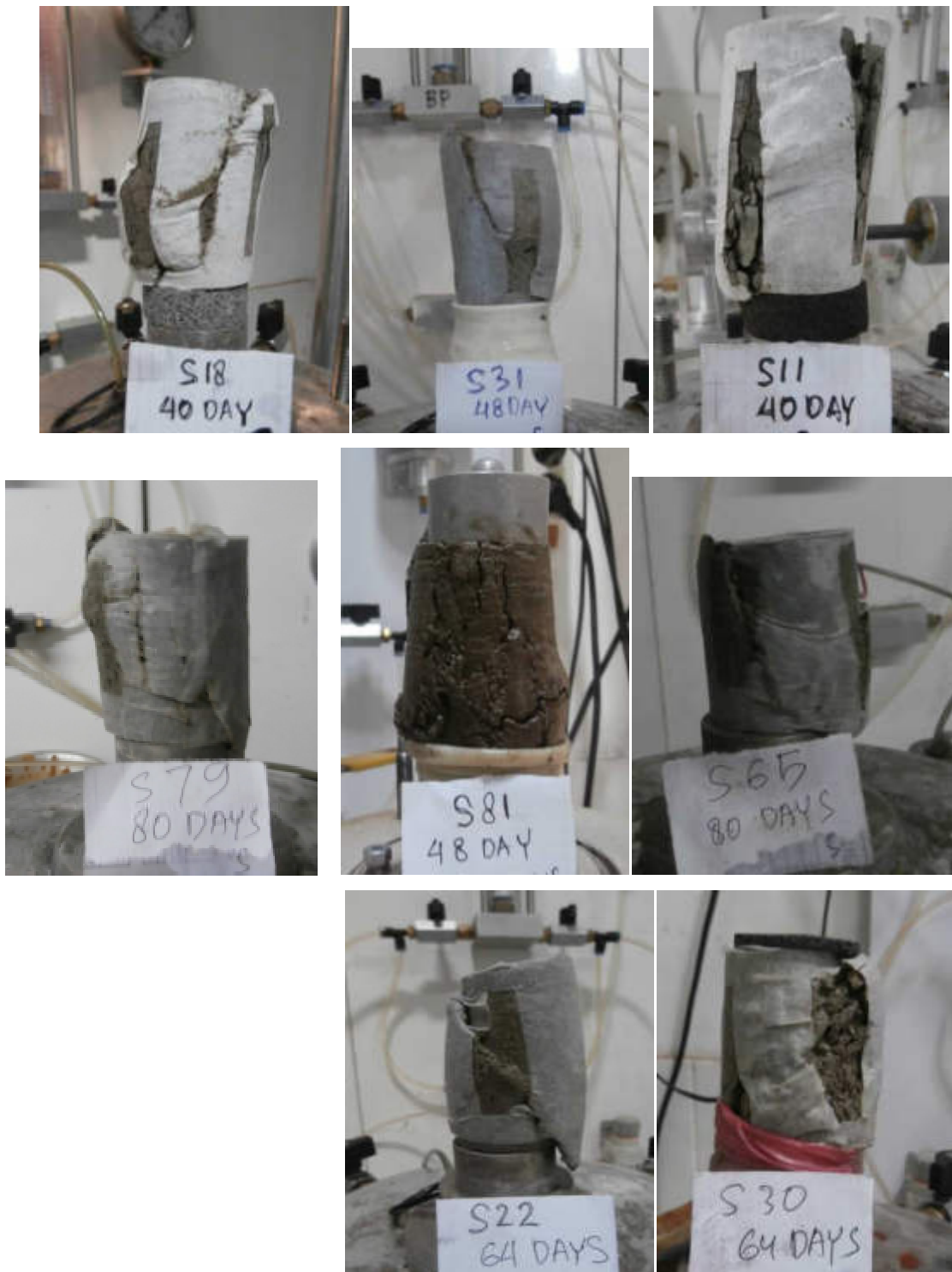
joint dari sampel ini ada bermacam-macam bentuk dan sudut joint tersebut diukur terhadap garis mendatarnya. Sudut yang terjadi dan diukur tersebut disebut sudut joint ( $\theta$ ).

Besaran sudut joint ( $\theta$ ) secara teori pada rumusan kekuatan geser dari Coulomb ialah merupakan fungsi yang berkaitan dengan sudut geser dalam ( $\phi$ ) seperti mana persamaan 2.5 pada Bab 2. Sedangkan sudut joint yang diukur dari hasil penelitian sebagai sudut joint hasil penelitian ( $\theta_r$ ). Dari kedua-dua sudut joint tersebut dibuat persamaan garis lurus, sehingga perbedaan yang terjadi secara teori dan hasil penelitian dapat ditentukan secara kuantitatif berdasarkan penelitian ini. Gambar sudut joint hasil hasil ( $\theta_r$ ) clay shale Semarang-Bawen pada sampel tak jenuh dan jenuh sebanyak 16 specimen dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 dan sudut joint hasil hasil ( $\theta_r$ ) clay shale Hambalang pada sampel tak jenuh dan jenuh sebanyak 18 spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23.

Perilaku perubahan sudut joint juga telah dikaji akibat proses pengeringan clay shale. Perubahan sudut joint hasil hasil ( $\theta_r$ ) dan perubahan sudut joint secara teori ( $\theta$ ) juga berbeda sewaktu proses pengeringan berlangsung. Perubahan kedua sudut joint tersebut dibuatkan dalam fungsi dari waktu pengeringan dengan satu garis lurus, sehingga diperoleh secara kuantitatif perubahan yang terjadi selama 80 hari proses pengeringan.



**Gambar 4.20** Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 0 hari hingga 32 hari)



**Gambar 4.21** Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 40 hari hingga 80 hari)





**Gambar 4.22** Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Hambalang tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 0 hari hingga 32 hari)



**Gambar 4.23** Gambar sudut joint hasil penelitian clay shale Hambalang tak jenuh dan jenuh dari triaksial di laboratorium (sampel 40 hari hingga 80 hari)

#### 4.4.1 Hubungan Sudut Bidang keruntuhan Teori Dengan Sudut Bidang keruntuhan Hasil Penelitian Clay Shale Tak Jenuh dan Jenuh

Perbedaan antara sudut bidang keruntuhan keputuan penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) dari clay shale Semarang-Bawen dibentangkan di dalam graf seperti pada Gambar 4.24 berikut. Pada clay shale Semarang-Bawen terjadi bahwa sudut bidang keruntuhan rata-rata tak jenuh adalah lebih besar daripada sudut bidang keruntuhan rata-rata jenuh. Pada clay shale Semarang-Bawen tak jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $73.1^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $77^\circ$ , sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 5% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Semarang-Bawen jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $61.8^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) sebesar  $61^\circ$ . Sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih besar 0.6% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 4.24.

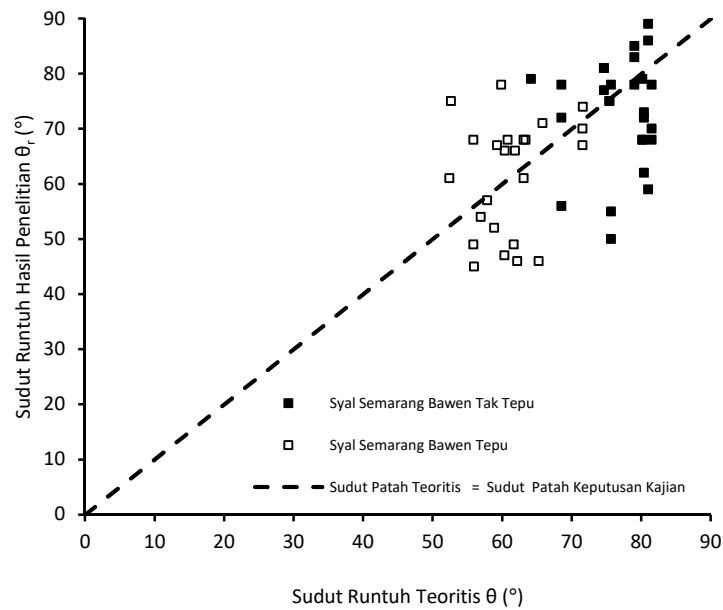
Pada clay shale Hambalang didapati bahwa sudut bidang keruntuhan rata-rata tak jenuh adalah lebih besar daripada sudut bidang keruntuhan rata-rata jenuh. Pada clay shale Hambalang tak jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah 67.9 dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $77.1^\circ$ , sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 11.6% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Hambalang jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $61.3^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $63.2^\circ$ . Sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian adalah lebih kecil 3% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Hambalang dapat dilihat pada Gambar 4.25.

Perbedaan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian dan sudut bidang keruntuhan teori karena disebabkan oleh beberapa faktor. Yaitu faktor joint dari clay shale akibat pelapukan, di mana pada faktor ini sudah termasuk di dalamnya jumlah

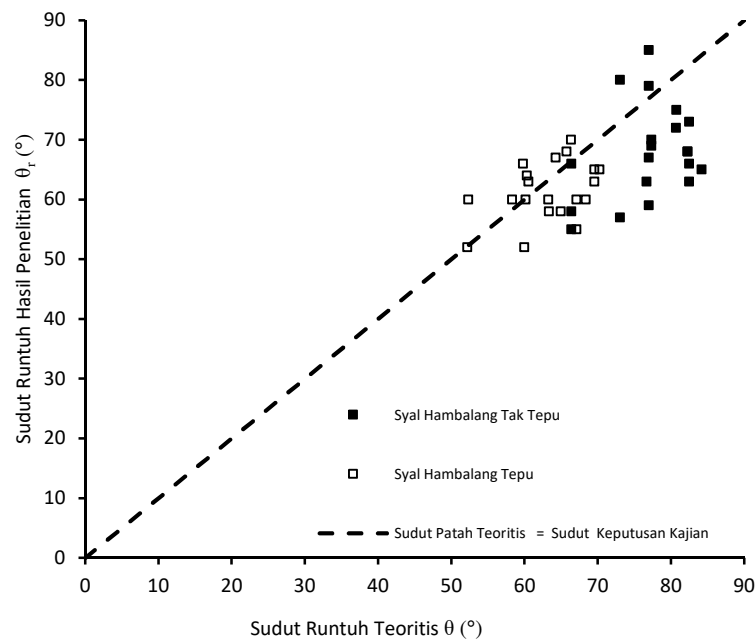
joint serta orientasinya yang berbeda. Tegangan ekapaksi daripada jisim batuan telah diwakili dalam bentuk bukan dimensi sebagai ratio kekuatan mampatan antara batu joint dengan batu kukuh. Dalam kasus modulus elastik, ratio modulus elastik batuan joint dengan batu kukuh, perbezaan tegangan keliling digunakan di dalam analisis. Kasus daripada batu joint pada jisim batuan diambil kira dengan faktor joint ( $F_j$ ). Manakala faktor joint adalah ditakrifkan sebagai fungsi frekuensi joint, orientasi joint, dan kekuatan joint (Jade dan Sitharam, 2013). Perkara yang terpenting di dalam penelitian ini adalah, ratio kekuatan mampatan akan sangat bergantung hasilnya terhadap faktor joint ( $J_f$ ) ia akan berkurang dengan bertambahnya faktor joint seperti pada Gambar 2.10 pada penelitian literatur di Bab 2.

Dari uji triaksial mampatan batuan lempung, selimut keruntuhan mengikuti keruntuhan Coulomb, di mana kekuatan geser bertambah secara lurus bila tegangan normal bertambah. Sudut joint yang terjadi pada sampel uji triaksial tarikan mengikuti bentuk sampel A sebagaimana pada Gambar 2.23 (Barton, 2014). Pada Gambar 4.26, manakala sudut joint yang terjadi pada sampel uji triaksial mampatan mengikuti bentuk sampel B, C, D atau E, dan sangat bergantung kepada magnitud tegangan yang diperlukan hingga sampel hancur dan mencapai tegangan puncaknya (Barton, 2014). Dari uji clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang, sudut joint yang terjadi mengikut seperti sampel B, sampel C atau sampel D sebagaimana pada Gambar 2.23.

Penelitian terdahulu dalam usaha untuk mengetahui kasus sudut joint ( $\theta$ ) di dalam kecenderungan kelemahan kepada kekuatan mampatan, adalah berbeza-beza dalam rentang ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) dengan perbezaan perubahan  $5^\circ$ . Hasil berangka dan hasil analisis dibandingkan dan numerik ditunjukkan dalam Tabel 4.9 yang menunjukkan bahwa kecenderungan yang berbeza bidang joint hasil daripada penyelesaian numerik dan penyelesaian analisis adalah hampir sama dan hanya menunjukkan beberapa perbezaan apabila  $\theta = 10^\circ$ . Kekuatan mampatan 8.582 kPa untuk hasil penyelesaian berangka, dan 8.578 kPa untuk hasil penyelesaian analisis, di mana perbezaan adalah lebih kecil daripada 1% (Zhao, 2011)



**Gambar 4.24** Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Semarang-Bawen



**Gambar 4.25** Hubungan antara sudut bidang keruntuhan hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dengan sudut bidang keruntuhan teori ( $\theta$ ) pada sampel tak jenuh dan jenuh clay shale Hambalang

**Tabel 4.9** : Kasus sudut joint ( $\theta$ ) pada perbandingan antara metode numerikal dan hasil analitik untuk uji UCS dalam kPa (Zhao, 2011)

$\theta$ ( $^{\circ}$ )	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	86	90
Solusi Numerikal	8.6	8.6	6.60	4.7	3.9	4.6	3.5	3.6	3.9	4.7	6.5	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
Solusi Analitik	8.6	8.6	6.5	4.7	3.9	3.6	3.5	3.6	3.9	4.7	6.5	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6

#### 4.4.2 Pengaruh Waktu Pengeringan Terhadap Sudut Joint Clay Shale Tak Jenuh dan Jenuh

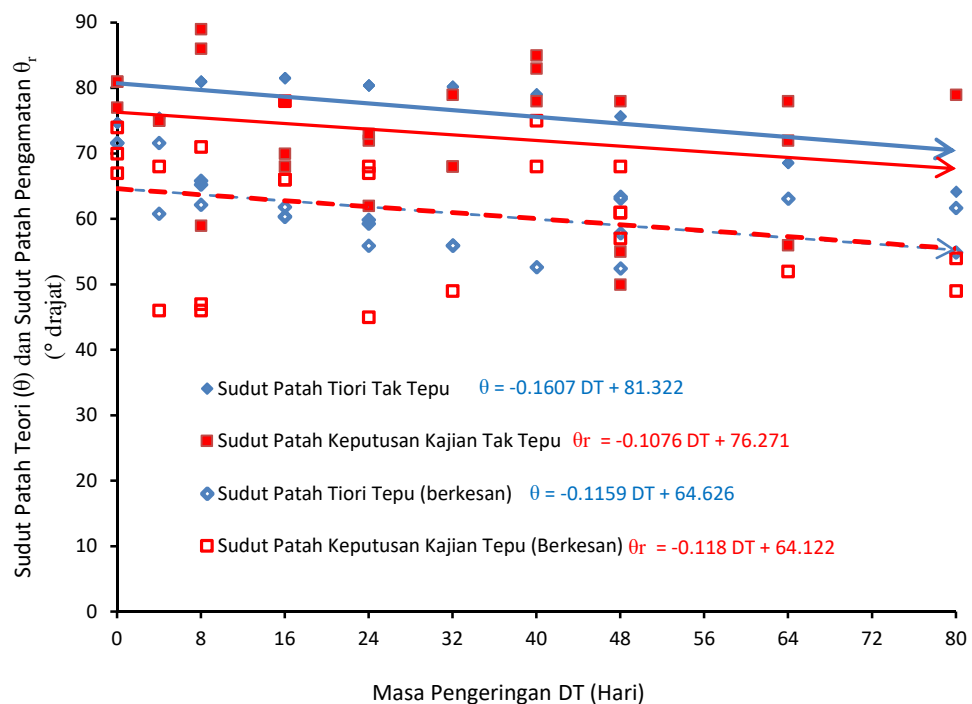
Perubahan sudut joint hasil penelitian ( $\theta_r$ ) dan sudut joint teori ( $\theta$ ) pada keadaan tak jenuh dan jenuh akibat proses pengeringan hingga waktu hari-80 pada clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 4.24. Pada gambar tersebut juga dibedakan pada keadaan tegangan jumlah dan tegangan efektif. Melalui persamaan regresi yang terjadi diperoleh hasil kuantitatif yaitu perubahan sudut joint dari keadaan awal hingga hari ke-80 proses pengeringan.

Pada clay shale Semarang-Bawen, keadaan asal sampel tak jenuh sudut joint teori ( $\theta$ ) adalah  $80.7^{\circ}$  berkurang menjadi  $70.4^{\circ}$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 87.3%. Manakala pada keadaan asal sampel tak jenuh sudut joint hasil penelitian ( $\theta_r$ ) adalah  $76.3^{\circ}$  berkurang menjadi  $67.7^{\circ}$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 88.7%. Pada sampel jenuh, sudut joint teori ( $\theta$ ) adalah  $64.6^{\circ}$  berkurang menjadi  $55.2^{\circ}$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 85.5%. Manakala pada keadaan asal sampel jenuh sudut joint hasil penelitian ( $\theta_r$ ) adalah  $64.6^{\circ}$  berkurang menjadi  $55.5^{\circ}$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau tinggal 85.9%. Hasil kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Semarang-Bawen pada sampel tak jenuh dan jenuh dapat dilihat pada Gambar 4.26.

Hasil penelitian pada clay shale Hambalang, keadaan asal sampel tak jenuh sudut joint teori ( $\theta$ ) adalah  $80^{\circ}$  berkurang menjadi  $64.2^{\circ}$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 80.2%. Manakala pada keadaan asal sampel tak jenuh sudut joint

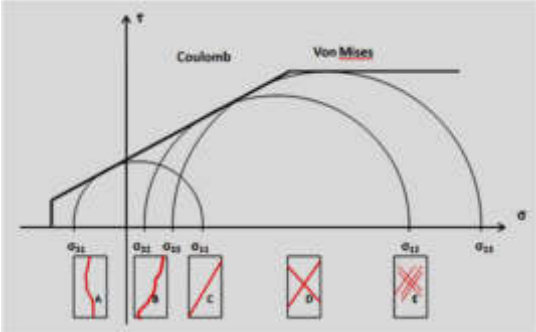
hasil penelitian ( $\theta_r$ ) adalah  $70.8^\circ$  berkurang menjadi  $64.1^\circ$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau tinggal 90.6%. Pada sampel jenuh, sudut joint teori ( $\theta$ ) adalah  $66.9^\circ$  berkurang menjadi  $58.6^\circ$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 87.6%. Manakala pada keadaan asal sampel tak jenuh sudut joint hasil penelitian ( $\theta_r$ ) adalah  $65.5^\circ$  berkurang menjadi  $56.2^\circ$  pada waktu hari ke-80 proses pengeringan atau 85.8%. Hasil kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Hambalang pada sampel tak jenuh dan jenuh dapat dilihat pada Gambar 4.27.

Hasil hasil penelitian hubungan sudut joint teori dengan sudut joint hasil penelitian dan kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint hasil penelitian clay shale tak jenuh dan jenuh dapat dilihat pada Tabel 4.10. Pada tabel tersebut juga terdapat penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian.

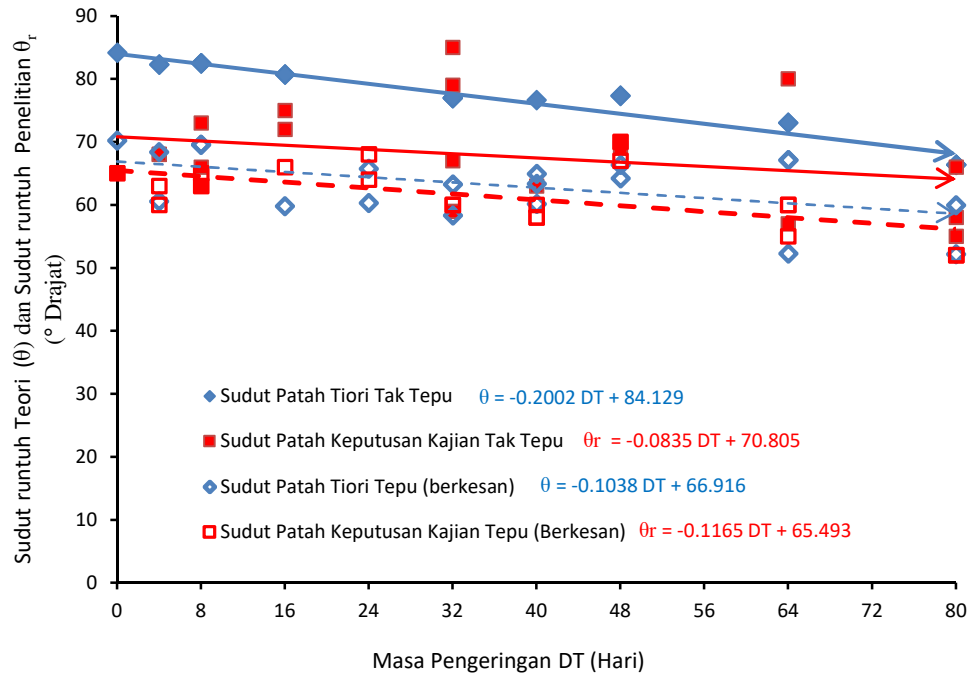


**Gambar 4.26** Kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Semarang-Bawen pada sampel tak jenuh dan jenuh

**Tabel 4.10** : Hasil penelitian mengenai perbedaan antara kekuatan geser pada tegangan total dan tegangan efektif.

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>a. Kasus dari pada batuan joint pada jisim batuan diambil kira dengan faktor joint (<math>J_f</math>). Manakala faktor joint adalah dimaksudkan sebagai fungsi frekuensi joint, orientasi joint, dan kekuatan joint (Jade dan Sitharam, 2013).</p> <p>b. Sudut joint sampel uji triaksial regangan mengikuti bentuk sampel A. Manakala sudut joint pada sampel uji triaksial mampatan mengikuti bentuk sampel B, C, D atau E (Barton, 2014).</p>	<p><b>Perubahan sudut joint rata-rata hasil penelitian (<math>\theta_r</math>) dan teori (<math>\theta</math>).</b></p> <p><b>Clay shale Semarang-Bawen</b></p> <p>a. Pada sampel tak jenuh, <math>\theta_r = 73.1^\circ</math> dan <math>\theta = 77^\circ</math>, <math>\theta_r</math> berkurang 5% dari <math>\theta</math></p> <p>b. Pada sampel jenuh, <math>\theta_r = 61.8^\circ</math> dan <math>\theta = 61^\circ</math>, <math>\theta_r</math> bertambah 0.8% dari <math>\theta</math>.</p> <p><b>Clay shale Hambalang</b></p> <p>c. Pada sampel tak jenuh, <math>\theta_r = 67.9^\circ</math> dan <math>\theta = 77.1^\circ</math>, <math>\theta_r</math> berkurang 11.6 % dari <math>\theta</math></p> <p>d. Pada sampel jenuh, <math>\theta_r = 61.3^\circ</math> dan <math>\theta = 63.2^\circ</math>, <math>\theta_r</math> bertambah 3 % dari <math>\theta</math>.</p>
	<p><b>Kasuspengeringan terhadap sudut joint hasil penelitian (<math>\theta_r</math>) dan teori (<math>\theta</math>).</b></p>
<p>c. Hasil berangka dan hasil perbezaan analisis dan numerikal menunjukkan bahawa kecenderungan yang berbeza bidang joint hasil daripada penyelesaian numerikal dan penyelesaian analisis yang hampir sama. Perbezaan adalah lebih kecil daripada 1% (Zhao, 2011)</p>	<p><b>Clay shale Semarang-Bawen</b></p> <p>e. Waktu asal sampel tak jenuh <math>\theta = 80.7^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta = 70.4^\circ</math>, atau 87.3%</p> <p>f. Waktu asal sampel tak jenuh <math>\theta_r = 76.3^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta_r = 67.7^\circ</math>, atau 87.7%</p> <p>g. Waktu asal sampel jenuh <math>\theta = 64.6^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta = 55.2^\circ</math>, atau 85.5%</p> <p>h. Waktu asal sampel jenuh <math>\theta_r = 64.6^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta_r = 55.5^\circ</math>, atau 85.9%</p> <p><b>Clay shale Hambalang</b></p> <p>i. Waktu asal sampel tak jenuh <math>\theta = 80^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta = 64.2^\circ</math>, atau 80.2%</p> <p>j. Waktu asal sampel tak jenuh <math>\theta_r = 70.8^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta_r = 64.1^\circ</math>, atau 90.6%</p> <p>k. Waktu asal sampel jenuh <math>\theta = 66.9^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta = 58.6^\circ</math>, atau 87.6%</p> <p>l. Waktu asal sampel jenuh <math>\theta_r = 65.5^\circ</math> dan hari ke-80 <math>\theta_r = 56.2^\circ</math>, atau 85.8%</p>





**Gambar 4.27** Kasus proses pengeringan terhadap perubahan sudut joint clay shale Hambalang pada sampel tak jenuh dan jenuh.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dalam bab ini, kesimpulan dibuat berdasarkan hasil penelitian serta analisis dan pembahasan penelitian kasus pelapukan terhadap kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang. Kesimpulan juga berdasarkan pada pengaruh proses pelapukan terhadap perilaku sampel clay shale di dalam pengujian triaxial UU test.

Uji triaksial clay shale dengan tahap berbilang pada setiap sampelnya telah diperoleh kekuatan geser pada tegangan puncak ( $c$  dan  $\phi$ ), serta kekuatan geser pada tegangan residual ( $c_r$  dan  $\phi_r$ ). Penentuan kekuatan geser residual clay shale menggunakan uji triaksial dengan tahap berbilang dilakukan tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$  dan  $\phi_{rp}$ ) dan dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$  dan  $\phi_{rf}$ ). Uji ini adalah uji triaksial dengan deformasi besar '*large displacement*' dan perilakunya sangat sesuai untuk disain kestabilan lereng. Apabila terjadi gelongsoran maka terjadi pula anjakan yang besar. Metode ini baru pertama kali digunakan di dalam penelitian seumpamanya. Uji kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan ( $c_{rp}$  dan  $\phi_{rp}$ ) dapat digunakan di dalam penentuan kekuatan geser residual pada kasus kestabilan lereng clay shale yang terjadi keruntuhan dan tiada kerja-kerja penggalian semasa pekerjaan, sehingga tidak terjadi pelepasan tegangan. Manakala uji kekuatan geser

residual dengan pelepasan tegangan ( $c_{rf}$  dan  $\phi_{rf}$ ), dapat digunakan dalam penentuan kekuatan geser residual pada kasus skestabilan lereng clay shale yang terdapat joint serta keruntuhan semasa pekerjaan yang melibatkan kerja-kerja penggalian sebelum dilakukan penimbunan. Pelepasan tegangan dalam penentuan kekuatan geser residual untuk keperluan skestabilan lereng yang telah runtuh, akibat kerja galian pada lereng clay shale sememangnya belum pernah dikaji sebelum ini dan metode ini sesuai untuk digunakan pada masa depan.

Pada clay shale Semarang Bawen akibat pelapukan, perbezaan kohesi efektif terhadap efektif total dalam satuan  $\text{kN/m}^2$  dipresentasikan seperti persamaan linier  $c' = 0.9868 c_t + 0.4546$ . Sedang perbezaan sudut geser dalamnya mengikuti persamaan berikut  $\phi' = 1.0007 \phi + 0.3549$ . Dapat disimpulkan pada clay shale Semarang-Bawen kohesi efektif sedikit lebih kecil dari pada kohesi totalnya, sedangkan sudut geser dalam efektif lebih besar dibandingkan sudut geser totalnya.

Pada clay shale Hambalang akibat pelapukan, perbezaan kohesi efektif terhadap efektif total dalam satuan  $\text{kN/m}^2$  dipresentasikan seperti persamaan linier  $c' = 0.9912 c_t + 0.4239$ . Sedang perbezaan sudut geser dalamnya mengikuti persamaan berikut  $\phi' = 1.0064 \phi + 0.1686$ . Dapat disimpulkan pada clay shale Hambalang sama seperti clay shale Semarang Bawen, kohesi efektif sedikit lebih kecil dari pada kohesi totalnya, sedangkan sudut geser dalam efektif lebih besar dibandingkan sudut geser totalnya.

Pada clay shale Semarang-Bawen tak jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $73.1^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $77^\circ$ , sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 5% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Semarang-Bawen jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $61.8^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) sebesar  $61^\circ$ . Sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih besar 0.6% daripada sudut bidang keruntuhan teori. Pada clay shale Hambalang tak jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $67.9^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $77.1^\circ$ , sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian lebih kecil 11.6% daripada sudut bidang

keruntuhan teori. Manakala pada clay shale Hambalang jenuh, sudut bidang keruntuhan hasil penelitian rata-rata ( $\theta_r$ ) adalah  $61.3^\circ$  dan sudut bidang keruntuhan teori rata-rata ( $\theta$ ) adalah  $63.2^\circ$ . Sudut bidang keruntuhan rata-rata hasil penelitian adalah lebih kecil 3% daripada sudut bidang keruntuhan teori.

## **5.2 Saran**

Perlunya dilanjutkan penelitian perihal clay shale ini di masa yang akan datang terutama mengenai aplikasi perancahan infrastruktur yang melalui daerah clay shale. Mengingat perkembangan jaringan transportasi nasional sangat memerlukan rekayasa geoteknik terutama di tanah tanah yang bermasalah, termasuk clay shale.

## REFERENSI

- Ajmera, B., Tiwari, B. and Shrestha, D. (2012). Effect of Mineral Composition and Shearing Rates on the Undrained Shear Strength of Expansive Clays *GeoCongress 2012* © ASCE 2012
- Alatas I. M. (2010). Soil Investigation Report : Pusdiklat Dan Sekolah Olah Raga Nasional, Hambalang, Sentul, Jawa Barat. In *Final Report Soil Investigation*. Jakarta: Geoinves Soil Mechanics Laboratory, Jakarta.
- Alonso, E. E. and Pineda, J. A. (2008). Weathering and degradation of shales: experimental observations and models of degradation. In *Department of Geotechnical Engineering and Geosciences Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain*.
- Anderson, W. F. (1974). The Use Of Multi-Stage Triaxial Tests To Find The Undrained Strength parameters of Stony Boulder Clay. Paper presented at Institution of Civil Engineers, Proceedings.
- Balazs, C. and Akos, D. (2013), Development of Automatic Control of Multistage Triaxial Test at The University of Miskolc, Geosciences and Engineering, Vol. 2, No. 3 (2013), pp. 37–43.
- Barton N (2014). Shear strength of rock, rock joint sand rockmasses – Problems and some solutions. Paper presented at Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, at London.
- Bayin, A., Iyisan, R., Hatipoglu M., Cevikbilen, G. and Isik, A. (2013). The effect of testing methode on residual shear strength of cohesive soil. Paper presented at 2nd. International Balkan Conference on Cahallenges of Civil Eengineering, BCCCE., 23-25 May 2013, at Tirana, Albania.
- Bryson, L. S. and Gutierrez, I. C. G. (2014). Influence of Mineralogy on the Index Properties and Durability of Crushed Shales 288 *Shale Energy Engineering 2014* ©ASCE 2014.
- Bryson, L. S., Gomez, G. and Hopkins T. C. (2011). Correlation between Durability and Geotechnical Properties of Compacted Shales. *Geo-Frontiers 2011* © ASCE 2011.

- Das, B. M (2006). *Principle of Geotechnical Engineering, 7th Edition*. pp (365-373).
- David, N. R. and Timothy, T. W. (1990). Shale Durability Ratio System Based on Loss of Shear Strength. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vo. 116, No 12, December, 1990.
- Dewoolkar, M. M. and Robert, J. H. (2005). Drained residual shear strength of some claystones from Front Range, Colorado. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (12), 1543-1551.
- Emberhardt, E., Thuro, K. and Luginbueh M. (2004). Slope Instability Mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls- The 99 Ruffi landslide Switzerland. *Elsevier*.
- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. and Raharjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal* 500-510 (1988).
- Gan, K.J. and Fredlund, D. G. (1988). Multistage direct shear testing of unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 11, No. , June 1988, pp. 132-138*.
- Gartung, E. (1986). Excavation of The Hard Clays of The Keuper Formation. *Proceeding of Symposium Geotechnical Engineering Division, Seattle, Washington*.
- Geoinves (2010). Laporan Pendugaan Geolistrik Tahanan Jenis Pada Area Diklat Olahraga Nasional, Sentul, Kabupaten Bogor, Propinsi Jawa Barat. In *Final Report Soil Resistivity by Geolistrik 1 D*.
- Geoinves (2014). Laboratory and Field Soil Test Equipment. In *Company Profile PD. Laboratorium Teknik Sipil Geoinves*.
- Goh, S. G., Rahardjo, H. and Leong, E. C. (2010). Shear Strength Equations for Unsaturated Soil under Drying and Wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 4, April 1, 2010*.
- Goh, S. G., Rahardjo, H. and Leong, E. C. (2014). Shear Strength of Unsaturated Soils under Multiple Drying-Wetting Cycles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*
- Gu, X. F., Seidel, J. P. and Haberfield C. M. (2003). Direct Shear Test of Sandstone-Concrete Joints. *Int. J. Geomech., 2003, 3(1): 21-33*.
- Gullic, R. C. (1970). Multi-Stage Shear Testing of a Cohesionless Soil, University of Missouri, Rolla, Missouri.
- Hale, P. A. and Shakoor, A. (2003). A Laboratory Investigation of the Effects of Cyclic Heating and Cooling, Wetting and Drying, and Freezing and Thawing on the

- Compressive Strength of Selected Sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience, Vol. IX, No. 2, May 2003, pp. 117–130.*
- Hatami, K., Esmaili D., Chan E. C. and Miller G. A. (2016). Moisture Reduction Factors for Shear Strength of Unsaturated Reinforced Embankments *International Journal of Geomechanics, © ASCE, ISSN 1532-3641.*
- Himawan, A. (2011). Kajian Geoteknik Dan Usulan Teknis Kemiringan Lereng Galian Man Road STA 22+375 - 22+840 Dan Sekitar Interchange Bawen. In *Technical Report WIJAYA KARYA PT.*
- Ho, D. Y. F. and Fredlund, D. G. (1982). A Multistage Triaxial Test For Unsaturated Soil. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.5 No.1/2, March/June 1982, pp 18-25.*
- Hormdee, D., Kaekeerati, N. and Angsuwotai, P. (2012). Evaluation on The Results of Multistage Shear Test. *Int. J. Of GEOMATE, March 2012, Vol.2, No.1, (SI No.3), PP.140-143.*
- Irsyam, M. Denny, T., Imam, D. S., Suyud, R. K. and Abdul H. T. (1999). Solving Landslide Problem in Shale Cut Slope in The Construction of The Valve Chamber of The TULIS Hydro Electric Power Power. *Proceeding of the '99 Japan Korean Joint Symposium on Rock Mechanics.*
- Irsyam, M., Endra, S. and Himawan, A. (2007). Slope Failure of an Embankment on Clay Shale KM 97+500 Of The Ciparang Toll Road and The Selected Solution : A Case Of Slope Failure Due To Strength Degradation Of Clay Shale. *Proceeding of The Geotechnical International Symposium in Bangkok 6-7 Decemebr 2007.*
- Jade, S. and Sitharam, T. G. (2003). Characterization of Strength and Deformation of Jointed Rock Mass Based on Statistical Analysis. *Int. J. Geomech., 2003, 3(1): 43-54*
- Jaeger, R. C. (1971). Friction of rocks and the stability of rock slopes-Rankine Lecture. *Geotechnique 21 : 97-134.*
- Kamon, M. (1987). Geotechnical Properties and Weathering Joints of Decomposed Granite. Paper presented at Proceeding of 8th ARCSMFE, Vol. 1, 181-184.
- Kim, M. (1979). Multistage Triaxial Testing of Rocks. *Geotechnical Testing Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 98-105.*
- Kulatilake, P. H. S. W., Liang, J. and Gao, H. (2001). Experimental and Numerical Simulation of Jointed Rock Block Strength under Uniaxial Loading. *J. Eng. Mech., 2001, 127(12): 1240-1247*

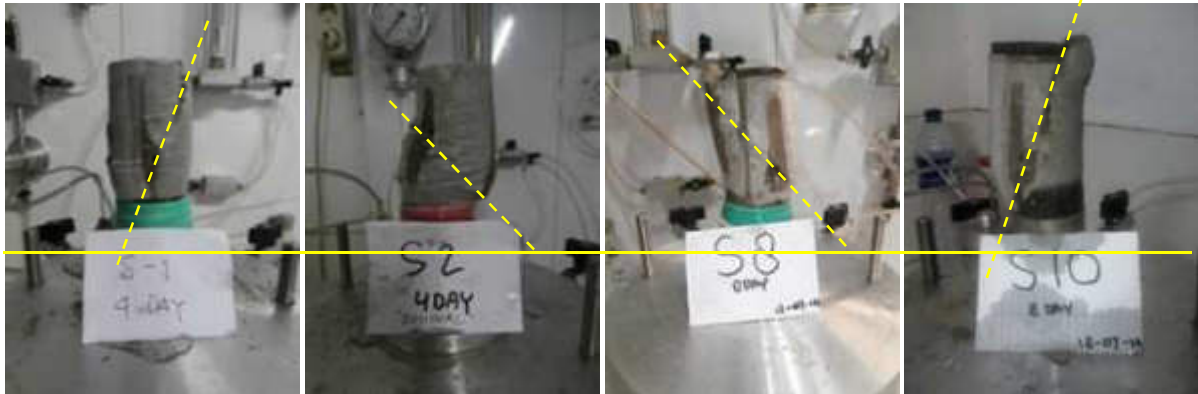
- Ladanyi, B. and Archambault, G. (1970). Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. *Proceedings, 11th Symposium on Rock Mechanics (AIME)*, pp. 105-125.
- Mandar, M. D. and Robert, J. H. (2005). Drained Residual Shear Strength of Some Claystones from Front Range, Colorado. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 12, December 1, 2005*.
- Mark, G. T. (2007). Geotechnical Challenges of The Weak Shale Units of North Texas. *Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization, Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics*.
- Mesri, G. C. and Diaz, A. F. (1986). Residual shear strength of clays and shales. *University of Illinois at Urbana-Champaign*.
- Mesri, G. and Shahien, M. (2003). Residual Shear Strength Mobilized in First-Time Slope Failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 1, January 1, 2003*.
- Mesri, G. Shahien, M. (2004). Discussion of ‘‘Residual Shear Strength Mobilized in First-Time Slope Failures. *Jurnal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering © ASCE / May 2004*.
- Nam, S. (2011). Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology 122 (2011) 272–280*.
- Pineda, J. A. (2007). An experimental and constitutive study on the degradation and swelling of argillaceous rocks, Technical University of Catalonia, UPC, Barcelona.
- Pineda, J.A., Alonso, E. E. and Romero, E. (2014a). Environmental degradation of claystones. *Geotechnique, 64 64-82 (2014)*
- Pineda, J. A., Romero, E., De Gracia, M. and Sheng, D. (2014b). Shear strength degradation in claystones due to environmental effects', . *Geotechnique, 64 493-501 (2014)*.
- Powell, J. S., Siemens, G. A., Take, W. A. and Remenda, V. H. (2013). Characterizing the swelling potential of Bearpaw clayshale. *Engineering Geology 158 (2013) 89–97*.
- Ravi, S. M. S., Christopher, D. P. B., Kathryn, M., Hans, V. and Narayanasamy, R. (2011). Strength of Weakly Cemented Sands from Drained Multistage Triaxial Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 12, December 1, 2011*.
- Reißmüller, M. (1977). Geotechnische Eigenschaften Verwitterter Kössener Mergel, Technical University of Munich, Munich.



- Rodgers, M. A., Kielty, and Healy, M. G. (2014). Performance of Granitic, Shale, and Limestone Forest Road Aggregates Subjected to Repeated Loading. *Journal of Transportation Engineering*, © ASCE,.
- Sadisun, I. A., Shimadai, H., Ichinosei, M. and Matsui, K. (2005). Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. *Geotechnical and Geological Engineering (2005) 23: 199–218*.
- Sadisun, I. A., Andri S. S., Asep, N. and Prihananto, S. (2006). Weathering Of Some Selected Rock Types And Their Strength Degradation Obtained From Schmidt Hammer. *Proceeding PIT IAGI Riau, The 35th IAGI Annual Convention and Exhibition ,Pekanbaru – Riau, 21 – 22 November 2006*.
- Sadisun, I. A., Bandonu, Shimada, H., Ichinose, M., and Matsui, K. (2010). Physical Disintegration Characterization of Mudrocks Subjected to Slaking Exposure and Immersion Tests. *Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 5 No. 4 Desember 2010: 219-225*.
- Sadisun I, A., Hideki, S., Ichinose, M. and Matsui, K. (2002). An experimental study of swelling strain in some argillaceous rocks by means of an improved unconfined swelling test. *Rock Engineering Problems and Approches in Underground Constuction, Choi, Ryu, Jeon & Moon (eds)*.
- Sadisun, I. A., Hideki, S., Ichinose, M. and Matsui, K. (2003). Experimental Insights on the Characteristics of Rock Slaking with Particular Reference to the Sedimentary Argillaceous Rocks. *Department of Geology, Bandung Institute of Technology, INDONESIA*.
- Sadisun, I. A., Hideki, S. and Matsui, K. (2001). Determination of Strength Degradation of Subang Formation Claystone Due to Weathering. Paper presented at Proceeding of the 3rd Asian Symposium on Engineering Geology and the Environment (ASEGE) at Yogyakarta, September 3 - 6, 2001.
- .
- Skempton, A. W. (1977). *Slope Stability of Cuttings in Brown Clay*. Tokyo.
- Tien, H. Wu., Richard, L. W., John, E. L. and Pinnaduwa, H. S. W. K. (1987). Stability Of Slope In Red Conemaugh Shale Of Ohio. *Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 3, March, 1987..*
- Timothy, D. S., Hangseok, M. C. and Sean (2005). Drained Shear Strength Parameters for Analysis of Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 5, May 1, 2005*.

- Timothy, D. S., Arellano, W. D., Ryan, P. H., Roger, M. H., Norman, J. and Hillebrandt, D. (2005). Effect of Toe Excavation on a Deep Bedrock Landslide. *Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 19, No. 3, August 1, 2005*.
- Timothy, D. S., Hangseok, M. C. and Sean (2005). Drained shear strength parameters for analysis of landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (5), 575-588.
- Timothy, D. S. and Duncan, M. (1991). Mechanisms of strength loss in stiff clays. *Journal of Geotechnical Engineering*. 117 (1), 139-154.
- Timothy, D. S. and Hisham, T. E. (1994). Drained residual strength of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. 120 (5), 856-871.
- Timothy, D. S. and Hisham, T. E. (1992). Comparison of field and laboratory residual strength. *Stability and performance of slopes and embankments II Proceeding GT Div*.
- Youn, H. and Tonon, F. (2010). Effect of air-drying duration on the engineering properties of four clay-bearing rocks in Texas. *Engineering Geology 115 (2010) 58-67*.
- Zhao, Q. and He, Z. M. (2011). The Ubiquitous-joint Model and Its Application in Predicting the Strength of Stratified Rock *Geotechnical Special Publication No. 222 © ASCE 2011( Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior )*.

LAMPIRAN

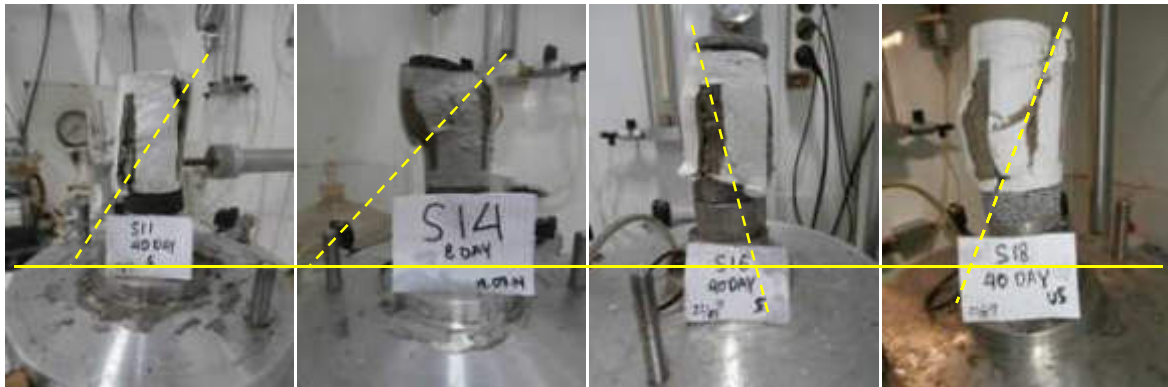


$\psi$  S1 = 68

$\psi$  S2 = 46

$\psi$  S2 = 47

$\psi$  S10 = 71

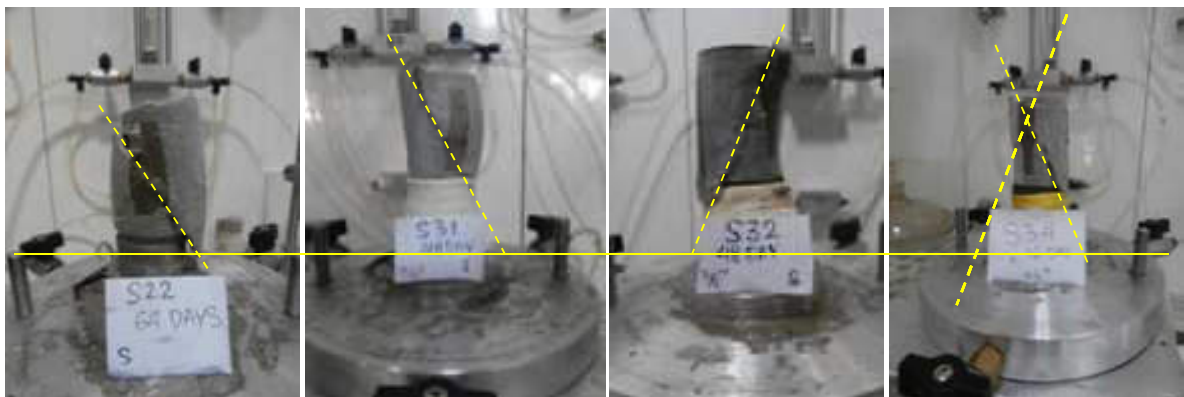


$\psi$  S11 = 57

$\psi$  S14 = 46

$\psi$  S16 = 75

$\psi$  S18 = 68



$\psi$  S22 = 57

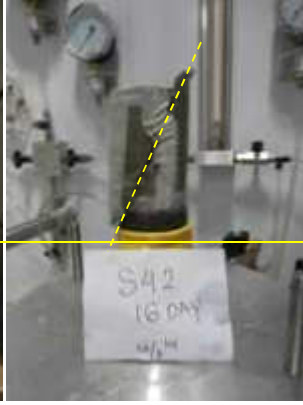
$\psi$  S31 = 61

$\psi$  S32 = 68

$\psi$  S34 = 78;68



$\psi$  S41 =66



$\psi$  S42 = 66



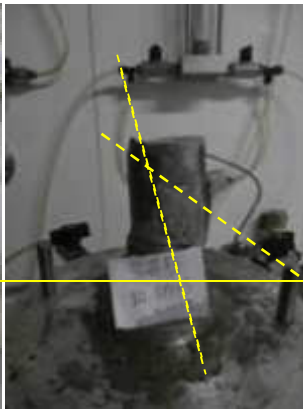
$\psi$  S43 = 24



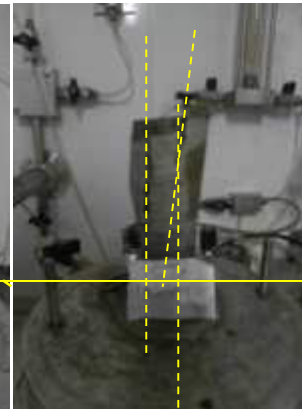
$\psi$  S45 =49



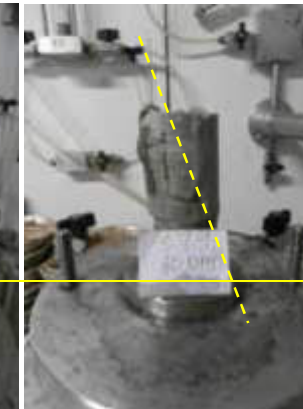
$\psi$  S46 =57



$\psi$  S65 = 74;36



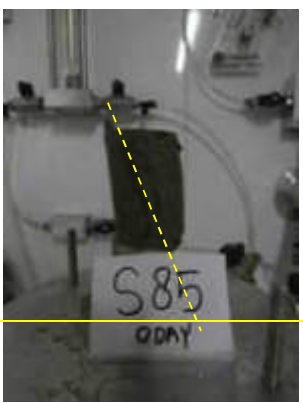
$\psi$  S78 = 89;84



$\psi$  S79 =69



$\psi$  S84 =46



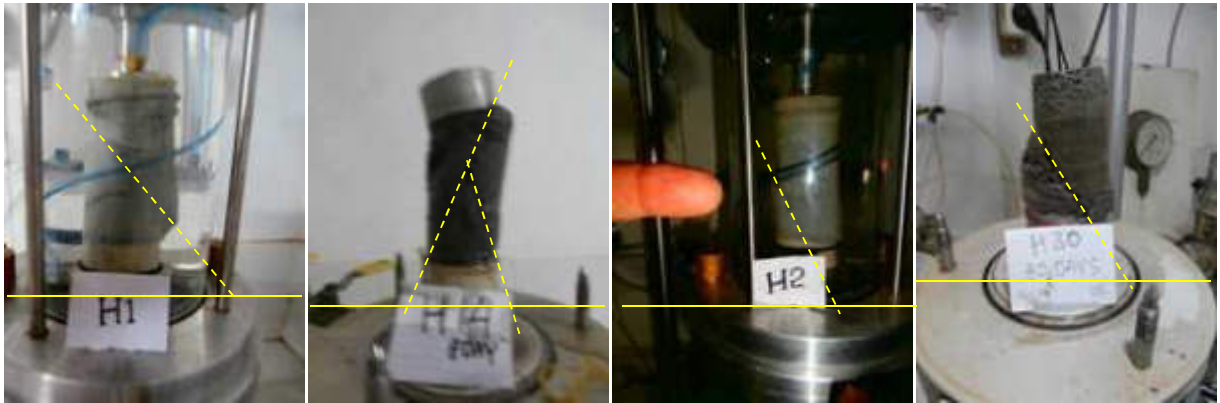
$\psi$  S85 = 67



$\psi$  S86 =74



$\psi$  S87 =70

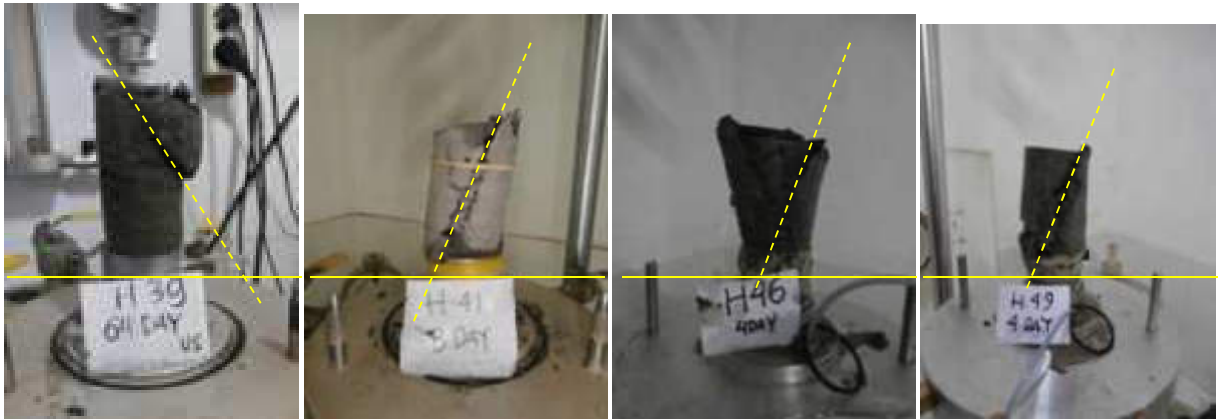


$\psi$  H1 = 51

$\psi$  H14 = 66;73

$\psi$  H2 = 65

$\psi$  H30 =58

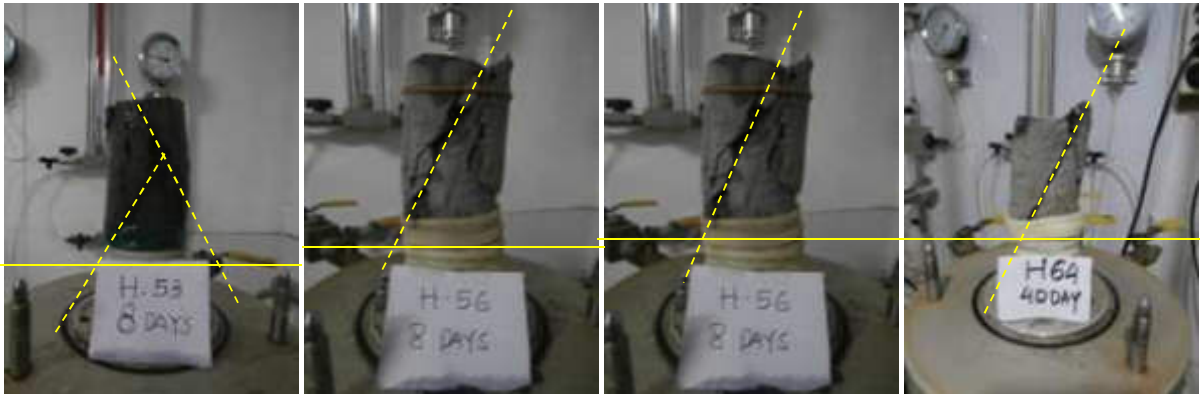


$\psi$  H39 = 57

$\psi$  H41 = 66

$\psi$  H46 = 68

$\psi$  H49 =68

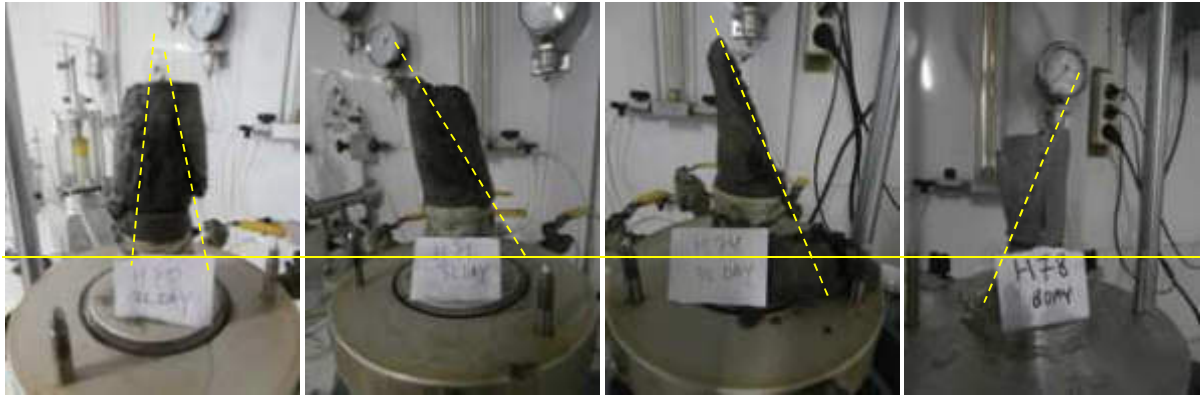


$\psi$  H53 = 57;63

$\psi$  H56 = 63

$\psi$  H56 = 66

$\psi$  H64=63

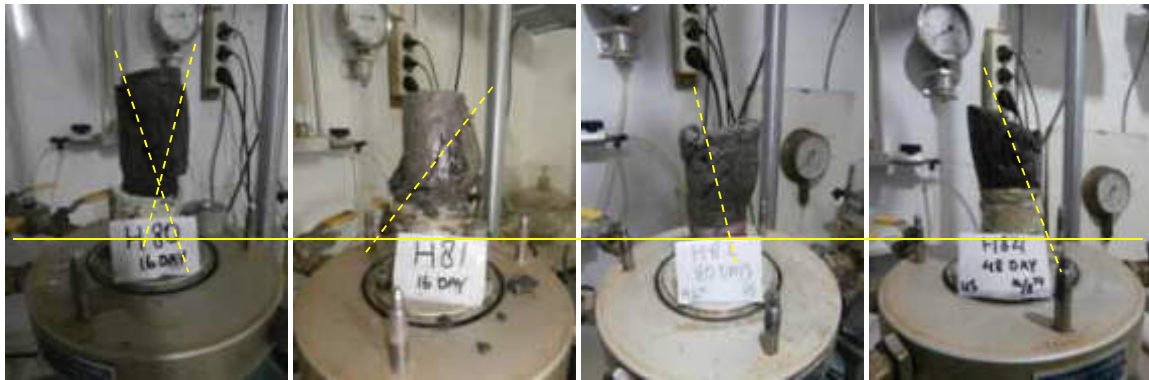


$\psi$  H70 = 79;85

$\psi$  H71 = 59

$\psi$  H74 = 67

$\psi$  H78=67



$\psi$  H80 = 75;72

$\psi$  H81 =50

$\psi$  H82 = 78

$\psi$  H84=70

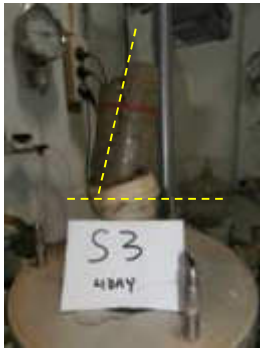


$\psi$  H85 = 69

$\psi$  H87 = 55

$\psi$  H89 = 66

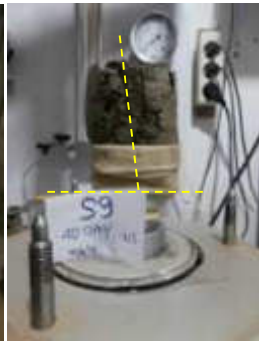
$\psi$  H91=80



$\psi$  S3 = 75°



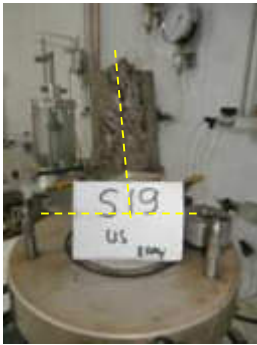
$\psi$  S5 = 75°



$\psi$  S9 = 83°



$\psi$  S12 = 86°



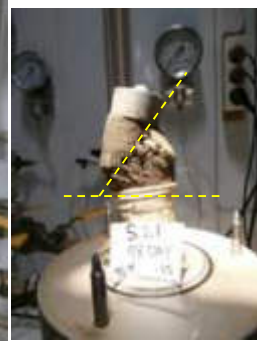
$\psi$  S17 = 85°



$\psi$  S19 = 59°



$\psi$  S20 = 82°



$\psi$  S21 = 55°



$\psi$  S23 = 68°



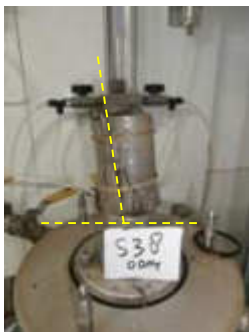
$\psi$  S27 = 78°



$\psi$  S33 = 72°



$\psi$  S37 = 77°



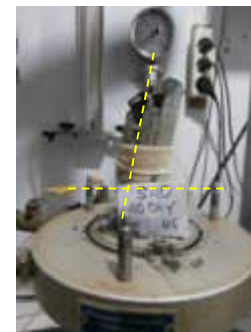
$\psi$  S38 = 81°



$\psi$  S39 = 81°



$\psi$  S39 = 0°



$\psi$  S40 = 78°



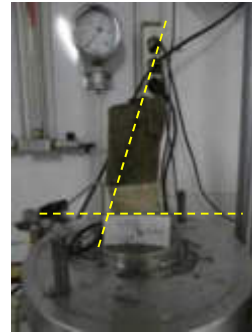
$\psi$  S52 = 50<sup>0</sup>



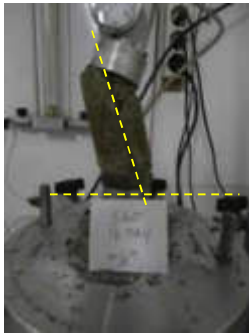
$\psi$  S55 = 70<sup>0</sup>



$\psi$  S56 = 56<sup>0</sup>



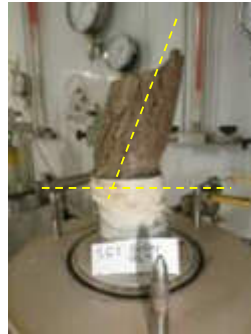
$\psi$  S59 = 73<sup>0</sup>



$\psi$  S60 = 72<sup>0</sup>



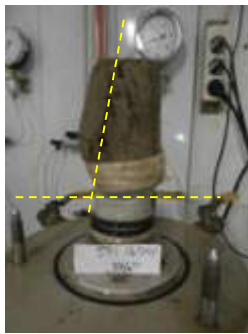
$\psi$  S61 = 0<sup>0</sup>



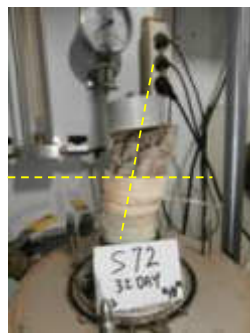
$\psi$  S62 = 68<sup>0</sup>



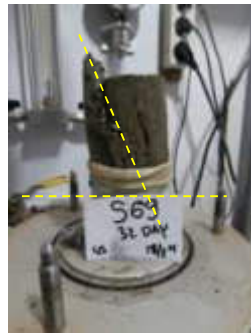
$\psi$  S66 = 79<sup>0</sup>



$\psi$  S69 = 79<sup>0</sup>



$\psi$  S71 = 78<sup>0</sup>



$\psi$  S72 = 68<sup>0</sup>

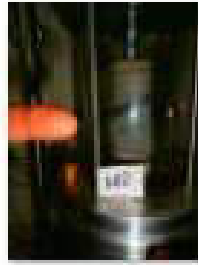


$\psi$  S80 = 78<sup>0</sup>





H1



H2



H14



H30



H39



H41



H64



H70



H71



H74



H78



H80



H89



H91



H46



H49



H53



h56 8 days



H56



H81



H82



H84



H85



H87



S3



S5



S9



S-12



S17



S19



S37



S38



S39 o day



S39



S40



S52



S62



S66



S69



S71



S72



S80



S1



S2



S8



S10



S11



S14



S34



S41



S42



S43



S45



S46



S86



S87



S16



S18



S22



S31



S32



S65



S78



S79



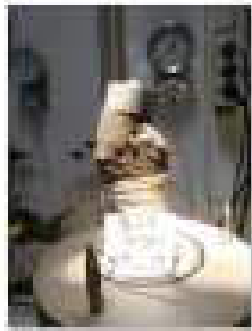
S84



S85



S20



S21



S23



S27



S33



S55



S56



S59



S60



S61