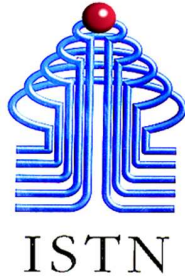


**LAPORAN
PENELITIAN DOSEN**



**PENGARUH PELAPUKAN *CLAY SHALE* TERHADAP
KELONGSORAN DI JALAN TOL SEMARANG –BAWEN
STA 19+250, JAWA TENGAH**

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
2017**

PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN

- 1 Judul Penelitian : PENGARUH PELAPUKAN *CLAY SHALE* TERHADAP
KELONGSORAN DI JALAN TOL SEMARANG –BAWEN
STA 19+250, JAWA TENGAH
- 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 Semarang-Bawen , Jawa Tengah
- 5 Jumlah biaya : Rp. 15.000.000,-

Jakarta, Agustus 2017

**Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknik Sipil**



Ir. Marsiano, MT

Ketua Peneliti



Ir. Idrus M. Alatas M.Sc

**Menyetujui,
Ketua LP2M – ISTN**



DR. Ir. Syamsul Elyumin MSc

DAFTAR ISI

Bab	Perihal	Halaman
	Daftar isi	i
	Kata Pengantar	v
	Daftar Gambar	vi
	Daftar Tabel	xiv
	Abstrak	xvii
BAB 1	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang Penelitian	2
1.2	Pernyataan Masalah	3
1.3	Tujuan dan Objektif Penelitian	5
1.4	Lingkup Penelitian	6
1.5	Kepentingan Penelitian	8
1.6	Susunan Pelaporan Penelitian	9
BAB 2	STUDI LITERATUR	10
2.1	Pendahuluan	10
2.2	Perilaku Clay Shale	11
2.3	Kekuatan Geser Clay Shale	11
2.3.1	Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb	12
2.3.2	Pola Bidang Keruntuhan	13
2.3.3	Hasil Kekuatan Geser Clay Shale	15
2.4	Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Proses Pelapukan	18
2.5	Penentuan Kekuatan Geser Dengan Sistem Tahap Berbilang (<i>multistage system</i>)	21
2.6	Faktor Keamanan Pada Skestabilan Lereng	24
2.6.1	Metode Kesetimbangan Batas	25

2.6.2	Faktor Keamanan Dengan Metode Irisan	25
2.6.3	Penentuan Faktor Keamanan Lereng Dengan Metode Unsur Berhingga	29
2.7	Penentuan Kekuatan Geser Ketika Keruntuhan Lereng	31
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1	Pendahuluan	34
3.2	Metode Core Barrel Lama Dan Hasil Temuan	35
3.3	Penyelidikan Lapangan	38
3.3.1	Penyelidikan Tanah	38
3.3.2	Topografi	38
3.4	Metode Persampelan Ujian Triaksial	39
3.5	Uji Laboratorium Mekanik Tanah	41
3.5.1	Uji Sifat-Sifat Indek Clay Shale	41
3.5.2	Uji Triaksial Unconsolidated Undrained (<i>UU Triaxial</i>)	41
3.5.2.1	Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Serta Siklus Pembasahan dan Pengeringan	41
3.5.2.2	Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Clay Shale Tak Jenuh	42
3.5.2.3	Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Sampel Clay Shale Jenuh	45
3.5.3	Proses Pelapukan di Laboratorium	45
3.6	Rencana Uji Laboratorium	49
3.7	Jenis dan Lokasi Laboratorium Penguji	51
BAB 4	UJI AWAL CLAY SHALE DI LAPANGAN DAN DI LABORATORIUM	52
4.1	Pendahuluan	52
4.2	Hasil Uji di Lapangan	53
4.2.1	Topografi	53
4.2.2	Penelitian Geologi	55
4.2.3	Pengeboran	57

4.2.4	Standard Penetration Test (SPT)	58
4.3	Uji Awal di Laboratorium	59
4.4	Sifat Mekanik Dengan Uji Triaksial Tak Tersalir (UU)	60
4.4.1	Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Clay Shale Tak Jenuh	61
4.4.2	Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Dengan Metode Tahap Berbilang	62
4.4.3	Kekuatan Geser Pada Clay Shale Tak Jenuh	63
4.4.4.	Kekuatan Geser Pada Clay Shale Jenuh	63
BAB 5	PENGARUH PELAPUKAN TERHADAP KEKUATAN GESER CLAY SHALE	69
5.1	Pendahuluan	69
5.2	Penentuan Kekuatan Geser Residual Dengan Dua Tahap	71
5.3	Perubahan Kekuatan Geser Total Clay Shale Akibat Proses Pengerinan	72
5.3.1	Kohesi Clay Shale Tak Jenuh	73
5.3.2	Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh	74
5.3.3	Kohesi Clay Shale Jenuh	75
5.3.4	Sudut Geser Dalam Clay Shale Jenuh	77
5.4	Perubahan Kekuatan Geser Residual Clay Shale Akibat Proses Pengerinan	82
5.4.1	Kohesi Residual Clay Shale Tak Jenuh	83
5.4.2	Sudut Geser Dalam Residual Clay Shale Tak Jenuh	85
5.4.3	Kohesi Residual Clay Shale Jenuh	87
5.4.4	Sudut Geser Dalam Residual Clay Shale Jenuh	90
5.5	Perbedaan Perilaku Pengurangan Kekuatan Geser Clay Shale Dari Tegangan Puncak Hingga Tegangan Residual Akibat Proses Pengerinan	97
5.5.1	Clay Shale Tak Jenuh	98
5.5.2	Perbedaan Pengurangan Kohesi Pada Clay Shale Jenuh	101
5.5.3	Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Pada Clay Shale Jenuh	102

5.5.4	Perbedaan Kekuatan Geser Pada Tegangan Total Dan Tegangan Efektif	106
5.6	Perubahan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Siklus Pembasahan dan Pengeringan	112
5.6.1	Perbedaan Kohesi Clay Shale Tak Jenuh	114
5.6.2	Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh	115
BAB 6	HUBUNGAN PARAMETER DAN ANALISIS BALIK PADA KASUS KERUNTUHAN LERENG DI TALAN TOLL SEMARANG – BAWEN STA 19+250	121
6.1	Pendahuluan	121
6.2	Hubungan Parameter Kekuatan Geser Residual Terhadap Kekuatan Geser Puncak	123
6.3	Penelitian Keruntuhan Pada Kasus Lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250	132
6.3.1	Stratigrafi Lapisan Tanah Pada Lereng Penelitian	132
6.3.2	Analisis Balik Untuk Penentuan Kekuatan Geser Residual Pada Keruntuhan Lereng	134
6.3.2.1	Analisis Balik Menggunakan Program Plaxis V-7	134
6.3.2.2	Analisis Balik Dengan Metode Irisan (<i>Slice Methods</i>)	137
6.3.2.3	Perbedaan Analisis Balik Antara Metode Irisan Dengan Plaxis V.7	141
6.3.3	Hasil Penelitian Kekuatan Geser Residual di Laboratorium Dalam Penentuan Parameter Skestabilan Lereng	145
BAB 7	KESIMPULAN DAN SARAN	152
7.1	Kesimpulan	152
7.2	Saran	156
	Referensi	157
	Lampiran	159

KATA PENGANTAR

Dengan mewujudkan rasa syukur kepada Allah swt, alhamdulillah penelitian yang berjudul “Pengaruh Pelapukan Clay Shale Terhadap Kelongsoran di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 , Jawa Tengah ini selesai kami kerjakan dan di susun dalam laporan penelitian ini. Penelitian ini merupakan bagian dari seri penelitian yang menyangkut penelitian tentang clay shale. Kami bersyukur bahwa ini dalam penelitian ini didapat suatu temuan yang baru dan 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 masukannya dari rekan rekan seprofesi untuk menyumbang saran agar dapat menyempurnakan penelitian ini berkembang dimasa depan.

Semoga 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
1.1	Keruntuhan lereng apabila permukaan clay shale terbuka setelah dilakukan pemotongan lereng (Alatas, 2012))	2
1.2	Tanah runtuh terjadi apabila bidang keruntuhan telah terbentuk pada masa lalu (Irsyam <i>et al.</i> , 2011)	3
1.3	Pengaruh kadar air (w_n) pada lempung terhadap perubahan tegangan dan regangan lempung (Holtz dan Wesley, 1981)	4
1.4	Perubahan bentuk fisik clay shale dari masa ke masa (Irsyam <i>et al.</i> , 2011)	4
1.5	Lokasi Pusat Pendidikan Olah Raga Hambalang, Sentul, Jawa Barat (Geoinves, 2010)	6
1.6	Keruntuhan lereng clay shale di proyek jalan Tol Semarang Ungaran Bawen seksi STA 19+250 (Himawan, 2011)	7
2.1	Selubung keruntuhan Mohr dan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb	12
2.2	Pola pada bidang keruntuhan tanah dengan bidang utama	14
2.3	Perubahan kekuatan geser clay shale (Timothy dan Duncan, 1991)	15
2.4	Perubahan kekuatan geser clay shale akibat pelapukan di lapangan (Gartung, 1986)	16
2.5	Hubungan tegangan dan regangan geser dari ujian pemulihan pada shale Duck Creek dan shale Otay Bentonitic (Timothy <i>et al.</i> , 2005a)	16

2.6	Hasil ujian geser cincin pada lokasi -1 tanah batu lempung (Mandar dan Robert, 2005)	17
2.7	Tingkat 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)	18
2.8	Gambar keruntuhan sampel (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro selepas uji triaksial tahap berbilang (Youn dan Tonon, 2010)	19
2.9	Hubungan tegangan sisih puncak (MPa) dengan masa pengeringan 48 jam (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro (Youn dan Tonon, 2010)	19
2.10	Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008)	21
2.11	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 Fredlund, 1988)	22
2.12	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)	23
2.13	Perbedaan hasil kekuatan geser dari uji standar geser langsung dengan tahap berbilang (Hormdee <i>et al.</i> , 2012)	24
2.14	Beberapa contoh dari keruntuhan lereng (Varnes, 1978)	25
2.15	Metode Irisan (Craig, 1987)	27
2.16	Proses perhitungan faktor keamanan FK dalam metode unsur terhingga FEM (Plaxis, 2004)	30
2.17	Rentang faktor keamanan yang diperkirakan melalui analisis balik menggunakan parameter kohesi rata-rata (Wilson <i>et al.</i> , 1999)	33
3.1	Diagram alir kerja penelitian kelongsoran pada clay shale	37
3.2	Metode persampelan tak terganggu pada lapangan untuk uji triaksial di laboratorium	39
3.3	Pengembangan acuan teras yang boleh terbelah (<i>split single core barrel</i>) (a), pelepasan kepala acuan teras (b), hasil	40

	sampel clay shale (c), sampel clay shale dibalut plastik hitam (d), sampel clay shale dimasukkan dalam PVC siap dihantar ke laboratorium (e).	
3.4	Tegangan deviator terhadap regangan tiga sampel clay shale pada tegangan keliling CP-1= 39 kN/m ² , CP-2= 78 kN/m ² & CP-3= 118 kN/m ² , yang dilanjutkan dengan sistem tahap berbilang pada keadaan residual	43
3.5	Penentuan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak drainase (UU) pada tegangan puncak	44
3.6	Penentuan kohesi residual (c_{rp}) dan sudut geser dalam residual (ϕ_{rp}) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak terdrainase (UU) pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan	44
3.7	Penentuan kohesi residual (c_{rf}) dan sudut geser dalam residual (ϕ_{rf}) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak terdrainase pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan	45
3.8	Uji pengukuran perubahan isi sampel (a) dan ruang pengeringan (b)	47
4.1	Rencana jalan tol trans Jawa, dari Merak ke Banyuwangi (Wikipedia, 2015)	54
4.2	Peta topografi lapangan Semarang-Bawen dari STA 19+000 hingga STA 19+775 (Himawan , 2011)	54
4.3	Keruntuhan lereng pada STA 19+250 Jalan Tol Semarang-Bawen, Jawa Tengah (Himawan, 2013)	55
4.4	Keadaan <i>Physiographic</i> Regional Pulau Jawa dan Madura (Van Bemmelen, 1970)	56
4.5	Peta geologi Hambalang, Jawa Barat dan sekitarnya (a), serta peta geologi Semarang-Bawen Jawa Tengah (b) (Effendi A, 1974; Thanden <i>et al.</i> , 1996)	57
4.6	Lokasi titik uji pengeboran dilokasi galian dan urugan (Suparman, 2013; UNDIP, 2013)	58

4.7	Uji di laboratorium mekanik tanah Geoinves di Jakarta (Geoinves, 2014)	59
4.8	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	61
4.9	(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	62
4.10	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Hambalang mula-mula (H-88), sampel jenuh pada tegangan puncak dan efektif dengan uji triaksial tahap berbilang	65
4.11	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-37, S-38, S-39), sampel tak jenuh pada tegangan puncak	65
4.12	Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan	65
4.13	Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan dengan uji tahap berbilang triaksial	66
4.14	Sampel S-37, S-38 dan S-39 pada keadaan awal senelum pengujian	67
4.15	Gambar bidang keruntuhan S-37, S-38 dan S-39 setelah uji triaksial	67
5.1	Perubahan kohesi clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan	
5.2	Perubahan kohesi clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan	74

5.3	Perubahan kohesi total (c_t) clay shale jenuh akibat proses pengeringan	76
5.4	Perubahan kohesi efektif (c') clay shale jenuh akibat akibat proses pengeringan	77
5.5	Perubahan sudut geser dalam total (ϕ) clay shale jenuh akibat proses pengeringan	80
5.6	Perubahan sudut geser dalam efektif (ϕ') clay shale jenuh akibat akibat proses pengeringan	80
5.7	Perubahan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	85
5.8	Perubahan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	85
5.9	Perubahan sudut geser dalam tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	86
5.10	Perubahan sudut geser dalam dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	87
5.11	Perubahan kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan (c_{rpt}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	88
5.12	Perubahan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	89
5.13	Perubahan kohesi residual total dengan pelepasan tegangan (c_{rft}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	89
5.14	Perubahan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	90

5.15	Perubahan sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rpl}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	93
5.16	Perubahan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	93
5.17	Perubahan sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rft}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	94
5.18	Perubahan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen	94
5.19	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak (c) hingga tegangan residual (c_{rp} dan c_{rf}) akibat proses pengeringan	99
5.20	Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak (ϕ) hingga tegangan residual (ϕ_{rp} dan ϕ_{rf}) akibat proses pengeringan.	100
5.21	Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif	102
5.22	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	105
5.23	Hubungan antara sudut geser dalam residual (ϕ_r) dengan batas Liquid Limit LL (Mesri dan Diaz, 1986)	105
5.24	Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Semarang-Bawen	107
5.25	Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Semarang-Bawen	108

5.26	Hubungan antara ϕ_u tak tersalir dengan ϕ' terdrainase (Ajmera <i>et al.</i> , 2012)	108
5.27	Perubahan kohesi clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan masa pembasahan setiap 4 hari dengan masa rendaman 5 menit	115
5.28	Perubahan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan masa pembasahan setiap 4 hari dengan masa rendaman 5 menit	116
5.29	Variasi kekuatan geser terhadap tegangan normal akibat penambahan dan pengurangan kadar air lebih kurang 2% dari OMC (Hatami <i>et al.</i> , 2016)	117
6.1	Hubungan kohesi residual terhadap kohesi jumlah dan efektif clay shale Semarang-Bawen	125
6.2	Hubungan kohesi residual terhadap kohesi jumlah dan efektif clay shale Hambalang	125
6.3	Hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam puncak total dan efektif clay shale Semarang-Bawen	127
6.4	Hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam jumlah dan efektif clay shale Hambalang	128
6.5	Stratigafi lapisan lereng pada STA 19+250 Jalan Tol Semarang-Bawen	133
6.6	Variasi daripada kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang terjadi pada bidang keruntuhan antara clay shale dengan Breksia Tuf yang menyebabkan faktor keamanan SF=1.00 dengan program Plaxis V.7	136
6.7	Deformasi total dan distribusi tegangan pada kasus keruntuhan lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 menggunakan program Plaxis V.7	137
6.8	Metode irisan pada lereng dengan keruntuhan blok dengan muka air tanah terendah (LWL)	138
6.9	Metode irisan pada lereng dengan keruntuhan blok dengan muka air tanah tertinggi (HWL)	138

- 6.10 Perbedaan variasi kohesi residual dan sudut geser dalam antara metode irisan dan metode unsur terhingga untuk faktor keamanan = 1.00 142
- 6.11 Hasil penelitian seluruh kekuatan geser residual di laboratorium terhadap kekuatan geser dari analisis balik keruntuhan lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 148
- 6.12 Hasil penelitian sebagian kekuatan geser residual di laboratorium yang sesuai dengan kekuatan geser dari analisis balik keruntuhan lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 149

DAFTAR TABEL

Tabel No	JUDUL TABEL	Hal
2.1	Tingkat pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Youn dan Tonon, 2010)	20
2.2	Hasil nilai kekuatan geser dari Tanah Khoen Kaen Loess (Hormdee <i>et al.</i> , 2012)	24
2.3	Pelbagai parameter pada tanah berbutiran halus tak tersalir dengan Plaxis (Plaxis, 2004)	30
2.4	Simulasi penurunan kekuatan geser dalam menentukan kekuatan geser yang terjadi menggunakan program Plaxis (Irsyam <i>et al.</i> , 2011)	31
2.5	Penurunan kekuatan geser dalam menentukan kekuatan geser yang terjadi menggunakan program Plaxis (Irsyam <i>et al.</i> , 2011)	31
2.6	Hasil analisis balik dan faktor keamanan dengan dua metode (Binod <i>et al.</i> , 2005)	33
3.1	Perubahan tegangan keliling pada keadaan awal dan pada keadaan residual dengan sistem tahap berbilang (<i>tahap berbilang system</i>) pada uji triaksial tak jenuh	42
3.2	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (1 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	47

3.3	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (2 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	48
3.4	Tabel uji di laboratorium sampel terganggu pada proses pembasahan dan pengeringan (3 kali rendam/8 hari, hingga masa 80 hari)	48
3.5	Tabel uji triaksial pada clay shale dengan pembasahan dan pengeringan dengan 2 kali rendam/ 8 hari, hingga masa 40 hari	49
3.6	Uji-uji pedahuluan di laboratorium	49
3.7	Uji laboratorium pada proses pelapukan pengeringan	50
3.8	Jenis uji laboratorium pada proses pelapukan pembasahan dan pengeringan	50
3.9	Jenis uji dan lokasi laboratorium uji	51
4.1	Jenis uji pendahuluan di laboratorium clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang	60
4.2	Gambaran keseluruhan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang pada keadaan mula-mula	68
5.1	Perubahan kekuatan geser puncak akibat pelapukan proses pengeringan	81
5.2	Hasil penelitian perubahan kohesi total dan kohesi residual, pengurangan kohesi dan kadar pengurangan kohesi clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang akibat pelapukan proses pengeringan	95
5.3	Hasil uji perubahan sudut geser dalam total dan sudut geser dalam residual, pengurangan sudut geser dalam dan kadar pengurangan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang akibat pelapukan proses pengeringan	96
5.4	Penelitian terdahulu yang dibahas berkenaan dengan hasil penelitian perubahan kekuatan geser pada tegangan puncak akibat proses pengeringan	97

5.5	Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada kondisi awal	109
5.6	Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada masa semula jadi serta masa hari ke-80	109
5.7	Penelitian terdahulu yang dibahas berkenaan dengan hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual.	110
5.8	Hasil penelitian dan penelitian terdahulu mengenai perbedaan antara kekuatan geser pada tegangan total dan tegangan efektif	111
5.9	Siklus pembasahan dan pengeringan clay shale dan tabel uji triaksial.	113
5.10	Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian dari kasus siklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser	119
5.11	Hasil penelitian perubahan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga hari ke-24	120

ABSTRAK

Clay shale dalam keadaan awal adalah merupakan batuan lempung yang memiliki kekuatan geser yang tinggi. Pengaruh pelapukan terhadap clay shale yang terkena kepada atmosfera dan hidrosfera menyebabkan kekuatan geser clay shale berkurang sangat signifikan. Permasalahan ini yang menjadikan penyebab banyak terjadi kegagalan pada lereng di tanah clay shale. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berkurangnya kekuatan geser akibat pengaruh pelapukan melalui proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan di laboratorium. Untuk mengetahui tujuan penelitian maka dilakukan proses pengeringan clay shale selama 80 hari, manakala delapan siklus proses pembasahan dan pengeringan adalah dalam waktu 32 hari dengan pembasahan selama 5 menit dilakukan setiap 4 hari sekali. Uji triaksial clay shale tak jenuh dan jenuh dari pengaruh proses pelapukan tersebut dilakukan pada setiap 8 hari. Sampel clay shale diperoleh dengan suatu pengembangan pengambilan sampel clay shale tak terganggu melalui uji galian dengan coring yang terbelah dua '*split single core barrel*'. Kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) ditentukan pada keadaan tegangan puncak (total/effektif) dan tegangan residual (total/effektif). Penentuan kekuatan geser residual dilakukan melalui pengembangan metode standar melalui penentuan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp} dan ϕ_{rp}) dan kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf} dan ϕ_{rf}) yang diperoleh dari uji triaksial dengan tahap berperingkat. Penentuan kekuatan geser residual yang terjadi pada kegagalan lereng di jalan tol Semarang Bawen STA 19+250 telah dilakukan perhitungan analisis balik dengan kaedah elemen terhingga (FEM) serta kaedah had keseimbangan (LEM), sebagai wujud pengesahan penelitian kekuatan geser residual yang diperoleh di laboratorium. Pengurangan kekuatan geser residual maksimum terjadi pada uji dengan pelepasan tegangan selama 80 hari pengeringan. Kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) berkurang pada rentang 70 - 100% dengan rentang kadar pengurangan 0.15 - 2.02 kN/m²/hari. Manakala sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) berkurang pada rentang 54.7 - 81.9% dengan rentang kadar pengurangan 0.11 - 0.25⁰/hari. Kohesi residual dan sudut geser dalam residual yang terjadi sehingga menyebabkan kegagalan lereng dengan faktor keselamatan = 1.00 telah diperoleh pada rentang parameter $c_r = 6$ kN/m² dan $\phi_r = 15.7^\circ$, hingga $c_r = 25$ kN/m² dan $\phi_r = 7^\circ$. Manakala apabila terjadi $c_r = 0$, maka sudut geser dalam residual yang terjadi ialah $\phi_r = 17.7^\circ$. Manakala pada kasus yang sama, Himawan (2013) mendapatkan $c_r = 18$ kN/m² dan $\phi_r = 12^0$. Uji kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan melalui uji triaksial tahap berperingkat, diharapkan untuk dijadikan standar untuk kedepannya, karena lebih berpeluang memperoleh kekuatan geser residual yang terjadi sama pada kegagalan lereng. Selain itu diharapkan pula bahawa pelapukan akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan dalam waktu 8 hingga 16 hari dengan masa pembasahan 5 menit setiap 4 hari sekali adalah suatu proses pelapukan yang dapat dilakukan di laboratorium untuk memperoleh parameter kekuatan geser residual yang sesuai pada rancangan rekayasa kestabilan lereng pada tanah clay shale dimasa yang akan datang.

ABSTRACT

Clay shale in its natural state is a clay rock that has a high shear strength. Weathering effects of shale clay that is exposed to the atmosphere and hydrosphere causes shear strength of clay shale reduced very significantly. This is what makes many causes of failure on a slope in the land of clay shale. This study aims to determine the shear strength reduction due to the effects of weathering through the process of drying and wetting and drying cycles carried out in the laboratory testing. To find out the purpose of the study was conducted drying process for 80 days of clay shale, while eight cycles of wetting and drying process is within 32 days of wetting for 5 minutes was performed once every 4 days. Triaxial test unsaturated and saturated clay shale from the effects of weathering process is performed on each 8 days. Clay shale samples obtained by sampling the development of shale clay minerals undisturbed through the test with a split single core barrel. Cohesion (c) and internal angle friction (ϕ) is determined at peak stress conditions (total / effective) and the residual stress (total / effective). Determination of residual shear strength with the development of standard methods of determining the residual shear strength without stress release (c_{rp} and ϕ_{rp}) and residual shear strength with stress release (c_{rf} and ϕ_{rf}) to obtained from multistage triaxial. Determination of shear strength of the remainder occurring in slope failure on the highway Semarang Bawen STA 19 + 250 has been calculated used back analysis by finite element (FEM) and the method limit equilibrium (LEM), as a form of validation study of the residual shear strength in the laboratory test. The maximum residual shear strength reduction occurs in the release of stress tests for 80 days drying process. Residual cohesion with stress release is reduced in the range of 70-100% with a reduction rate range 0.15 to 2.02 kN/m²/day. While residual internal angle friction with stress release decreased in the range of 54.7 - 81.9% with a range of reduction rate of 0.11 to 0.25 °/ day. Residual cohesion and residual internal angle friction angle causing slope failures occurred with safety factor = 1.00 was obtained in the range of parameter $c_r = 6$ kN/m², to $\phi_r = 15.7^\circ$ dan $c_r = 25$ kN/m² parameter $\phi_r = 6$ kN/m² dan while when $c_r = 0^\circ$, then residual internal angle friction is $\phi_r = 17.7^\circ$. While in the same case, Himawan (2013) obtained $c_r = 18$ kN/m² and $\phi_r = 12^\circ$. The residual shear strength test with stress release through a multistage triaxial test, it is recommended to apply in the future as more likely to acquire the remainder of the prevailing shear strength similar to slope failure. Also recommended is that weathering due process of wetting and drying cycles in the next 8 to 16 days with a wetting 5 minutes once every 4 days is a weathering process that can be done in the laboratory to obtain residual shear strength parameter appropriate on the design engineering of slope stability in clay shale soil in the future.

BAB 1

PENDAHULUAN

Shale adalah batuan elastik sedimen halus yang terdiri daripada campuran lumpur yang mempunyai kepingan mineral lempung dan serpihan kecil (lanau berukuran butiran) mineral lain, terutamanya Kuarza dan Kalsit. Ratio lempung terhadap mineral lain adalah berbeda (Blatt dan Robaert, 1996). 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.

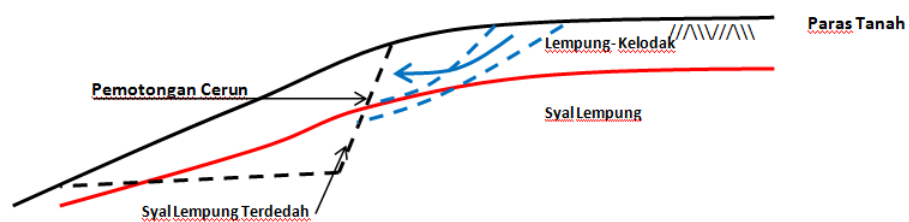
Perilaku rekayasa utama clay shale amat sukar difahami kerana akan menjadi lempung lunak (lumpur) apabila terbuka kepada sinar cahaya matahari, udara dan air dalam masa yang agak singkat. Walau bagaimanapun lapisan clay shale yang dilindungi dengan lapisan tanah yang cukup tebal mempunyai kekuatan geser 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

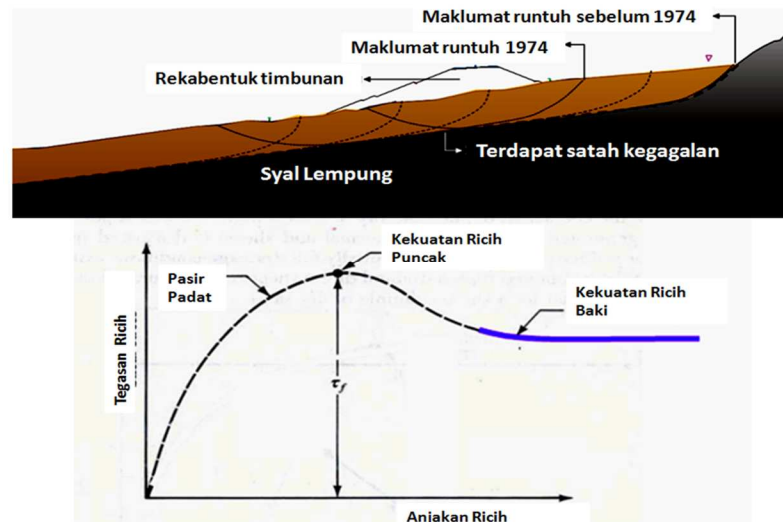
Beberapa kasus kerusakan infrastruktur bangunan akibat keruntuhan lereng di Indonesia berpunca daripada kelemahan struktur tanah clay shalnya. Keruntuhan lereng progresif telah diketahui dalam kejadian tanah runtuh seperti di Jalan Tol Cipulang (Irsyam *et al.*, 2007), Pusat Pendidikan Olah raga Hambalang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

Penyebab tanah runtuh pada Gambar 1.1 dan Gambar 1.2 dapat menggambarkan latar belakang permasalahan penelitian ini sebagai berikut:

- (1) Kelemahan perencana skestabilan lereng di tanah clay shale yang menyebabkan tanah runtuh adalah berpunca daripada kekeliruan dalam penentuan parameter kekuatan geser.
- (2) Proses pelapukan clay shale bergantung kepada mineral utama dalam clay shale, dan bagaimana proses pelapukan itu terjadi.
- (3) Semakin lama tanah clay shale terbuka kepada udara, cahaya matahari dan pembasahan akibat hujan sehingga terjadi proses pelapukan, maka semakin rendah nilai ratio disintegritas (D_R). Manakala semakin lama proses pengeringan dan pembasahan dilakukan, maka D_R semakin kecil.
- (4) Sebelum ini, perencana skestabilan lereng di lokasi yang pernah mengalami tanah runtuh tidak dapat dibuat berdasarkan uji laboratorium mekanik tanah yang standar.



Gambar 1.1 Keruntuhan lereng apabila permukaan clay shale terbuka setelah dilakukan pemotongan lereng (Alatas, 2012)



Gambar 1.2 Tanah runtuh terjadi apabila bidang keruntuhan telah terbentuk pada masa lalu (Irsyam *et al.*, 2011)

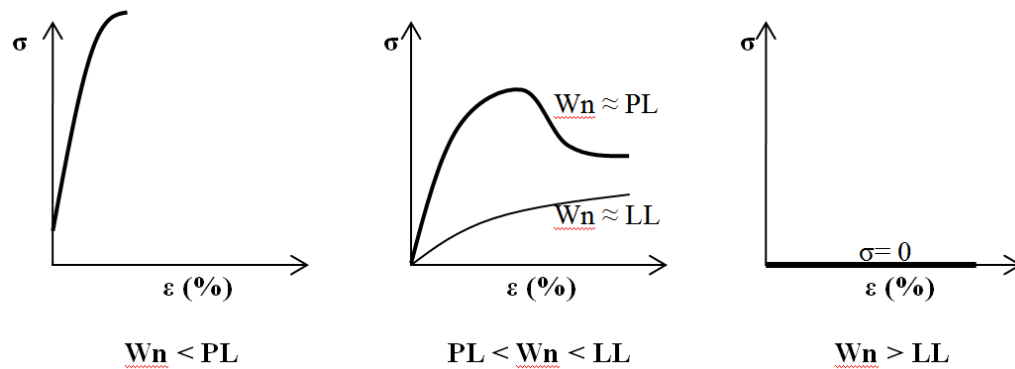
Clay shale sering dijumpai dalam struktur tanah di Indonesia khususnya di Jawa Barat, Jawa Tengah dan daerah lain di Indonesia. Tanah jenis ini memiliki kekuatan geser yang tinggi pada kedalaman tertentu walaupun dibebani oleh lapisan timbunan atas. Namun, kekuatan gesernya akan cepat menurun apabila ia terbuka kepada atmosfir atau hidrosfir.

Perilaku kekuatan geser tanah didapati menurun secara drastik apabila tanah tersebut terganggu, terpelapukan (Gartung, 1986), dan kehilangan kekuatan (Irsyam *et al.*, 2011). Jika diuji di laboratorium, parameter kekuatan gesernya berubah dengan signifikan bila dibandingkan dengan keadaan asalnya di dalam tanah. Ini sangat berbeda dengan jenis lempung yang lain di mana pengeringan dan pembasahan tanah tidak memberikan penurunan kekuatan geser yang signifikan.

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 1.3.



Gambar 1.3 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 1.4 di bawah, perubahan bentuk fisik clay shale yang melalui proses pengeringan dan pembasahan dilihat semakin terlapukan dan kekuatannya semakin berkurang.



Gambar 1.4 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-sifat indeks, fisik dan mekanik clay shale melalui data utama uji di laboratorium. Sehingga kini belum ada penelitian seumpama ini boleh dijadikan rujukan untuk perencanaan kestabilan lereng yang mengambil kira proses perubahan kekuatan geser akibat pelapukan, pelepasan tegangan dan proses lereng runtuh progresif.

Sehubungan itu, penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat clay shale secara holistik ini menggunakan hipopenelitian bahwa disain terdahulu telah menggunakan metode normal atas sifat-sifat lempung shale. Oleh karenanya, melalui penelitian ini parameter clay shale dapat dilihat secara terperinci. Parameter-parameter yang diperolehi melalui metode yang telah dirumuskan secara khusus dapat memberikan nilai sebenar untuk disain lereng pada masa akan datang. Ini diharapkan agar dapat mengatasi masalah engineer dalam disain lereng yang dipengaruhi oleh clay shale.

1.3 Tujuan dan Objek Penelitian

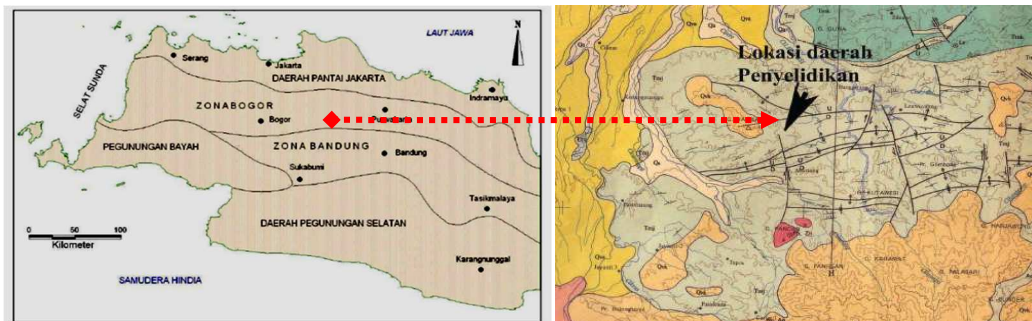
Penelitian ini dijalankan dengan tujuan untuk mengkaji kaspelapukan terhadap penentuan parameter kekuatan geser yang tepat bagi perencanaan kestabilan lereng yang mempunyai tanah clay shale di Pulau Jawa. Tujuan penelitian dicapai melalui empat objektif berikut:

- (1) Menentukan penurunan kekuatan geser pada tegangan puncak hingga kekuatan geser sisa pada tegangan sisa clay shale tak jenuh dan jenuh akibat proses pelapukan di laboratorium.
- (2) Membangunkan metode uji kekuatan geser yang lebih tepat dalam keperluan kestabilan lereng yang terdapat clay shale.
- (3) Menilai metode yang pasti dalam penggunaan kekuatan geser bagi permasalahan kestabilan lereng tanah clay shale pada masa depan.

- (4) Menentukan pengaruh pelapukan terhadap penurunan kuat geser yang menyebabkan kelongsoran pada jalan tol Semarang-Bawen STA 19+250, Jawa Tengah.

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 1.5 dan pada lokasi jalan tol Semarang Ungaran-Bawen, Jawa Tengah seperti dalam Gambar 1.6. Manakala penyelesaian masalah tanah runtuh yang terjadi pada pinggiran Jalan Tol Semarang Ungaran-Bawen pada STA 19+250 diambil sebagai penelitian kasus. Analisis yang digunakan dibatasi kepada metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) dengan metode unsur terhingga (*finite element method*) dan menggunakan perisian *Plaxis V.7*.



Gambar 1.5 Lokasi Pusat Pendidikan Olah Raga Hambalang, Sentul, Jawa Barat (Geoinves, 2010)



Gambar 1.6

Untuk mencapai objektif (1), perubahan parameter sifat-sifat indeks dan fisik clay shale akibat proses pelapukan diambil dari beberapa lokasi tanah runtuh. Uji sifat-sifat tersebut dilakukan dengan pemerhatian pada setiap jangka masa tertentu untuk mengetahui proses pelapukan. Pada jangka masa tersebut, proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan sampel clay shale dilakukan di samping uji perubahan sifat indeks clay shale seperti perubahan kadar air (w_n), perubahan berat unit (γ) dan angka pori (e). Perubahan pengembangan clay shale tak terganggu diamati semasa proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga masa hancurnya sampel akibat pelapukan. Perubahan sifat fisik clay shale akibat pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan seperti perubahan ratio disintegritas (D_R) yang diperoleh daripada distribusi ukuran butiran (GSD) akibat pelapukan.

Kemudian, dalam objektif (2) penurunan parameter kekuatan geser dari beberapa clay shale akibat proses pelapukan diambil dari beberapa lokasi tanah runtuh. Uji kekuatan geser dilakukan dengan pemerhatian pada setiap jangka masa tertentu untuk mengetahui proses pelapukan. Pada jangka masa tersebut, proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan. Semasa proses pengeringan sampel clay shale dijalankan uji triaksial tak terkukuh tak bersalir (*Triaxial UU Test*) dilakukan dalam keadaan sampel tanah tak jenuh dan jenuh. Namun, semasa proses pembasahan dan pengeringan dijalankan, uji triaksial itu dilakukan pada sampel tak jenuh saja. Ini dilakukan untuk mengetahui kesusdaripada dua proses pelapukan itu terhadap penurunan parameter kekuatan geser clay shale. Uji kekuatan geser sisa dilakukan melalui uji triaksial setelah kekuatan puncaknya

dilampaui secara bertahap (*multi stage system*) dengan keadaan sampel tanah juga tak jenuh dan jenuh.

Kemudian dalam objektif (3), parameter kekuatan geser sisa di laboratorium yang diperoleh dari uji triaksial dilakukan dengan dua langkah. Dalam langkah pertama, tegangan puncak terjadi pada keadaan *steady state* dengan meningkatkan tegangan keliling secara bertahap. Pada keadaan ini kekuatan geser sisa tanpa pelepasan tegangan dapat diperoleh. Seterusnya, semua tegangan keliling dihapuskan dan uji dilanjutkan lagi dengan memberikan tegangan keliling secara bertahap. Pada peringkat ini diperoleh kekuatan geser sisa dengan pelepasan tegangan.

Manakala untuk objektif (4), parameter kekuatan geser sisa clay shale di laboratorium akan dibandingkan dengan parameter kekuatan geser yang terjadi pada lokasi keruntuhan lereng dengan menggunakan metode analisis balik.

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).

Daripada perkembangan tersebut, didapati penelitian laboratorium masa kini belum ada yang membuat penelitian serta penilaian tentang menurunnya kekuatan geser clay shale akibat pelapukan hari demi hari melalui proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan melalui uji triaksial unconsolidated undrained dalam keadaan tak jenuh dan jenuh. Adalah diharapkan dengan uji triaksial yang

dilakukan mengikut sistem bertahap, kekuatan geser sisa clay shale yang diuji dapat ditentukan. Pada akhir penelitian ini, saran metode uji laboratorium pada tanah clay shale yang mengambil kira aspek pelapukan dapat disediakan untuk kasus-kasus keruntuhan lereng di mana-mana tempat. Malahan parameter kekuatan geser clay shale berdasarkan hasil uji laboratorium yang lengkap juga dapat disarankan untuk perencana lereng di mana-mana Indonesia. Ini seterusnya dapat digunakan dalam penelitian mengatasi masalah tanah runtuh tanah clay shale pada masa depan di Indonesia.

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 kekuatannya. Analisis kestabilan lereng dua dimensi turut dibahas dalam bab ini.

Dalam Bab 3, metodologi penelitian dibahas dengan memuatkan diagram alir penelitian dan penjelasan tentang metode uji laboratorium yang akan dilakukan. Manakala di Bab 4 adalah pembahasan hasil awal uji lapangan, uji laboratorium mekanik tanah.

Dalam Bab 5, hasil kekuatan geser dari clay shale terhadap proses pelapukan akibat pengeringan serta siklus pengeringan dan pembasahan. Kekuatan geser yang dihasilkan ialah pada keadaan tegangan puncak dan tegangan sisa, dan pada keadaan clay shale tak jenuh dan jenuh.

Kemudian Bab 6, penentuan parameter kekuatan geser sisa clay shale bagi kasus kelongsoran pada jalan tol Semarang-Bawen STA19+250. Penelitian ini diakhiri dengan Bab 7 untuk kesimpulan dan saran penelitian lanjut.

BAB 2

STUDI PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Bab ini menyampaikan penelitian literatur dari beberapa peneliti terdahulu yang menghubungkan perilaku dan kekuatan geser clay shale serta pengaruh pelapukan terhadap penurunan kekuatan geser clay shale. Beberapa penelitian kekuatan geser clay shale yang lalu telah membicarakan hasil berbagai jenis uji di laboratorium pada tegangan puncak dan tegangan sisa. Penelitian mengenai kekuatan geser ini sangat penting dalam pembahasan dan validasi hasil penelitian uji yang diperoleh.

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.

Parameter yang diperoleh daripada kekuatan geser tersebut diperlukan dalam penentuan faktor keamanan lereng yang sangat penting dalam rekayasa geoteknik. Ini telah menyebabkan wujudnya pembahasan tentang penentuan faktor keamanan dengan metode kesetimbangan batas serta metode unsur terhingga dalam beberapa literatur. Penelitian ini sangat penting terutamanya dalam kasus keruntuhan lereng

dan untuk itu analisis balik dibuat dalam menentukan kekuatan geser semasa terjadinya keruntuhan lereng.

Pada akhir Bab 2 ini, jurang berbeza dari penelitian lalu dibahas bagi memastikan penelitian ini mempunyai kepentingan yang bermanfaat bagi rekayasa geoteknik pada masa depan.

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).

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

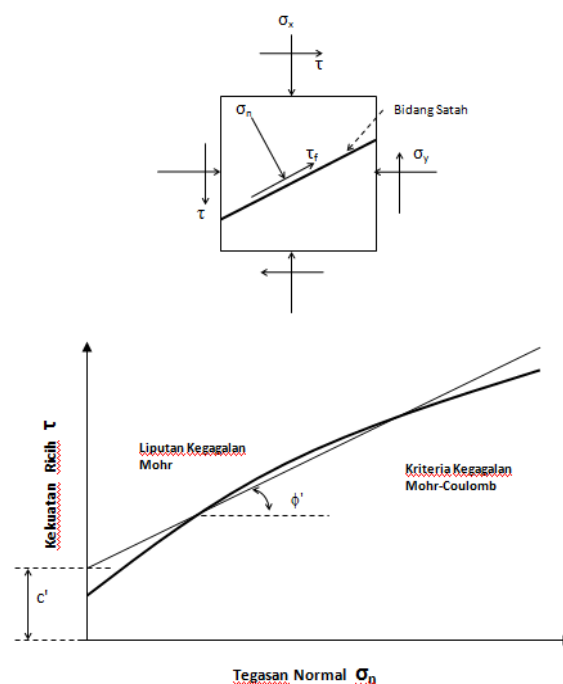
Mohr (1900) telah membentangkan teori untuk suatu keruntuhan bahan. Teori ini menegaskan bahwa bahan runtuh adalah gabungan kritikal tegangan normal dan tegangan geser dan bukan dari tegangan normal atau tegangan geser maksimum saja. Oleh karenanya, hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan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

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

di mana τ_f ialah kekuatan geser pada bidang bidang dan σ_n ialah tegangan normal pada bidang bidang. Oleh karenanya hubungan kekuatan geser runtuh dapat dilihat pada Persamaan (2.1). Manakala kekuatan geser runtuh (τ_f) di suatu titik pada suatu keadaan tertentu telah dikemukakan oleh Coulomb (1776) sebagai suatu fungsi linear terhadap tegangan normal (σ_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 (kN/m^2) dan ϕ ialah sudut geser dalam drajat. Persamaan (2.2) ini dipanggil kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Selubung keruntuhan dan kriteria tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Selubung keruntuhan Mohr dan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

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

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

Jika tegangan efektif (σ') 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 ϕ' 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 2.2(a) menunjukkan pola bidang keruntuhan dengan bidang utama dan σ'_1 dan σ'_3 masing-masing adalah tegangan utama efektif dan tegangan kecil efektif. Bidang keruntuhan didapati membentuk sudut dengan bidang utama. Gambar 2.2(b) pula menunjukkan bagaimana menentukan sudut dan hubungan antara σ'_1 dan σ'_3 , yang merupakan plot bulatan Mohr untuk keadaan tegangan seperti dalam Gambar 2.2(a) (Das, 2006). Dari Gambar 2.2(a) diperolehi θ senilai

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

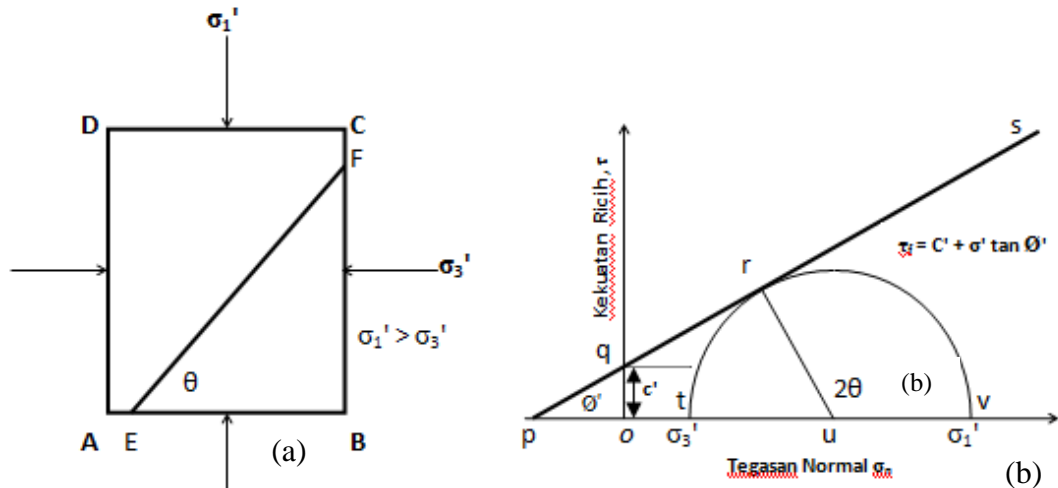
Manakala Gambar 2.2(b) pula menunjukkan

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

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

di mana

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



Gambar 2.2 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.

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

atau

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

sedangkan

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

dan

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

dengan demikian

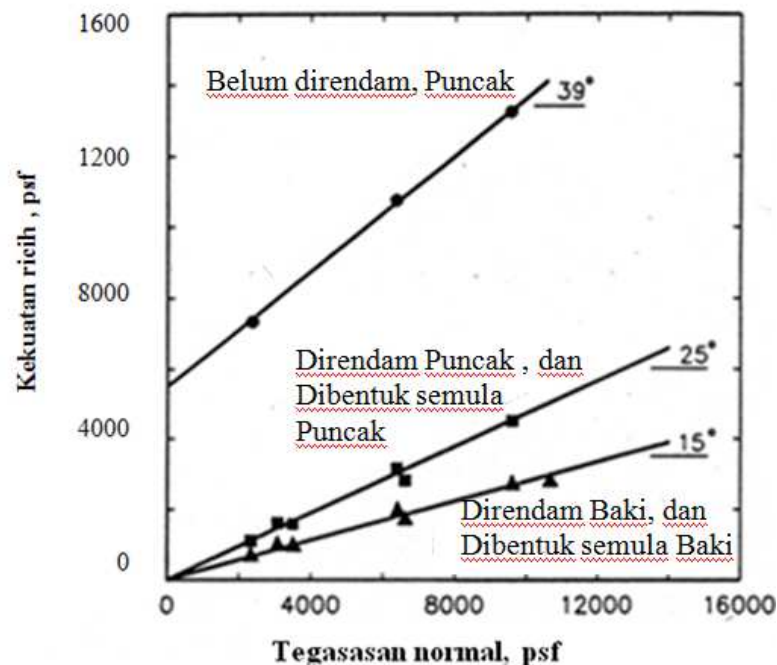
$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\theta'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45^\circ + \frac{\theta'}{2} \right) \quad (2.13)$$

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.

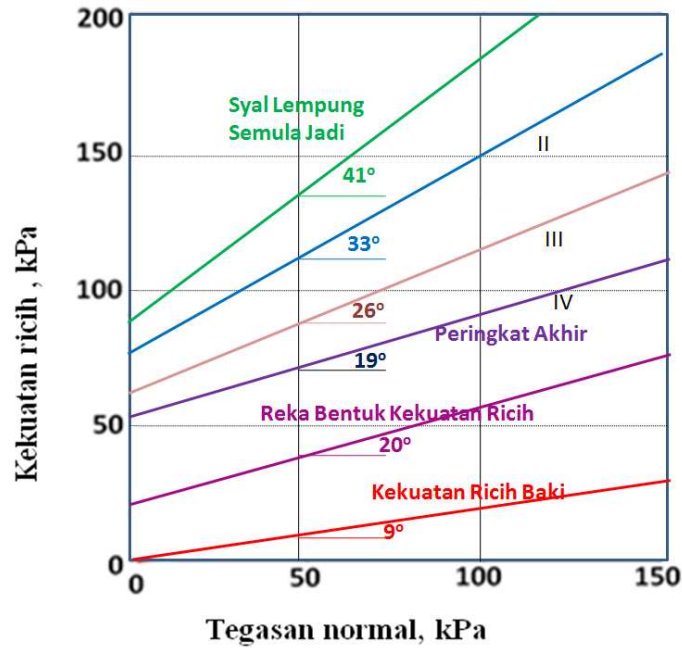
2.3.3 Hasil Kekuatan Geser Clay Shale

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 2.3 (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.

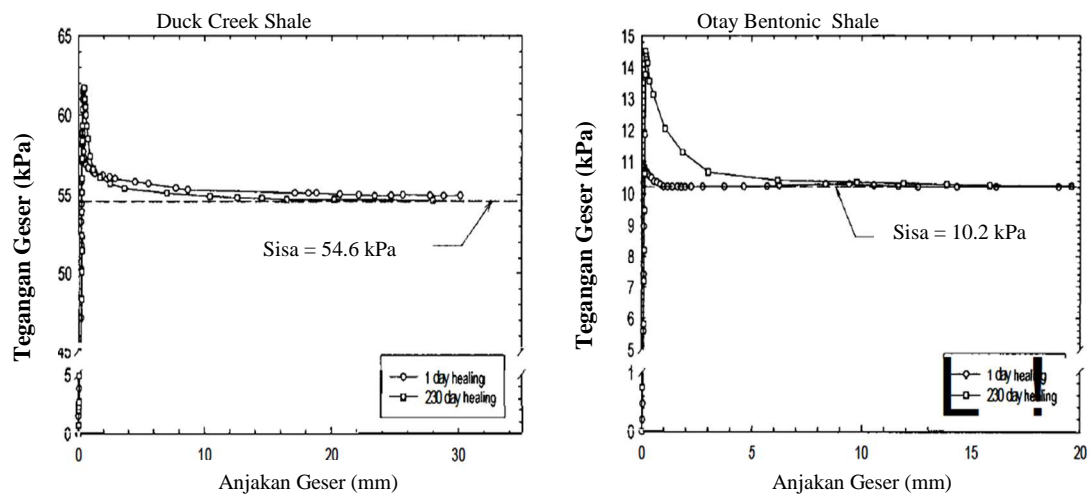
Kekuatan geser clay shale akibat pengaruh gangguan sampel dan proses pelapukan dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Gartung, 1986). Kekuatan geser mula-mula $c = 85$ kPa dan $\phi = 41^\circ$ dilihat berkurang akibat proses pelapukan. Semakin besar tahap pelapukan maka semakin menurun kekuatan gesernya. Pada 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 2.5.



Gambar 2.3 Perubahan kekuatan geser clay shale (Timothy dan Duncan, 1991)



Gambar 2.4 Perubahan kekuatan geser clay shale akibat pelapukan di lapangan (Gartung, 1986)

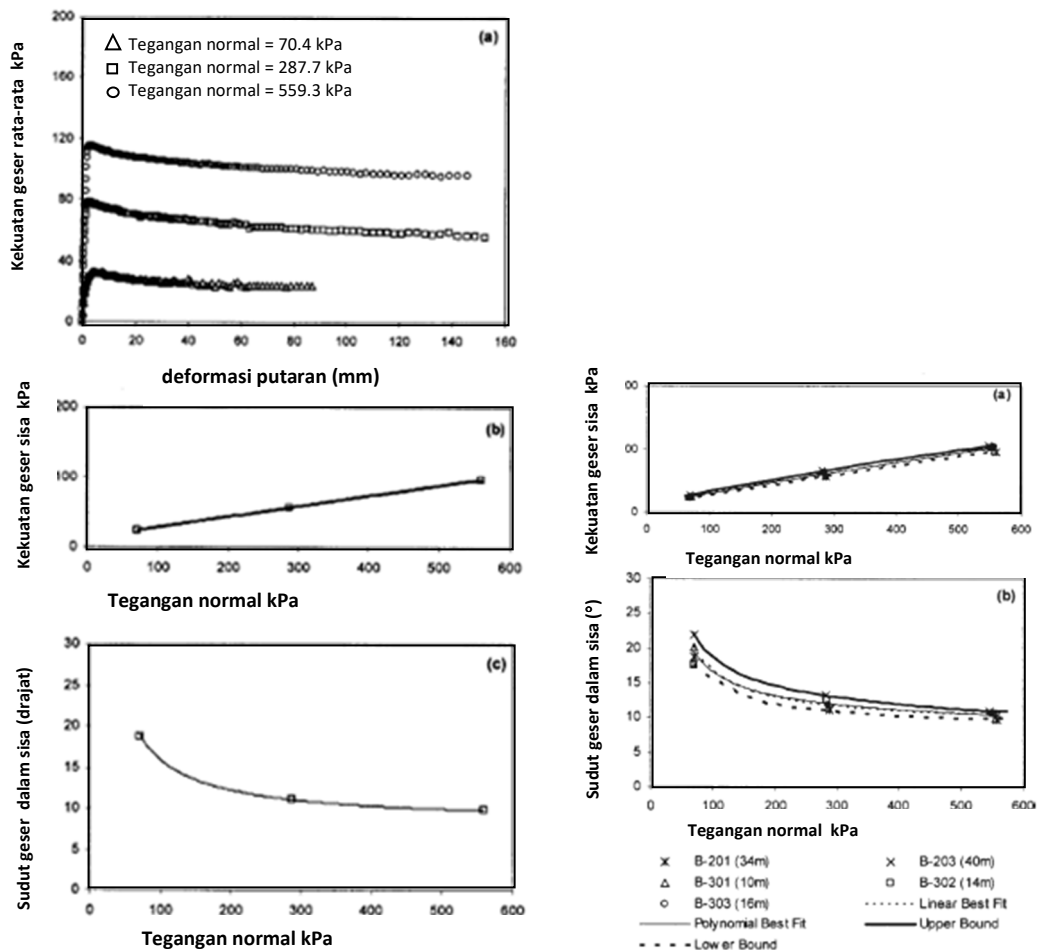


Gambar 2.5 Hubungan tegangan dan regangan geser dari uji pemulihan pada shale Duck Creek dan shale Otay Bentonitic (Timothy *et al.*, 2005a)

Kekuatan geser sisa clay shale telah banyak dibahas oleh beberapa peneliti terdahulu. Antaranya ialah uji geser cincin pada Gambar 2.6 (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 kelongsoran seperti yang dibahas oleh Timothy dan Hisyam (1998) dan; Timothy *et al.*, (2005c).

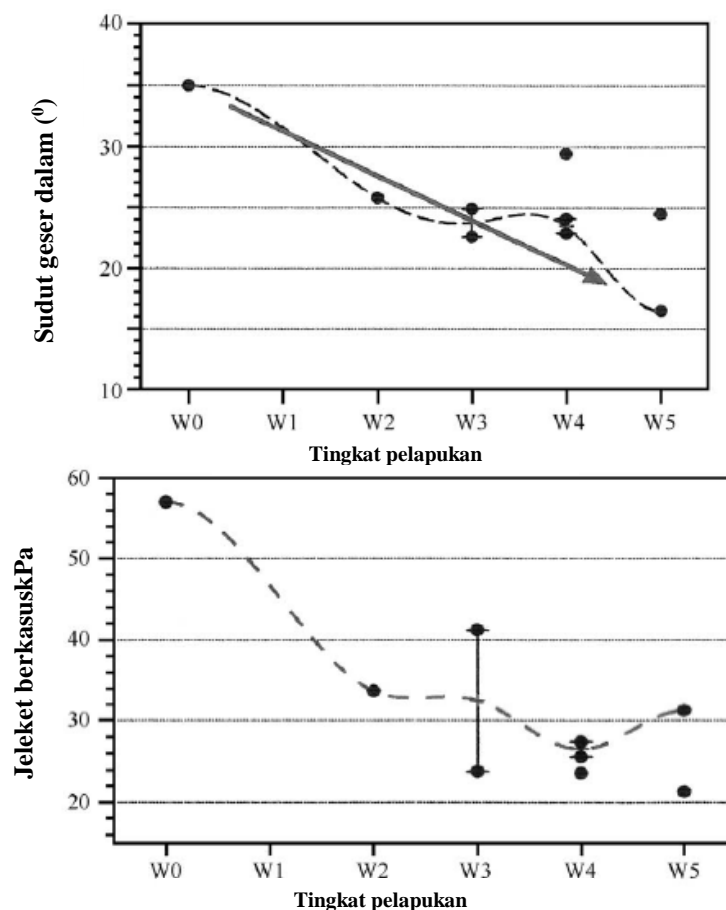
Dalam penelitian terdahulu (Mesri dan Diaz, 1986), hubungan antara perbedaan sudut geser dalam efektif pada tegangan jumlah (ϕ') dengan sudut geser dalam pada tegangan sisa efektif (ϕ_r') telah diperoleh dari 24 sampel clay shale. Perubahan minimum dari sudut geser dalam jumlah efektif (ϕ') adalah 34°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



Gambar 2.6 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 hammer (*Schmidt Hammer Test*) akibat proses pelapukan telah dikaji melalui uji lapangan dengan menghubungkan pengamatan pelapukan terhadap hasil angka hammer Schmidt (Sadisun *et al.*, 2001; Sadisun *et al.*, 2006). Pengamatan pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam dan kohesi dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Emberhardt *et al.*, 2004).

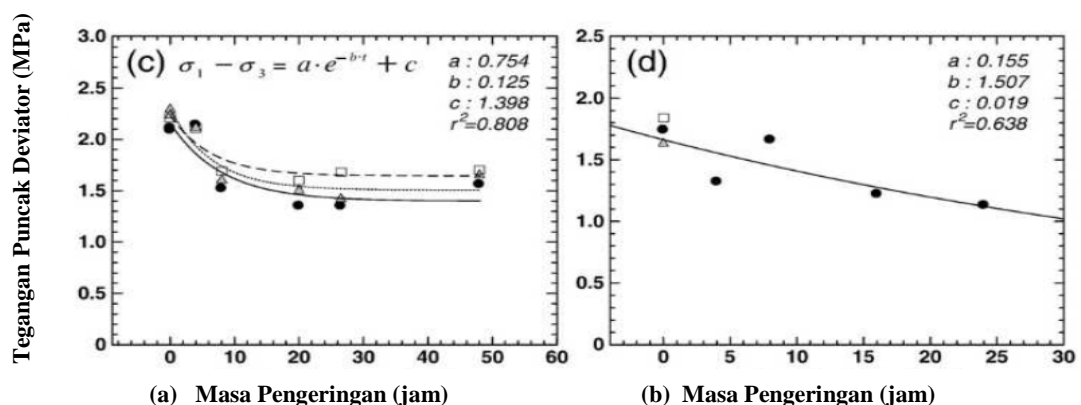


Gambar 2.7 Tingkat pelapukan W₀ (mula-mula) hingga W₅ (sangat terpelapukan) terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif (Emberhardt *et al.*, 2004)

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 2.8 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 2.8. Manakala perubahan tegangan deviator akibat masa pengeringan dapat dilihat dalam Gambar 2.9. 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 2.8 Gambar keruntuhan sampel (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro selepas uji triaksial tahap berbilang (Youn dan Tonon, 2010)



Gambar 2.9 Hubungan tegangan sisih puncak (MPa) dengan masa pengeringan 48 jam (a) Marl Taylor dan (b) Shale Navarro (Youn dan Tonon, 2010)

Tabel 2.1 : Tingkat 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	ϕ_u (°)	1.1	1.5	2.0	2.7	3.2	3.5
	Kohesi (kPa)	1050	833	775	665	6.23	598
Shale Navarro	ϕ_u (°)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	*
	Kohesi (kPa)	733	682	634	549	4.75	*

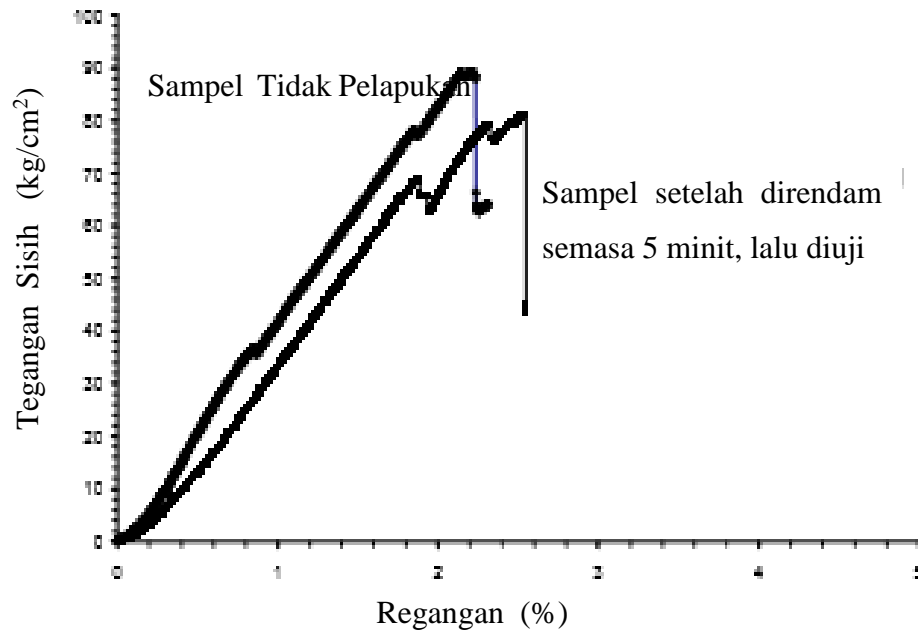
*) tidak dapat diuji karena sampel hancur

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 (ϕ_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 (ϕ_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 (ϕ_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 minit seperti pada

Gambar 2.10 (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 pemeringgan.



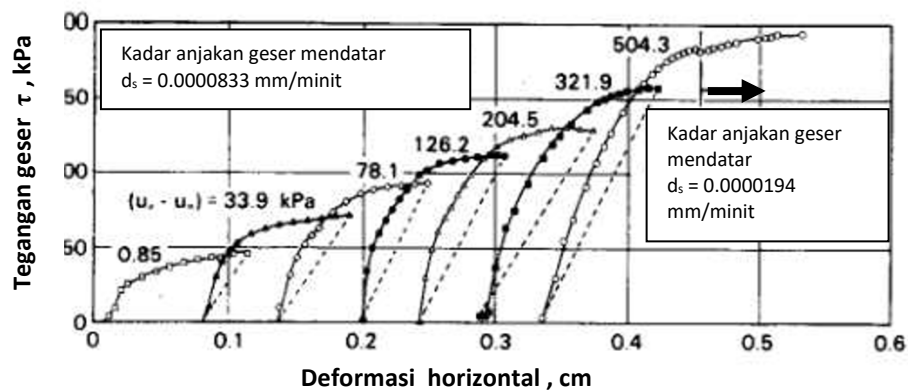
Gambar 2.10 Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008)

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

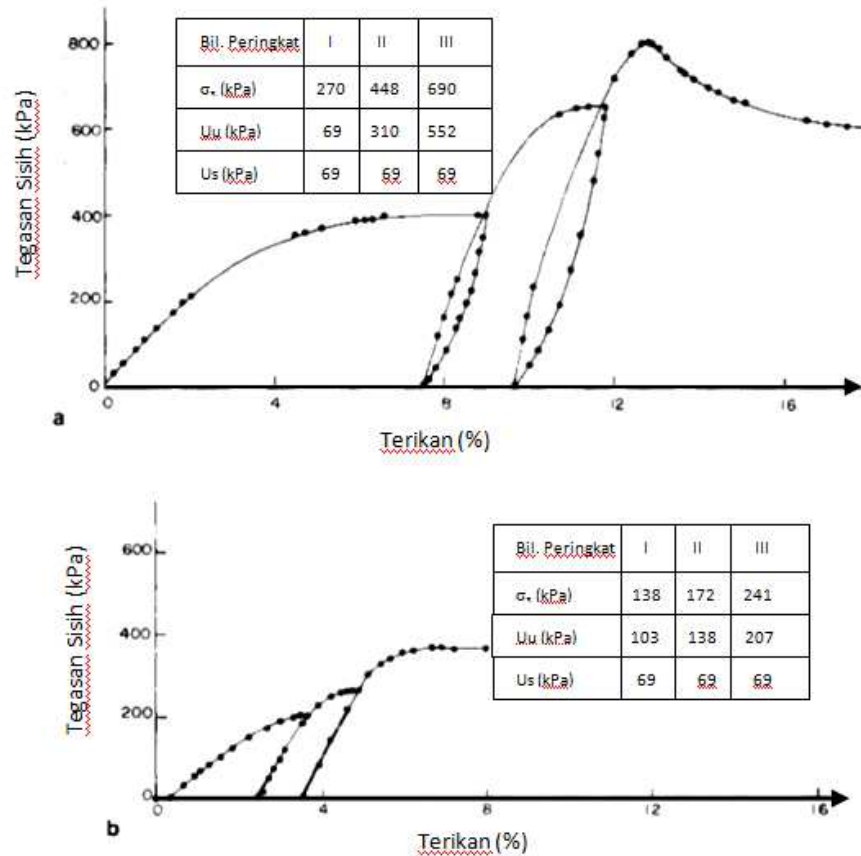
menyimpulkan hasil ujinya. Uji dengan tahap berbilang ini hanya memerlukan satu sampel spesimen yang boleh dikenakan tegangan keliling secara bertahap.

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 2.11.



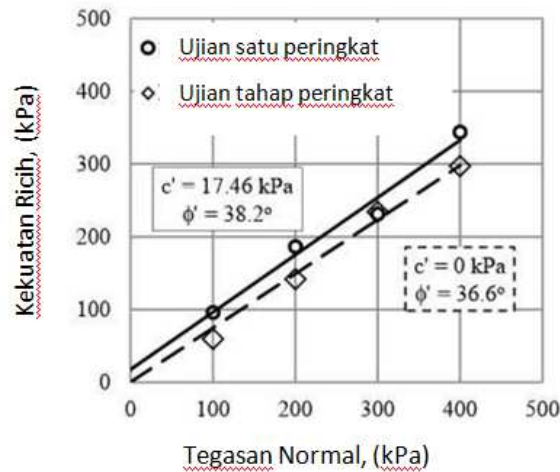
Gambar 2.11 Hubungan tegangan geser dan ubah bentuk sisi dari uji kekuatan geser dengan geser langsung dengan tahap berbilang (Gan *et al.*, 1988; Gan dan Fredlund, 1988)

Uji tahap berbilang dengan uji triaksial adalah suatu uji yang sangat rasional, hal ini dikembangkan oleh para peneliti untuk mengelak ketidakeragaman 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 2.12.



Gambar 2.12 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 2.13 (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).



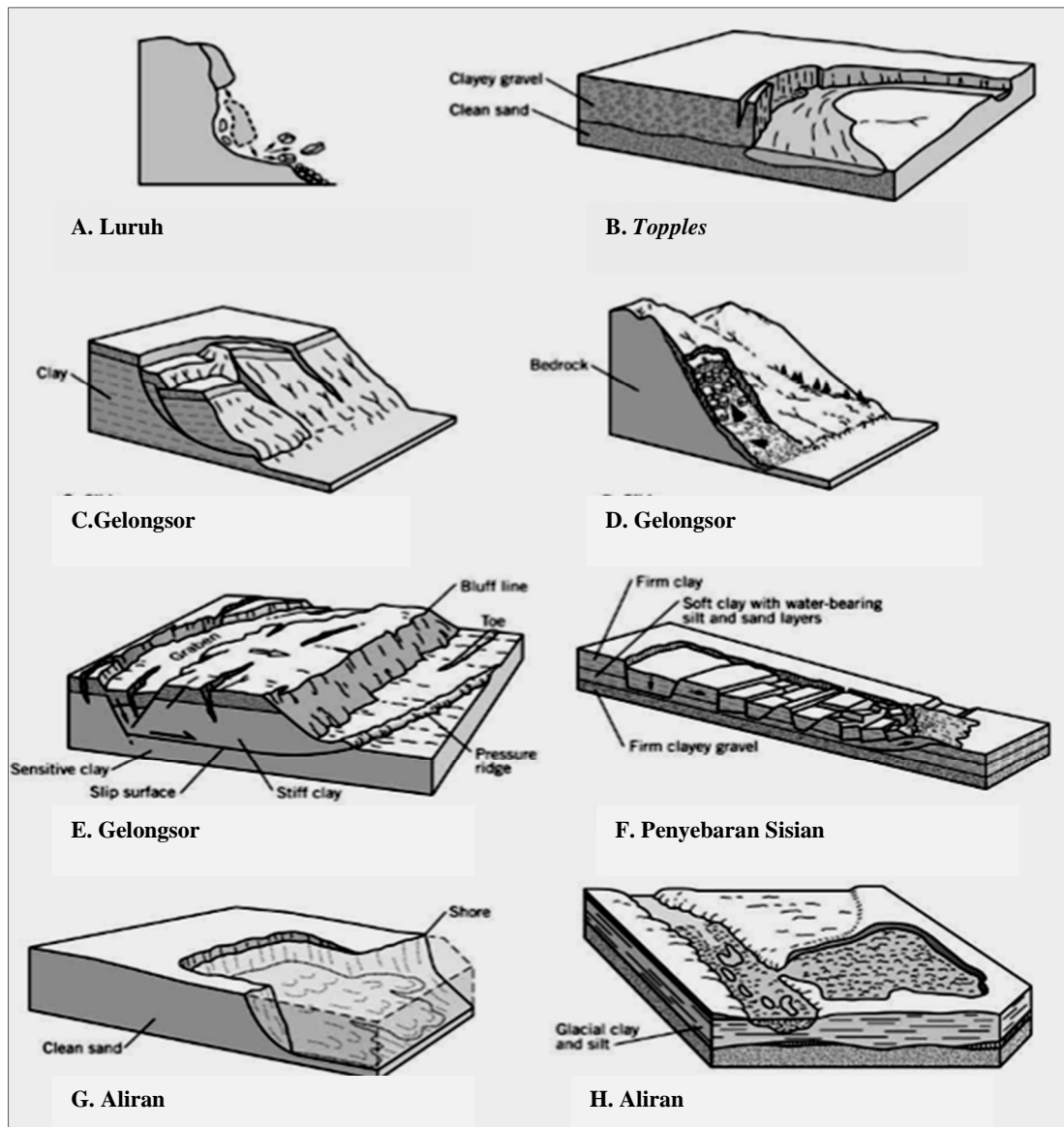
Gambar 2.13 Perbedaan hasil kekuatan geser dari uji standar geser langsung dengan tahap berbilang (Hormdee *et al.*, 2012)

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

σ_n kPa	Nilai uji penelitian τ pada regangan 3 %, kPa	Nilai τ_f diperoleh dari nilai asimtot, kPa	Nilai yang diramalkan τ_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 Faktor Keamanan Pada Skestabilan Lereng

Pada umumnya tarikan gravitasi dan resapan (*seepage*) cenderung menyebabkan ketidakstabilan (*instability*) pada lereng mula-mula (*natural slope*), dan pada lereng yang dibentuk karena galian tanah dan yang ditimbun (Craig, 1987). Contoh-contoh keruntuhan pada lereng seperti dapat dilihat pada Gambar 2.14 (Varnes, 1978).



Gambar 2.14 Beberapa contoh dari keruntuhan lereng (Varnes, 1978)

2.6.1 Metode Kestimbangan Batas

Dalam permasalahan lereng, faktor keamanan lereng terhadap keruntuhan penting untuk diketahui dalam suatu desain kestabilan lereng. Analisis kestabilan lereng dibuat menggunakan metode kestimbangan batas. Dengan menganggap keruntuhan terjadi di sepanjang bidang runtuh yang diketahui, kekuatan geser yang diperlukan untuk mengekalkan keadaan kestimbangan batas dibandingkan dengan tegangan geser yang terjadi pada bidang runtuh akan memberikan faktor keamanan

rata-rata di sepanjang bidang tersebut. Metode bidang keregangan ini telah memberikan hasil yang selamat untuk suatu keruntuhan pada keadaan simetri.

Secara umumnya, faktor keamanan ditakrifkan sebagai

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.18)$$

di mana FS ialah faktor keamanan lereng, τ_f ialah kekuatan geser seragam pada tanah dan τ_d pula ialah tegangan geser seragam yang terjadi pada bidang runtuh. Dengan dua parameter kekuatan geser yaitu kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam efektif (ϕ'), Persamaan (2.19) menjadi

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \tan \phi' \quad (2.19)$$

di mana c' ialah kohesi efektif, ϕ' ialah sudut geser dalam efektif dan σ_n' ialah tegangan normal efektif pada bidang keruntuhan. Dengan cara yang sama dapat dituliskan bahwa

$$\tau_d = c_d' + \sigma_n' \tan \phi_d' \quad (2.20)$$

di mana c_d' dan ϕ_d' adalah kohesi yang efektif dan sudut geser dalam efektif yang terjadi di sepanjang permukaan bidang keruntuhan. Dengan menggantikan Persamaan (2.19) dan (2.20) ke dalam Persamaan (2.18), maka persamaan berikut diperolehi.

$$FS = \frac{c' + \sigma_n' \tan \phi'}{c_d' + \sigma_n' \tan \phi_d'} \quad (2.21)$$

Jika aspek lain dari faktor keamanan yaitu faktor keamanan berkenaan dengan kohesi (FS_c') dan faktor keamanan berkaitan dengan sudut geser dalam (FS_{ϕ}'), diambil kira, persamaannya dapat ditakrifkan sebagai

$$FS_c' = \frac{c'}{c_d} \quad (2.22)$$

dan

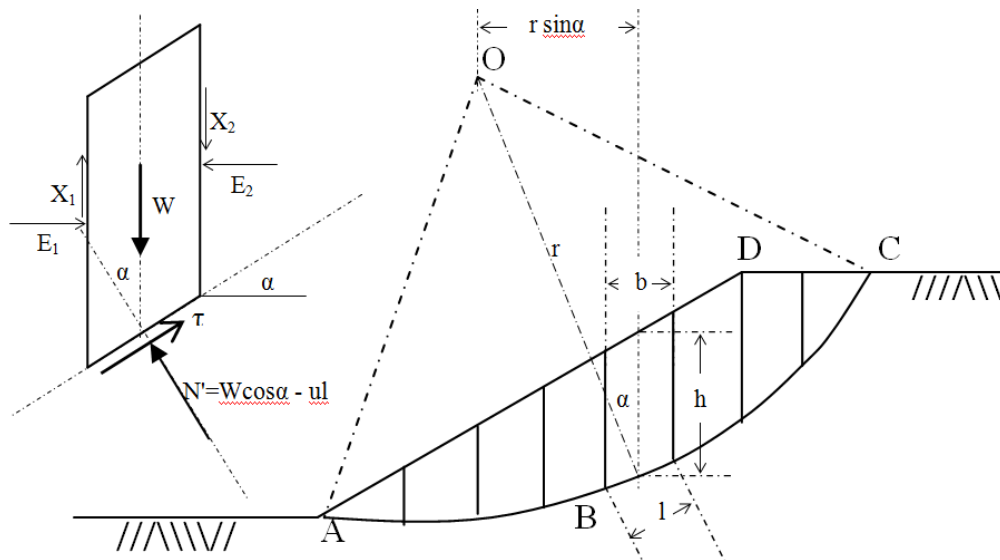
$$FS_{\phi}' = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi_d} \quad (2.23)$$

2.6.2 Faktor Keamanan Dengan Metode Irisan

Pada metode irisan, potensi permukaan bidang runtuh yang dianggap berbentuk lingkaran dengan pusat jejari r , seperti pada Gambar 2.25. Jisim tanah (ABCD) berada pada permukaan bidang keruntuhan AC, dibuat beberapa bidang tegak menjadi sejumlah irisan dengan lebar b (lebar b tidak perlu sama). Dasar dari setiap irisan adalah dianggap sebagai bidang dengan garis lurus. Untuk bidang runtuh berbentuk lingkaran merupakan garis sentuh. Ini membentuk sudut α terhadap garis mendatar. Cara ini juga dapat digunakan pada bidang runtuh berbentuk blok atau bentuk lainnya. Faktor keamanan dinyatakan sebagai ratio kekuatan geser yang ada (τ_f) terhadap kekuatan geser (τ_m) yang harus digerakkan untuk mempertahankan syarat kesetimbangan batas yaitu

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (2.24)$$

Faktor keamanan diperkirakan pada setiap irisan dengan nilai yang sama, agar terdapat keadaan yang saling membantu di antara irisan-irisan, sehingga harus ada daya yang bertindak di antara setiap irisan-irisan tersebut (Craig, 1987). Daya yang bertindak pada setiap irisan-irisan dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Metode Irisan (Craig, 1987)

Daripada Gambar 2.15, daya-daya yang bertindak pada setiap irisan adalah berat jumlah irisan W yaitu γbh (γ_{sat} bila diperlukan) dan daya normal jumlah N yaitu $W \cos \alpha$. Daya normal ini akan menjadi daya normal efektif bila terdapat tegangan air pori U yang besarnya sama dengan ul dengan u adalah tegangan air pori pada pusat

dasar dan l adalah panjang dasar. Jangkain itu, daya geser pada dasar $T = \tau_m l$, daya normal jumlah pada sisi-sisi irisan ialah E_1 dan E_2 , serta daya geser pada sisi-sisi ialah X_1 dan X_2 .

Dengan mengambil momen terhadap titik O , maka jumlah momen akibat daya-daya geser T pada bidang runtuh AC harus sama dengan momen akibat berat jisim tanah $ABCD$. Untuk setiap irisan lengan momen W adalah $r \sin \alpha$, sehingga

$$\sum T_r = \sum W_r \sin \alpha \quad (2.25)$$

di mana

$$T = \tau_m l = \frac{\tau_f}{F} l \quad (2.26)$$

Dengan menggabungkan Persamaan (2.26) ke dalam Persamaan (2.25) Persamaan baru yang terhasil ialah

$$\sum \frac{\tau_f}{FS} l = \sum W_r \sin \alpha \quad (2.27)$$

dan

$$FS = \frac{\sum \tau_f \sin \alpha}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.28)$$

Untuk analisis yang menggunakan tegangan efektif, maka

$$FS = \frac{\sum (c' + \sigma'_n \tan \phi') l}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.29)$$

atau

$$FS = \frac{c' L_a + \tan \phi' \sum N'}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.30)$$

di mana L_a ialah panjang bidang keruntuhan (busur) AC . Persamaan (2.30) adalah tepat tetapi ada pendekatan lain dalam menentukan daya N' . Untuk bidang keruntuhan yang diberikan, nilai F akan bergantung kepada bagaimana daya N' tersebut diperkirakan.

Berdasarkan metode irisan, penyelesaian menganggap bahwa resultan daya-daya antara irisan ialah sifar. Penyelesaian tersebut meliputi penyelesaian berulang untuk daya-daya pada setiap irisan seranjang terhadap bidang keruntuhan, yaitu

$$N' = W \cos \alpha - ul \quad (2.31)$$

sehingga faktor keamanan yang dinyatakan dalam tegangan efektif (2.31) akan menjadi

$$F = \frac{c' L_a + \tan \phi' \sum (W \cos \alpha - ul)}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.32)$$

Nilai $W \cos \alpha$ dan $W \sin \alpha$ dapat diperkirakan secara grafik atau analisis untuk setiap irisan, manakala α dapat diukur dan diperkirakan. Pada lereng yang belum mengalami keruntuhan, maka bidang keruntuhan harus disesuaikan sehingga mendapatkan faktor keamanan yang paling rendah. Faktor keamanan yang terendah inilah merupakan faktor keamanan dari lereng tersebut (Craig, 1987). Bila keruntuhan sudah terjadi, maka bidang keruntuhan sudah dikenal pasti tempatnya, kemudian Persamaan (2.32) dapat digunakan untuk mengira analisis balik. Analisis balik ini diperlukan untuk mengira kekuatan geser ketika keruntuhan lereng terjadi, yaitu dengan faktor keamanan (FK) bersamaan 1.00. Oleh karenanya, Persamaan (2.32) dapat digunakan pada pelbagai pola bidang keruntuhan lereng, termasuk pada keruntuhan blok yang umumnya terjadi pada lereng batuan.

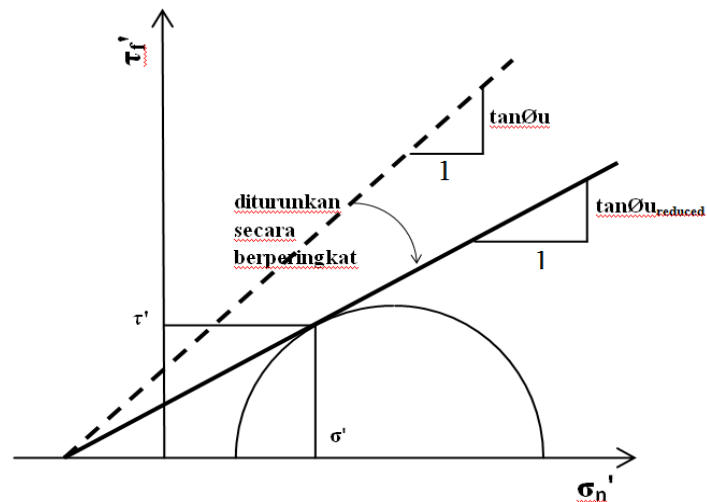
2.6.3 Penentuan Faktor Keamanan Lereng Dengan Metode Unsur Berhingga

Jika metode unsur terhingga (FEM) digunakan dalam analisis kestabilan lereng, tiada anggapan bidang keruntuhan dibuat terlebih dahulu. Faktor keamanan lereng (FS) dihitung dengan mencari bidang lemah pada struktur lapisan tanah pada lereng. Faktor keamanan diperoleh dengan cara mengurangkan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) yang terkenal dengan istilah *C-Phi Reduction* (Plaxis, 2004; Cheang, 2013). Kemudian secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan, nilai faktor keamanan (FK) dihitung dengan persamaan (2.33)

$$\sum FK = \frac{c}{c_{\text{reduced}}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{\text{reduced}}} \quad (2.33)$$

di mana $\sum FK$ ialah faktor keamanan, c dan ϕ ialah kekuatan geser, c_{reduced} dan ϕ_{reduced} ialah nilai c dan ϕ terkecil yang diperolehi semasa program Plaxis menunjukkan tanah mengalami keruntuhan (*soil body collapse*).

Analisis proses pengiraan ini di dalam keruntuhan Mohr-Coulomb digambarkan pada Gambar 2.16. Metode seperti ini dalam program Plaxis disebut sebagai "*C-Phi reduction*". Tabel 2.3 menunjukkan tiga cara pengiraan kestabilan lereng dengan metode unsur terhingga pada tanah berbijian halus tak tersalir dengan menggunakan program Plaxis. Pengiraan pada keadaan tak tersalir dilakukan dengan menggunakan kasusemua cara tersebut. Bila pengiraan keadaan tersalir diperlukan, maka semua parameter maolah raga dalam parameter efektif dan jenis bahan dipilih sebagai tersalir. Model tanah yang dipakai adalah Model Mohr Coulomb. Model ini dipakai karena clay shale merupakan tanah yang keras dan memiliki kekuatan geser yang tinggi yang tidak termasuk dalam kriteria lempung lunak. Jangkain itu Model Mohr Coulomb memudahkan penggunaan parameter tanah.



Gambar 2.16 Proses perhitungan faktor keamanan FK dalam metode unsur terhingga FEM (Plaxis, 2004)

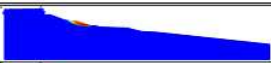
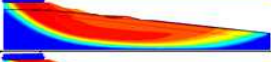


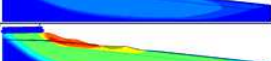

Tabel 2.3 : Pelbagai parameter pada tanah berbutiran halus tak tersalir dengan Plaxis (Plaxis, 2004)

Jenis	Parameter			
	Material	Kekuatan Geser	Kekakuan	Analisis
Tak Tersalir A	Tak Tersalir	$c'; \phi'; \psi'$	$E'_{50}; \nu'$	Tegangan efektif
Tak Tersalir B	Tak Tersalir	$c=c; \phi=0; \psi=0$	$E'_{50}; \nu'$	Tegangan efektif
Tak Tersalir C	Tersalir	$c=c; \phi=0; \psi=0$	$E_u; \nu=0.495$	Tegangan total

2.7 Penentuan Kekuatan Geser Ketika Keruntuhan Lereng

Analisis kekuatan geser untuk kasus semasa keruntuhan menggunakan metode berangka dengan mengurangi parameter kekuatan geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) sehingga faktor kasusalamatan menghampiri 1.0. Program Plaxis digunakan dalam menganalisis kasus keruntuhan lereng di jalan Tol Cipularang, Jawa Barat. Hasil analisis baliknya adalah seperti pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 (Irsyam *et al.*, 2011).

Tabel 2.4 : Simulasi penurunan kekuatan geser dalam menentukan kekuatan geser yang terjadi menggunakan program Plaxis (Irsyam *et al.*, 2011)

Alt #	Parameter Tanah										Bidang Keruntuhan	FK	Sesuai/ Tidak sesuai
	A		B		C		D		E				
	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]			
1	40	10	10	5	7.5	1	10	20	25	16		1.15	Tidak sesuai
2	50	10	20	5	7.5	1	10	20	25	16		1.35	Tidak sesuai
3	60	10	25	5	7.5	1	10	20	25	16		1.35	Tidak sesuai
4	70	10	40	5	7.5	1	10	20	25	16		1.35	Tidak sesuai
5	40	10	10	10	7.5	1	10	15	25	16		1.29	Tidak sesuai
6	50	10	20	10	7.5	1	10	15	25	16		1.34	Tidak sesuai

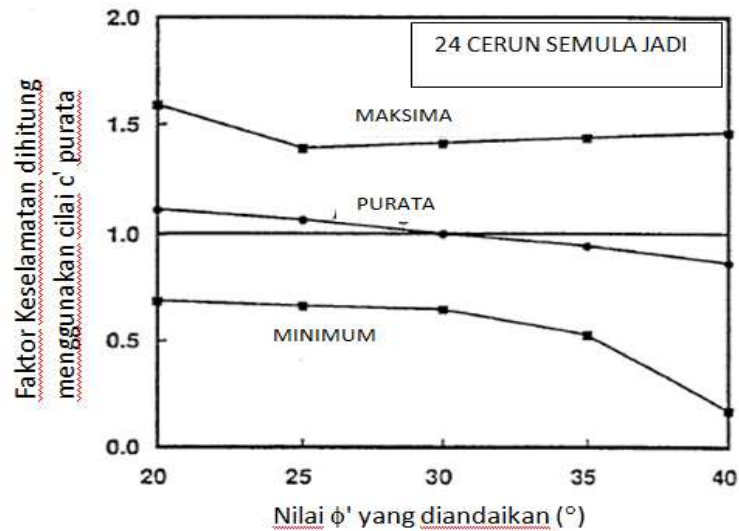
Tabel 2.5 : Penurunan kekuatan geser dalam menentukan kekuatan geser yang terjadi menggunakan program Plaxis (Irsyam *et al.*, 2011)

Alt #	Parameter Tanah										Bidang Keruntuhan	FK	Sesuai/ Tidak sesuai
	A		B		C		D		E				
	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]			
13	40	10	10	10	7.5	1	5	15	25	16		1.06	Sesuai
14	50	10	20	10	7.5	1	5	15	25	16		1.06	Sesuai
15	60	10	25	10	7.5	1	5	15	25	16		1.06	Sesuai
16	70	10	40	10	7.5	1	5	15	25	16		1.06	Sesuai
17	40	10	10	5	7.5	1	5	13	25	16		1.00	Sesuai
18	50	10	20	5	7.5	1	5	13	25	16		1.00	Sesuai

Beberapa penelitian yang lalu telah menilai keruntuhan pada tanah clay shale, dengan cara melakukan analisis balik untuk menentukan kekuatan geser ketika

kejadian kelongsoran. Terdapat 24 lokasi berbeda yang telah dikaji untuk mendapatkan hubungan antara sudut geser dalam pada keadaan puncak dan keadaan sisa (Mesri dan Diaz, 1986). Dalam penelitian yang lain, kekuatan geser dari clay shale tidak terganggu diuji melalui uji geser langsung. Manakala analisis kestabilan lereng dilakukan untuk mengira kekuatan geser sisa dari clay shale ketika lereng runtuh (Tien *et al.*, 1987). Penelitian serupa pada kasus yang lain juga dilakukan dengan meratiokan hasil kekuatan geser sampel terganggu melalui uji geser cincin (*Ring Shear Test*) dan uji geser terus (*Direct Shear Test*) yang kemudiannya dibandingkan dengan kekuatan geser yang menyebabkan keruntuhan terjadi (Timothy dan Hisyam, 1992). Penelitian serupa dengan kasus yang berbeda pada tanah clay shale juga dilakukan oleh beberapa peneliti seperti mencari rentang faktor keamanan lereng dari 24 kasus yang berbeda, seperti pada Gambar 2.17 (Wilson *et al.*, 1999). Kemudian analisis balik dilakukan dengan membandingkannya pada keadaan kekuatan geser puncak dan kekuatan geser sisa (Liew *et al.*, 2003).

Terdapat beberapa penelitian terdahulu berkaitan analisis balik pada kejadian keruntuhan lereng termasuklah kestabilan jangka panjang dari tanah lempung dan tanah clay shale lereng kaku, dan analisis balik terperinci dari 99 kasus sejarah keruntuhan lereng di 36 lempung lunak, lempung kaku dan clay shale (Mesri dan Shahien, 2003). Penelitian mengenai perbedaan antara metode kesetimbangan batas dengan metode unsur terhingga serta metode numerikal telah memberikan hasil yang sangat memuaskan pada beberapa kasus keruntuhan di Indonesia dan daerah lain di dunia (Gow, 2012; Kainthola, 2013; Brandon, 2013; Singh, 2012; Zhang *et al.*, 2010). Manakala penelitian analisis balik dengan melakukan uji kekuatan geser di lapangan dengan uji kotak geser langsung berukuran 750 mm × 750 mm dilakukan untuk memperoleh kekuatan geser efektif langsung dari uji di lapangan (Moffat dan Riviera, 2013).



Gambar 2.17 Rentang faktor keamanan yang diperkirakan melalui analisis balik menggunakan parameter kohesi rata-rata (Wilson *et al.*, 1999)

Penelitian terdahulu tentang enam kasus keruntuhan di Okimi, Yosio, Mukohidehara, Engyoji, Iwagami dan Tsuboyama di Jepun oleh Binod *et al.*, (2005) telah dilakukan analisis balik untuk mengetahui kekuatan geser sisa yang terjadi. Penelitian dilakukan dengan 2 metode, yaitu metode pertama dengan menganggap kohesi sisa c_r sifar dan faktor keamanan (FK) adalah 1.00, dan metode penelitian kedua dengan c_r lebih besar dari sifar dengan faktor keamanan 0.98. Hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.6 (Binod *et al.*, 2005).

Tabel 2.6 : Hasil analisis balik dan faktor keamanan dengan dua metode (Binod *et al.*, 2005)

Kasus. lapangan kelongsoran lereng	Metode 1	Metode 2		Dengan kekuatan rata-rata (FK)
	$c' = 0$; FK=1.0 $\phi'_{\text{sisa}} (^\circ)$	$c' = z_{\text{avg}}$ $\phi'_{\text{sisa}} (^\circ)$	c' (kPa)	
Okimi	12.7	9.1	13	1.016
Yosio	14.3	9.7	5.8	1.098
Mukohidehara	19.7	15.4	11	0.987
Engyoji	16.2	11.2	8	0.772
Iwagami	15.1	10.4	9.6	1.038
tsuboyama	11	6.3	7	1.057

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Empat permasalahan pada lereng clay shale yang telah terbuka ataupun terdapat bidang runtuh yang berkaitan diteliti dalam penelitian ini. Pertama ialah kasuspelapukan yang disebabkan oleh pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan sifat-sifat indeks dan fisik clay shale. Kedua ialah tidak diketahui secara pasti penurunan kekuatan geser tanah clay shale dari keadaan tegangan puncak hingga mencapai tegangan residual dari keadaan kasusterhadap proses pelapukan. Ketiga pula ialah walaupun pada lereng sudah terdapat bidang runtuh dan kekuatan gesernya pada tegangan residual, namun lereng tetap stabil dan tidak runtuh. Apabila dilakukan kerja pemotongan pada lereng yang mengakibatkan terjadinya pelepasan tegangan pada bidang runtuh, maka lereng akan runtuh. Keempat, tidak diketahui dengan pasti kekuatan geser residual pada bidang runtuh semasa keruntuhan lereng terjadi dan bagaimana memperoleh parameter kekuatan geser residual itu di laboratorium.

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 berai 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. Ketika terjadinya kedua-dua proses pelapukan tersebut, diamati pula perubahan pengukuran isi sampel untuk melihat kasus pelapukan terhadap perubahan sifat indeks clay shale. 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 terbahagi kepada dua yaitu kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan.

Pengumpulan data dibuat berdasarkan topografi pada lokasi Semarang-Bawen dan uji pengeboran yang telah dilakukan oleh beberapa syarikat sebelum ini. Data topografi berkaitan dengan kasus penelitian diperlukan dalam kestabilan lereng yang pernah terjadi keruntuhan. Manakala data log lobang jara dari uji pengeboran sangat bermanfaat dalam membuat stratigrafi lapisan tanah berkenaan bagi tujuan analisis balik dalam kestabilan lereng.

Untuk menjawab objektif penelitian yang telah dinyatakan, maka suatu disain dan diagram alir penelitian dibuat supaya penelitian ini tersusun secara sistematik. 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.

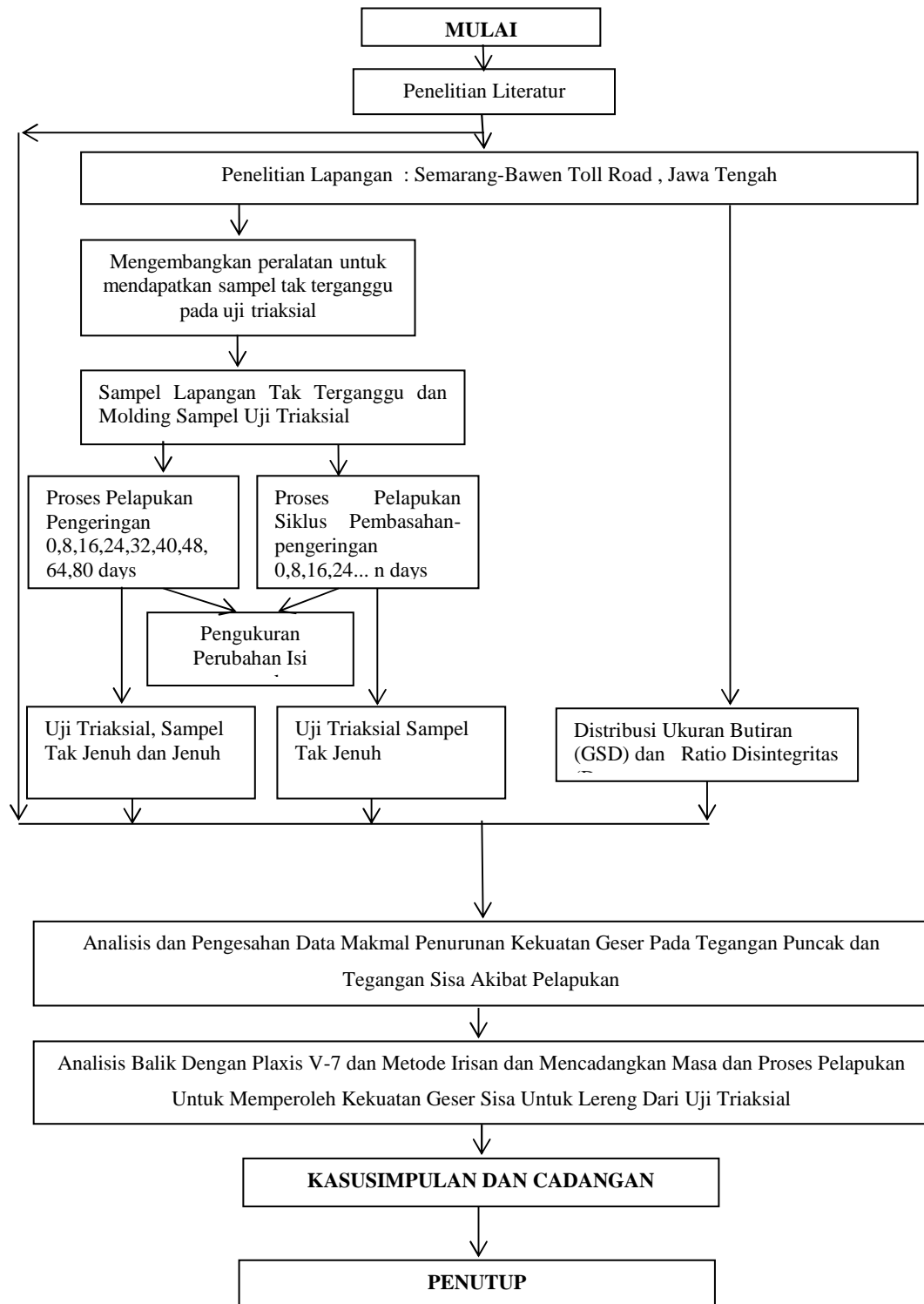
3.2 Disain dan Diagram Alir Penelitian

Pada awal penelitian, penyusunan dan pengenalpastian penelitian sifat dan perilaku clay shale dalam kestabilan lereng sebagai sesuatu yang baru dan secara spesifik dilakukan melalui penelitian literatur. Satu lokasi di Hambalang Jawa Barat dan jalan tol Semarang-Bawen STA 19+250 Jawa Tengah dipilih sebagai lokasi sampel penelitian. Sampel-sampel diambil daripada lapangan penelitian untuk beberapa uji awal di laboratorium mekanik tanah, laboratorium kimia dan mineralogi serta uji scanning elektro magnetic (SEM). Seterusnya, penyelidikan lapangan di

lapangan dilakukan untuk mendapatkan data tanah dan peta elevasi ketinggian bagi tujuan analisis kestabilan lereng (Petrosol, 2012).

Uji triaksial unconsolidated undrained (*Triaxial UU Test*) dilakukan pada sampel clay shale yang telah melalui dua proses pelapukan pada masa yang telah ditentukan. Ratio disintegritas (D_R) dari clay shale dalam proses pelapukan dihasilkan dari uji analisis ayakan dan hidrometer setelah distribusi ukuran butiran diperolehi.

Analisis data laboratorium dan validasi data dilakukan untuk mendapatkan hasil perubahan kekuatan geser terhadap proses pelapukan serta hubungannya terhadap parameter clay shale yang lain. Analisis kekuatan geser data laboratorium dibandingkan dengan analisis balik menggunakan program Plaxis untuk menilai dan mengesyorkan parameter kekuatan geser yang sesuai bagi keperluan pedisain disain kestabilan lereng yang mempunyai binaan infrastruktur di atasnya. Disain dan diagram alir penelitian ini boleh dirujuk pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir kerja penelitian kelongsoran pada clay shale

3.3 Penyelidikan Lapangan

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk mendapatkan maklumat dan data berkaitan tanah dan topografi untuk keperluan analisis kestabilan lereng.

3.3.1 Penyelidikan Tanah

Untuk keperluan data tanah, uji-uji berikut dilakukan:

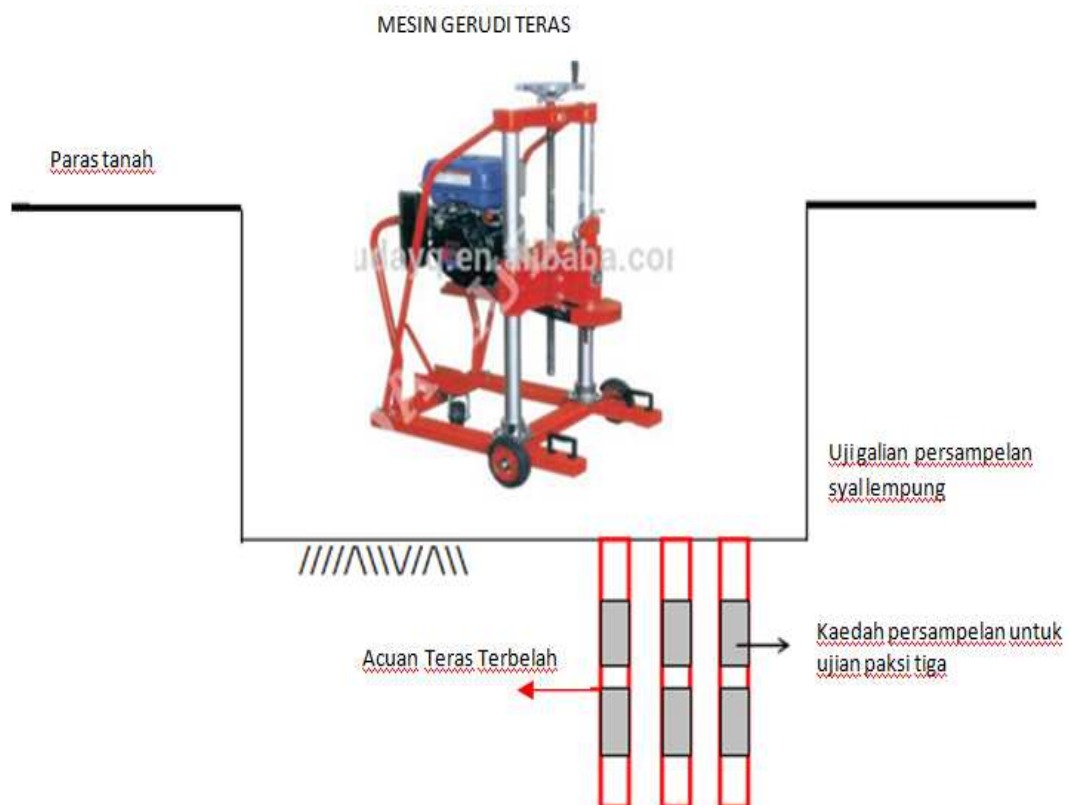
- (i) Uji penggerudian lubang dalam dengan sistem penerasan (*coring system*).
- (ii) Uji Standard Penetrasi Test (SPT).
- (iii) Persampelan tak terganggu menggunakan tabung sampel berdinding tipis (*Thin Walled Tube Sampler*) dan tong teras tunggal (*Single Core Barrel*).
- (iv) Persampelan tak terganggu dari uji lubang galian (*test pit*) untuk uji triaksial.
- (v) Persampelan terganggu clay shale untuk uji sifat indeks, graviti tentu (G_s), distribusi ukuran butiran (GSD), ratio disintegritas (D_R), mineralogi dengan pembelauan X-Ray (*X Ray Diffraction*).

3.3.2 Topografi

Pengukuran topografi sangat diperlukan untuk mendapatkan peta elevasi ketinggian untuk menunjukkan bentuk kelerengan dalam analisis kestabilan lereng.

3.4 Metode Persampelan 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).

3.5 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.

3.5.1 Uji Sifat-Sifat Indeks Clay Shale

Semua uji sifat-sifat indeks clay shale dilakukan berdasarkan standardan uji dari *American Standard for Testing Material* (ASTM). Uji sifat-sifat indeks ini meliputi uji kadar air (ASTM D 2216-80, 1989), uji berat unit (ASTM D 653-88, 1989), uji graviti tentu (ASTM D 854-83, 1989), uji batas Atterberg (ASTM D 4318-84, 1989), dan uji distribusi ukuran butiran (ASTM D 422-72, 1989).

3.5.2 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.

3.5.2.1 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.

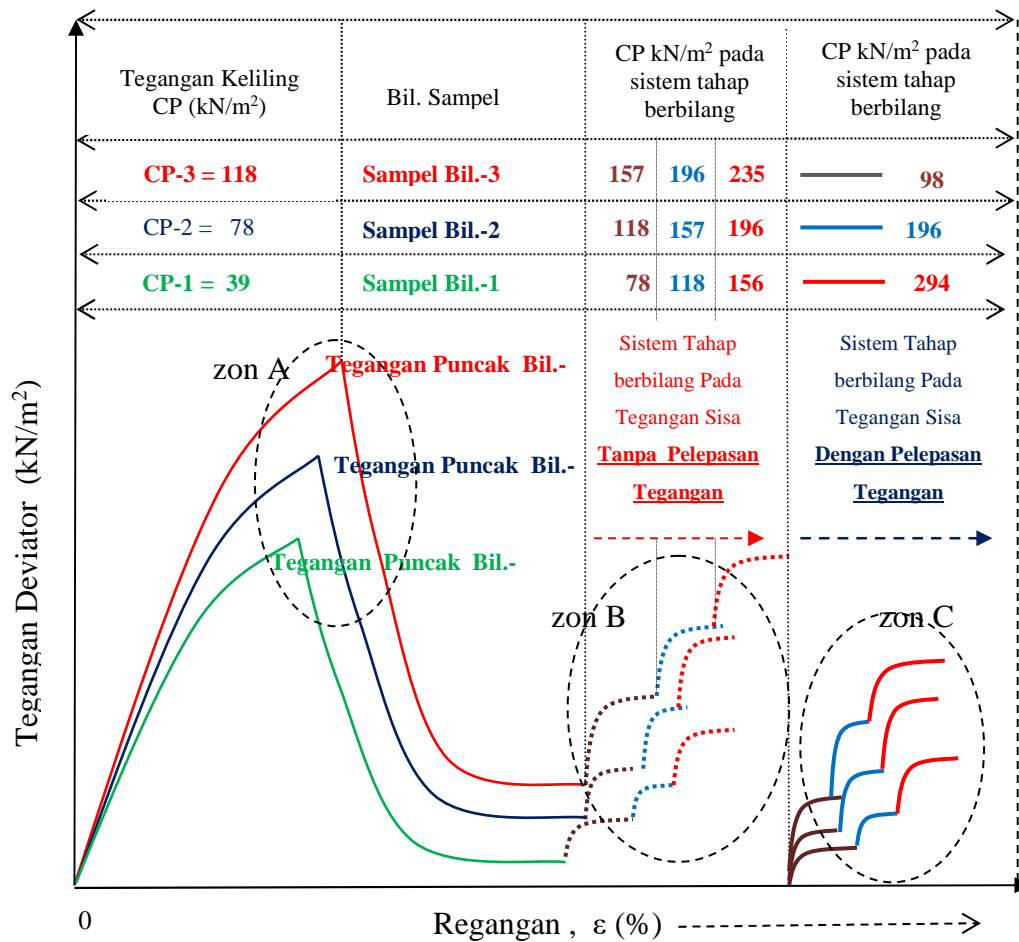
3.5.2.2 Hasil Uji Triaksial Pada Proses Pengeringan Clay Shale Tak Jenuh

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/m² 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/m² menjadi CP-2 = 78 kN/m² hingga tegangan sisih stabil. Kemudian, tegangan keliling ditambah lagi menjadi CP-3 = 118 kN/m² hingga akhirnya CP-4 = 157 kN/m².

Perkara serupa diteruskan pada sampel clay shale yang kedua dengan tegangan keliling awal CP-2 adalah 78 kN/m² dan sampel clay shale yang ketiga dengan kekuatan tegangan keliling awal CP-3 sebesar 118 kN/m². 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 (*tahap berbilang system*) pada uji triaksial tak jenuh

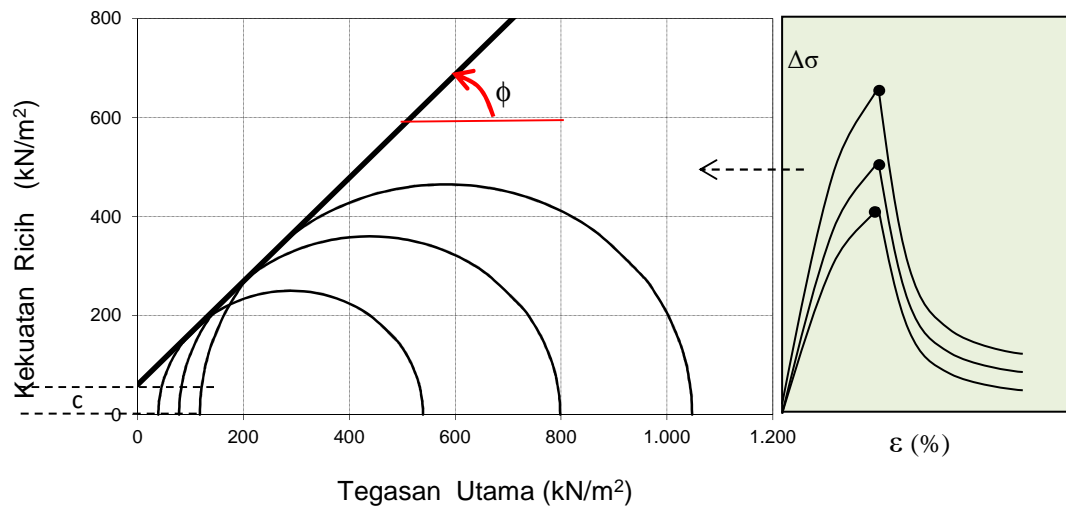
Contoh Uji	Tegangan keliling awal (kN/m ²)	Tambahkan Tegangan Keliling dengan Sistem Tahap berbilang , (kN/m ²)		
		CP-1	CP-2	CP-3
1	39	78	118	157
2	78	118	157	196
3	118	157	196	235



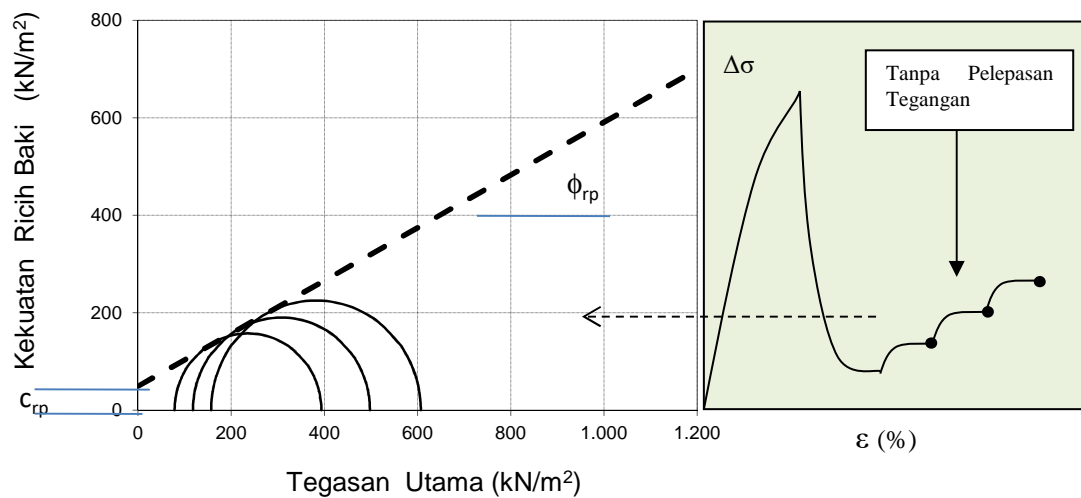
Gambar 3.4 Tegangan deviator terhadap regangan tiga sampel clay shale pada tegangan keliling CP-1= 39 kN/m², CP-2= 78 kN/m² & CP-3= 118 kN/m², yang dilanjutkan dengan sistem tahap berbilang pada keadaan residual

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 (ϕ) 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

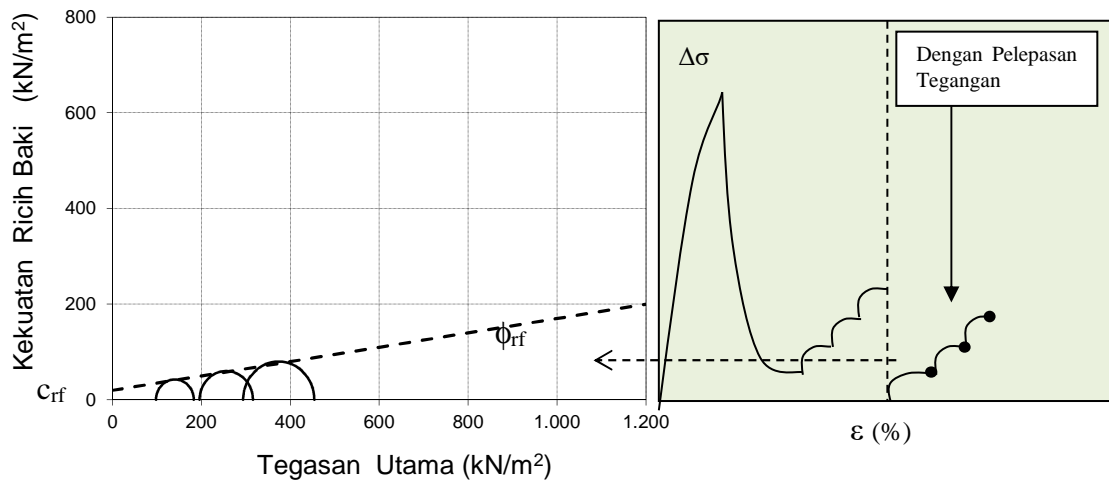
kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang unconsolidated undrained.



Gambar 3.5 Penentuan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak drainase (UU) pada tegangan puncak



Gambar 3.6 Penentuan kohesi residual (c_{rp}) dan sudut geser dalam residual (ϕ_{rp}) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak terdrainase (UU) pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan



Gambar 3.7 Penentuan kohesi residual (c_{rf}) dan sudut geser dalam residual (ϕ_{rf}) dengan lingkaran Mohr dari uji triaksial tak jenuh tak terdrainase pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan

3.5.2.3 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 residual tercapai.

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.

3.5.3 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).

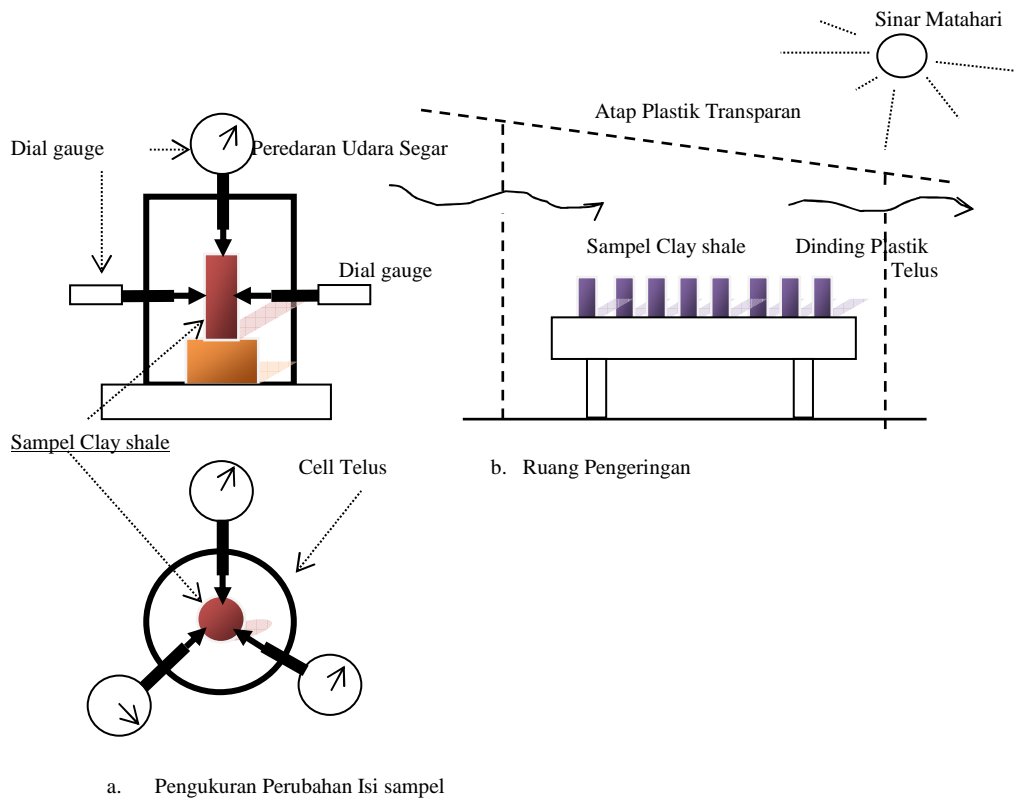
Selama proses pengeringan dilakukan, perubahan isi sampel sampel tanah diukur dengan alat pengubah isi sampel (*volumetric change*) pada setiap hari. Perubahan isi sampel dapat diukur dengan mengetahui perubahan tinggi dan diameter sampel. Perubahan tersebut diperolehi dengan meletakkan tiga alat pencatat 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 minit 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 desain 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 3.5 : 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	Uji Triaksial 8 hari	Rendam 5 min	Hari ke 2	Pengeringan	Hari ke 2 ~ 6	Rendam 5 min	Hari ke 6	Pengeringan	Hari ke 6 ~ 10	Rendam 5 min	Hari ke 10	Pengeringan	Hari ke 10 ~ 14	Rendam 5 min	Hari ke 14	Pengeringan	Hari ke 14 ~ 18	Rendam 5 min	Hari ke 18	Pengeringan	Hari ke 18 ~ 22	Rendam 5 min	Hari ke 22	Pengeringan	Hari ke 22 ~ 26	Rendam 5 min	Hari ke 26	Pengeringan	Hari ke 26 ~ 30	Rendam 5 min	Hari ke 30	Pengeringan	Hari ke 30 ~ 34	Rendam 5 min	Hari ke 34	Pengeringan	Hari ke 34 ~ 38	Rendam 5 min	Hari ke 38	Pengeringan	Hari ke 38	Rendam 5 min	Hari ke 40	Pengeringan	Hari ke 40

3.6 Rencana Uji Laboratorium

Tabel 3.6, Tabel 3.7 dan Tabel 3.8 berikut ini adalah ringkasan dari uji-uji yang dilakukan di laboratorium.

Tabel 3.6 : Uji-uji pedahuluan di laboratorium

Sampel Clay shale	Jenis Uji Awalan di Laboratorium					
	Mineralogi by XRD	S.E.M	Sifat Indeks	Graviti Tentu (Gs)	Distribusi ukuran butiran (GSD)	Triaksial (UU)
Hambalang, Jawa Barat	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Jalan-Tol Semarang-Bawen	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabel 3.7 : Uji laboratorium pada proses pelapukan pengeringan

Sampel Clay shale	Waktu Pengeringan Proses Pelapukan	Pengukuran Perubahan Isi sampel	Uji Ratio Disintegritas (DR)	Uji Triaksial (UU)	
				Tak jenuh	Jenuh
Semarang-Bawen	0 hari	✓	✓	✓	✓
	4 hari	✓	✓	✓	✓
	8 hari	✓	✓	✓	✓
	16 hari	✓	✓	✓	✓
	24 hari	✓	✓	✓	✓
	32 hari	✓	✓	✓	✓
	40 hari	✓	✓	✓	✓
	48 hari	✓	✓	✓	✓
	64 hari	✓	✓	✓	✓
	80 hari	✓	✓	✓	✓
Hambalang	0 hari	✓	✓	✓	✓
	4 hari	✓	✓	✓	✓
	8 hari	✓	✓	✓	✓
	16 hari	✓	✓	✓	✓
	24 hari	✓	✓	✓	✓
	32 hari	✓	✓	✓	✓
	40 hari	✓	✓	✓	✓
	48 hari	✓	✓	✓	✓
	64 hari	✓	✓	✓	✓
	80 hari	✓	✓	✓	✓

Tabel 3.8 : Jenis uji laboratorium pada proses pelapukan pembasahan dan pengeringan

Sampel Clay shale	Waktu Pengeringan-Pembasahan Proses Pelapukan	Pengukuran Perubahan Isi sampel	Uji Ratio Disintegritas *) (DR)	Uji Triaksial UU (Tak jenuh)
Semarang-Bawen	0 hari	✓	✓	✓
	0-8 hari	✓	--	--
	8 hari	✓	✓	✓
	8-16 hari	✓	--	--
	16 hari	✓	✓	✓
	16-24 hari	✓	--	--
	24 hari	✓	✓	✓
	24-32 hari	✓	--	--
	32 hari	✓	✓	✓
	32-40 hari	✓	--	--
	40 hari	✓	✓	✓
Hambalang	0 hari	✓	✓	✓
	0-8 hari	✓	--	--
	8 hari	✓	✓	✓
	8-16 hari	✓	--	--
	16 hari	✓	✓	✓
	16-24 hari	✓	--	--
	24 hari	✓	✓	✓
	24-32 hari	✓	--	--
	32 hari	✓	✓	✓
	32-40 hari	✓	--	--
40 hari	✓	✓	✓	

Catatan : Uji dihentikan pada saat clay shale sudah 100% hancur setelah hari ke-40

*) Uji Ratio Disintegritas dilanjutkan dengan metode yang sama hingga 80 hari.

3.7 Jenis dan Lokasi Laboratorium Penguji

Tabel 3.9 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 3.9 : Jenis uji dan lokasi laboratorium uji

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
5	Ratio penyepain (D_R)	Laboratorium mekanika tanah GEOINVES, Jakarta
6	Uji kimia, mineral tanah dengan XRD dan SEM	Laboratorium Direktorat of Geology, Ministry of Mining and Energy RI, Bandung, Jawa Barat dan Laboratorium Lemigas, ESDM, Cipulir, Jakarta Jangkaran.

BAB 4

UJI AWAL CLAY SHALE DI LAPANGAN DAN DI LABORATORIUM

4.1 Pendahuluan

Dalam penelitian ini, sebelum dilakukan proses pelapukan pada clay shale yang diperoleh dari lokasi Semarang-Bawen Jawa Tengah serta Hambalang Sentul Jawa Barat, pengumpulan data topografi dan geologi terlebih dahulu dilakukan. Data topografi diperlukan dari lokasi clay shale di Semarang-Bawen, yaitu pada lokasi sisi jalan bebas laluan Semarang-Bawen STA 19+250. Data topografi diperlukan untuk pengiraan kestabilan lereng khususnya menganalisis parameter kekuatan geser yang terjadi ketika keruntuhan lereng. Manakala data geologi berupa satu peta geologi diperlukan untuk mengetahui kadar jenis batuan dan formasi batuan.

Uji awalan di lapangan dan di laboratorium juga dilakukan untuk memperoleh sifat-sifat fisik dan mekanik tanah. Uji di lapangan meliputi uji pengeboran yang dilakukan bersama dengan uji standard penetration test (SPT) serta kadar lapisan tanah yang diperoleh. Uji galian juga dilakukan untuk memastikan bahwa clay shale yang akan diuji di laboratorium masih baru dan belum terjadi pelapukan. Sampel clay shale yang tidak terganggu dan terganggu dibawa ke laboratorium untuk uji sifat-sifat indeks, fisik dan mekanik. Uji mineralogi clay shale dilakukan melalui analisis kualitatif dan kuantitatif mineral clay shale daripada uji *X-Ray Diffraction*. Uji *SEM* juga dilakukan untuk menghasilkan gambar perincian bagi bentuk mineral clay shale.

4.2 Hasil Uji di Lapangan

Di sini pembahasan mengenai pengumpulan data, uji serta penelitian awal di lapangan terdiri daripada pengumpulan data mengenai gambar topografi pada kasus di jalan tol Semarang-Bawen pada STA 19+000 hingga 19+725 dan penelitian geologi. Hal lain adalah pengumpulan data mengenai uji pengeboran serta standar penetration test (SPT).

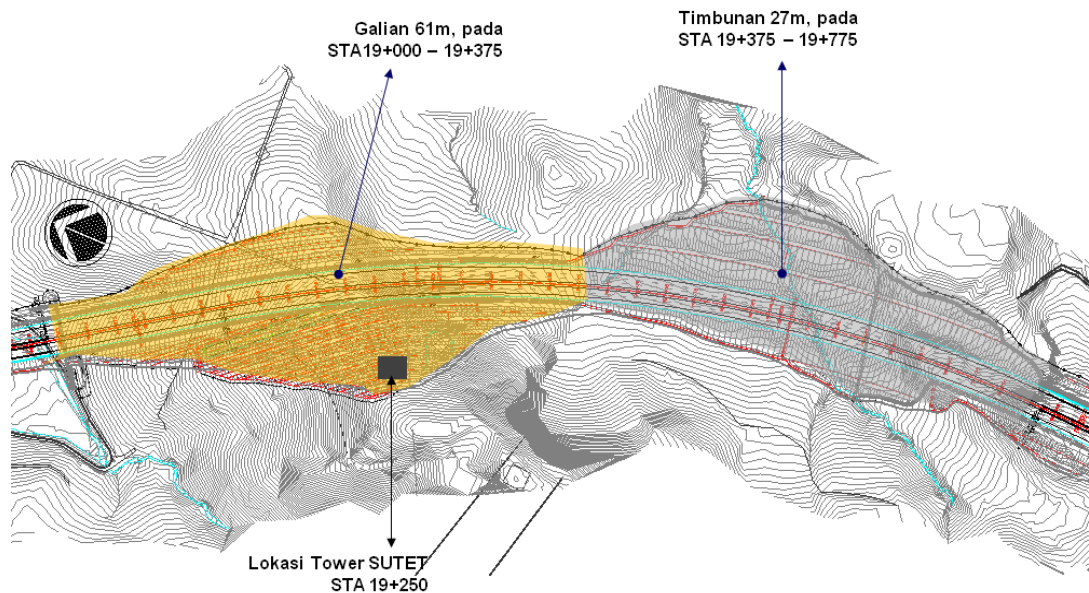
4.2.1 Topografi

Data topografi pada lokasi jalan tol Semarang-Bawen Jawa Tengah pada STA 19+000 hingga 19+725 dikumpul karena pada lokasi STA 19+250 keruntuhan lereng telah terjadi. Ia kemudiannya dijadikan kasus skestabilan lereng dalam penelitian ini. Manakala data topografi pada lokasi Hambalang Jawa Barat tidak dikumpul karena tiada analisis skestabilan lereng dibuat. Hanya persampelan clay shale saja yang dibuat untuk lokasi ini.

Data topografi telah dianalisis semasa pekerjaan jalan tol antara Semarang Jawa Tengah menuju Surabaya Jawa Timur melalui daerah Ungaran, Bawen, Solo, Sragen, Ngawi, Mojokerto (Wikipedia, 2015) seperti pada Gambar 4.1. Ketika penelitian ini dilakukan seksi jalan Semarang-Bawen telah digunakan, manakala seksi Bawen Solo masih dalam pekerjaan. Antara seksi STA 19+000 hingga STA 19+375 lereng yang dikonstruksi adalah lereng yang digali, manakala pada seksi STA 19+375 hingga STA 19+775 lereng adalah lereng yang ditambak. Pada jalur tersebut analisis topografi telah dilakukan dan penyelidikan tanah dibuat bagi kegunaan disain skestabilan lereng serta keperluan urugan tanah dan timbunan (Himawan, 2011). Kasusemua keperluan ini adalah untuk memenuhi disain jalur Tol Semarang menuju Jawa Timur. Hasil analisis topografi dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan ia merupakan lokasi terjadinya keruntuhan lereng yang akan dikaji dengan lebih lanjut.



Gambar 4.1 Rencana jalan tol trans Jawa, dari Merak ke Banyuwangi (Wikipedia, 2015)



Gambar 4.2 Peta topografi lapangan Semarang-Bawen dari STA 19+000 hingga STA 19+775 (Himawan, 2011)



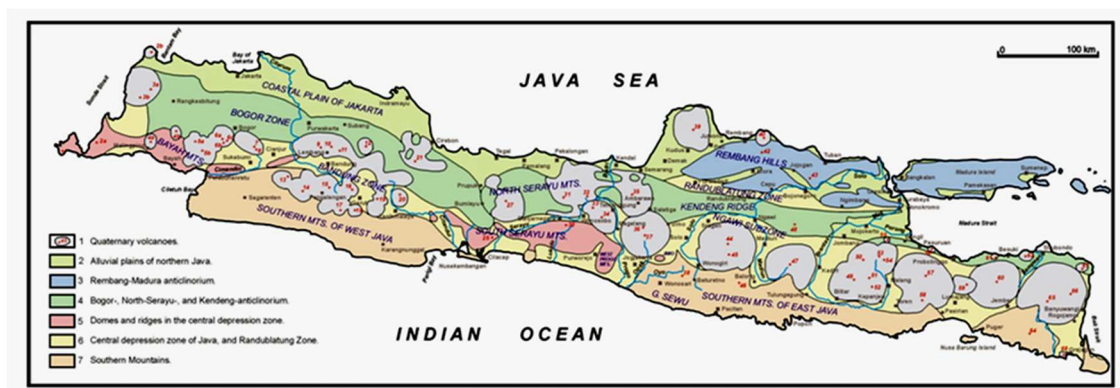
Gambar 4.3 Keruntuhan lereng pada STA 19+250 Jalan Tol Semarang-Bawen, Jawa Tengah (Himawan, 2013)

Keruntuhan lereng terjadi pada kawasan lereng galian antara STA 19+000 hingga dengan STA 19+375 yaitu pada seksi STA 19+250 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Keruntuhan terjadi karena kerja galian yang dilakukan begitu dalam hingga 60 m dan mendedahkan lapisan clay shale yang tergal di bagian dasar galian. Maka ini menyumbang kepada terjadinya keruntuhan pada lereng tersebut (Himawan, 2013).

4.2.2 Penelitian Geologi

Penelitian geologi dilakukan pada lokasi Hambalang Jawa Barat dan Semarang-Bawen Jawa Tengah. Penelitian geologi kawasan ini dan sekitarnya adalah termasuk pada lembar Bogor yang berskala 1:100,000 daripada lembar geologi Indonesia (Effendi, 1974). Daerah Hambalang terletak di hujung timur lembar Bogor. Batuan yang tertua di sekitar Gunung Hambalang adalah formasi Jatiluhur yang terdiri atas *Marl* dan serpihan lempung, dan lapisan-lapisan tipis batu pasir Kuarza. Di lokasi penelitian, formasi batuan ini yang berpa lempung dan serpihan kecoklatan dan kelabu terbuka. Pada bagian atas formasi Jatiluhur terdapat secara tidak jangkelevasi dengan breksia dan

lava dari Gunung Kencana dan Gunung Limo. Pada kelompok batuan ini terdapat bongkah batuan andesit tuf dan andesit breksia. Kelompok batuan terdapat dari puncak Gunung Hambalang (630 m) menyebar ke arah belakang pergunungan ke barat laut. Kelompok batuan yang terawal adalah mendapan permukaan yang terdapat pada lembah-lembah atau sekitar sungai Cijere, Cicarigil dan Cileungsi. Pada kawasan Gunung Hambalang dan sekitarnya terdapat sesar dan struktur *anticline*. Sesar ini telah mengakibatkan terjadi kelongsoran yang merusakkan jalan dan bangunan perumahan yang terletak di sebelah jangkatan Gunung Hambalang. Peta geologi kawasan Hambalang dan sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a).

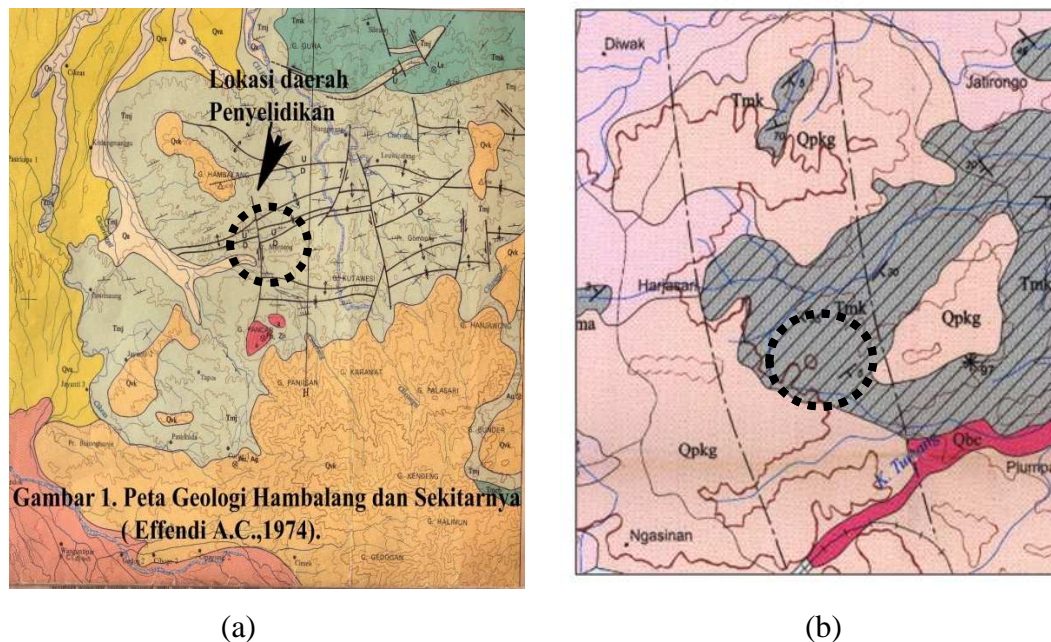


Gambar 4.4 Keadaan *Physiographic* Regional Pulau Jawa dan Madura (Van Bemmelen, 1970)

Pada Gambar 4.5 (b) formasi Keligetas dan Kerek mendominasi jalan tol Semarang ke Solo. Formasi Kaligetas terdiri daripada breksia volcano, aliran lava, tuf, batu pasir tuf dan batu lempung. Aliran dan lahar breksia dengan sisipan tuf lava halus hingga kasar. Di sebagian tempat, bawahnya terdapat batu lempung yang mengandung moluska dan tuf batu pasir. Batuan gunung berapi yang terpelapukan berwarna coklat kemerahan dan sering membentuk bongkah-bongkah besar. Rentang ketebalannya adalah antara 50 m hingga 200 m (Thanden *et al.*, 1996).

Formasi Kerek terdiri daripada lapisan-lapisan batuan lempung, napal, tuf batuan, konglomerat, breksia volcano dan batu kapur. Formasi ini juga terdiri dari batuan lempung berwarna kelabu muda dan kelabu tua, kapur, sebagian bersisipan dengan batu lanau atau batu pasir. Setengah tempat mengandung fosil foram, moluska dan koloni batu karang. Lapisan tipis konglomerat terdapat dalam batu lempung di Kripik dan di batu pasir. Batu kapur yang ditemui pada umumnya

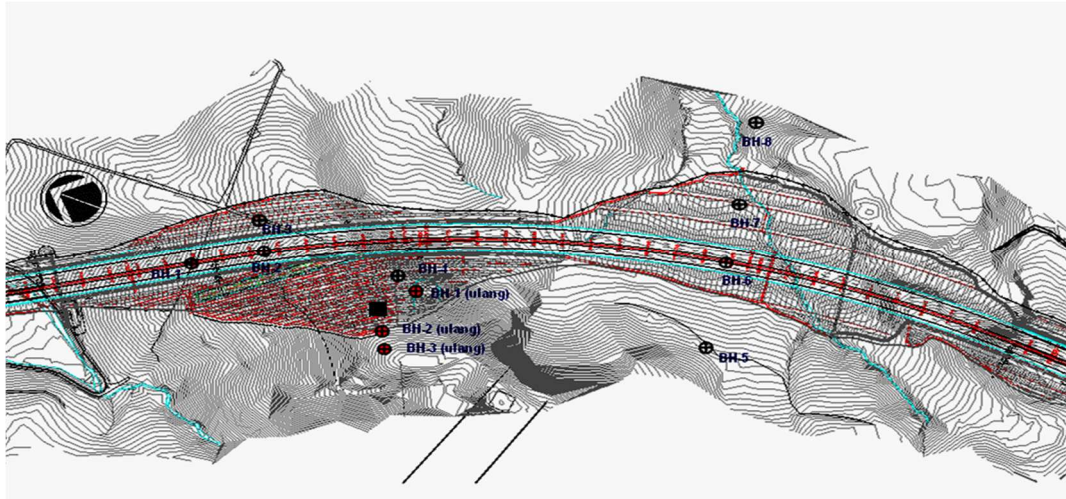
berlapis, berkrystal dan sedikit berpasir yang memiliki ketebalan jumlah lebih dari 400 meter. Umur kelompok batuan ini adalah seusia dengan Miosen Tengah (Thanden *et al.*, 1996).



Gambar 4.5 Peta geologi Hambalang, Jawa Barat dan sekitarnya (a), serta peta geologi Semarang-Bawen Jawa Tengah (b) (Effendi A, 1974; Thanden *et al.*, 1996)

4.2.3 Pengeboran

Uji pengeboran telah dilakukan pada lokasi Semarang-Bawen untuk keperluan disain lereng akibat galian sedalam 61 m. Pada tahapan ini telah dilakukan pengeboran sebanyak 8 titik penguji masing-masing hingga kedalaman 30 m, 4 titik pada lokasi galian dan 4 titik ada lokasi urugan oleh PT. Petrosol (Petrosol, 2012). Kerena terjadi keruntuhan pada lereng galian di STA 19+250, maka dilakuan uji tambahan pengeboran sebanyak 3 titik oleh Suparman (2013) dan Laboratorium Mekanik Tanah UNDIP (2013). Titik uji pengerudian terras dapat dilihat pada Gambar 4.6 (Suparman, 2013;UNDIP, 2013).



Gambar 4.6 Lokasi titik uji pengeboran dilokasi galian dan urugan (Suparman, 2013; UNDIP, 2013)

Dari 4 titik uji (BH-1, BH-2, BH-3 dan BH-4) pengeboran yang dilakukan sebelum pekerjaan galian, ketinggian permukaan tanah adalah antara +496.84 m hingga +508.86 m. Dari permukaan tanah hingga kedalaman antara -2.50 m hingga -5.50 m dijumpai lapisan tanah lempung berlanau (*silty clay*) berwarna coklat hingga coklat kemerahan dengan konsistensi kukuh sehingga sangat kukuh. Selepas itu dijumpai lapisan breksia tuf setebal 3.00 meter yang terpelapukan berwarna coklat hingga coklat tua dengan konsistensi keras. Selepas itu hingga akhir pengerudian dikedalaman 30 m dijumpai lapisan tanah breksia tuf berwarna kelabu hingga kelabu tua dengan konsistensi sangat keras dengan N-SPT lebih besar dari 100 (Petrosol, 2012). Pada Gambar 4.7 ditunjukkan uji pengerudian teras BH-4 sebelum penggalian (Petrosol, 2012) dan BH-1 (ulang) setelah terjadi keruntuhan lereng (UNDIP, 2013).

Lebih daripada 13 titik uji pengeboran telah dilakukan ketika penyelidikan tanah pada tahun 2010 (Geoinves, 2010) di lokasi Hambalang Sentul Bogor Jawa Barat. Hasilnya adalah seperti digambarkan pada Gambar 4.8, log uji pada titik DB-3 pada umumnya sama seperti titik-titik uji lain. Dari permukaan tanah hingga kedalaman 5 m dijumpai lapisan lanau berwarna kelabu gelap dengan konsistensi sangat kaku hingga keras. Setelah kedalaman 5 m hingga akhir uji pengeboran dilakukan, lapisan clay shale berwarna kelabu tua dengan konsisten sangat keras ditemui dengan nilai standard penetration test N SPT lebih besar daripada 60.

4.2.4 Standard Penetration Test (SPT)

Uji standard penetration test (*Standard Penetration Test*) dilakukan untuk mengetahui konsistensi dari lapisan tanah yang ditemui semasa uji pengeboran. Uji standard penetration test (SPT) dilakukan dengan interval kedalaman tiap 2 m. Nilai SPT untuk lapisan clay shale untuk lokasi Semarang-Bawen, Jawa Tengah maupun lokasi Hambalang Bogor Jawa Barat lebih besar dari 60 ($N_{SPT} > 60$). Nilai N_{SPT} seperti ini merupakan nilai dengan konsistensi sangat keras. Hasil uji standard penetration test (SPT) ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 untuk lokasi Semarang-Bawen dan Gambar 4.8 untuk lokasi Hambalang.

4.3 Uji Awal di Laboratorium

Uji awalan 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 4.7. 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 Tabel 4.1.



Gambar 4.7 Uji di laboratorium mekanik tanah Geoinves di Jakarta (Geoinves, 2014)

Tabel 4.1 : Jenis uji pendahuluan di laboratorium clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang

Jenis Uji		Semarang-Bawen	Hambalang
Sifat indeks			
	Berai isi (<i>bulk density</i>)	✓	✓
	Kadar air asli (<i>natural water content</i>)	✓	✓
	Graviti tentu (<i>specific gravity</i>)	✓	✓
	Unit berat kering (<i>dry density</i>)	✓	✓
	Unit berat jenuh (<i>saturated density</i>)	✓	✓
	Angka pori (<i>void ratio</i>)	✓	✓
	Batas Atterberg	✓	✓
	Batas cecair (<i>liquid limit</i>)	✓	✓
	Batas plastik (<i>plastic limit</i>)	✓	✓
	Indeks keplastikan (<i>plasticity index</i>)	✓	✓
Sifat fisik			
	Distribusi ukuran butiran (<i>soil distribution</i>)		
	Pasir	✓	✓
	Lanau	✓	✓
	Lempung	✓	✓
Sifat mekanik			
	Kekuatan Geser	✓	✓
	Kohesi jumlah dan efektif	✓	✓
	Sudut geser dalam jumlah dan efektif	✓	✓
	Kohesi tak terdrainase residual tanpa pelepasan tegangan (jumlah)	✓	✓
	Kohesi tak terdrainase residual tanpa pelepasan tegangan (efektif)	✓	✓
	Sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (jumlah)	✓	✓
	Sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (efektif)	✓	✓
Analisis Mineralogi (<i>X-Ray Deffraction</i>)		✓	✓
Pngimbasan Mikrolingkup Elektron (S.E.M)		✓	✓

Keterangan : ✓, diuji

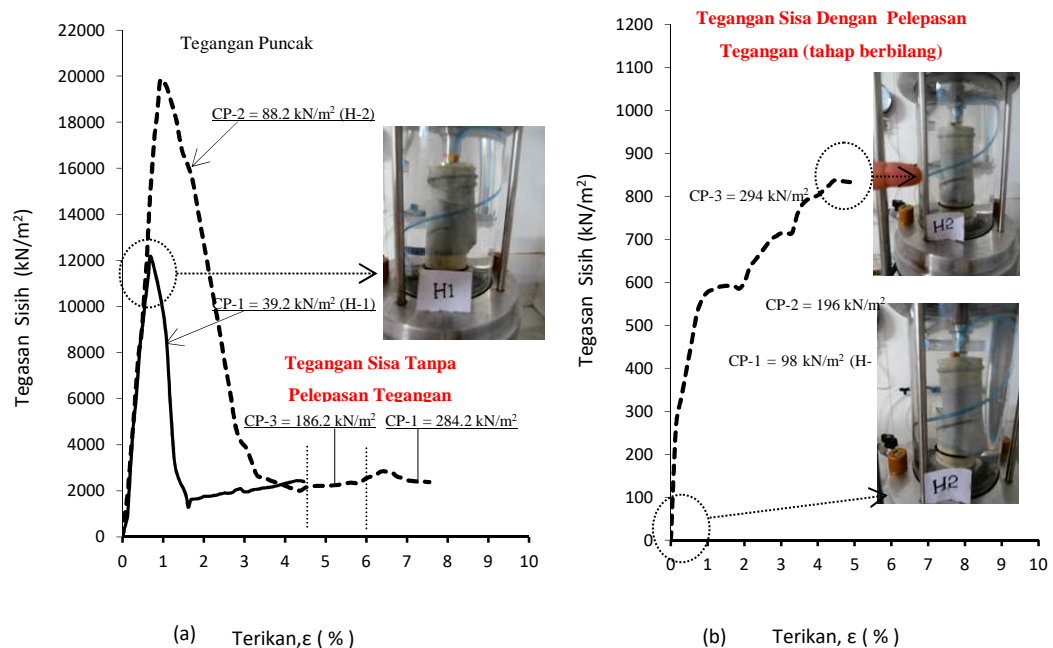
4.4 Sifat Mekanik Dengan Uji Triaksial Tak Terdrainase (UU)

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.

4.4.1 Perilaku Tegangan Regangan Uji Triaksial Clay Shale Tak Jenuh

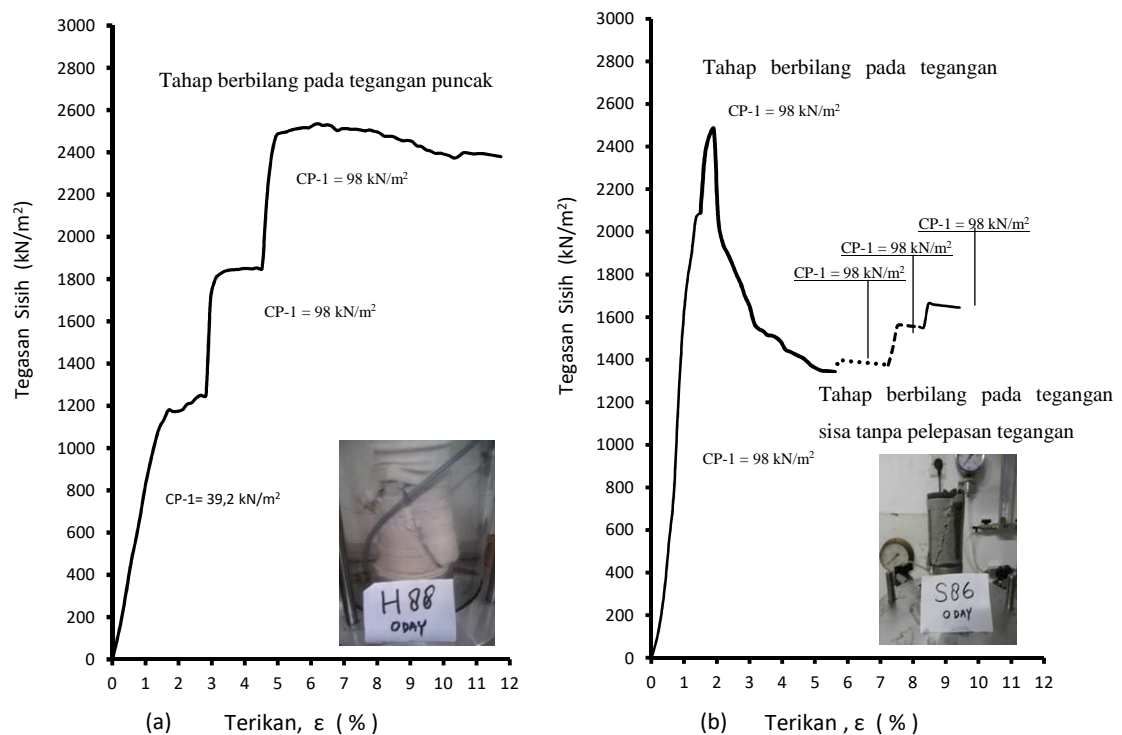
Clay shale yang sering juga diistilahkan sebagai batuan lempung adalah bahan batuan yang terdiri daripada mineral lempung. Dengan demikian perilaku tegangan regangan uji triaksial menyerupai tegangan regangan batuan pada umumnya. Pada uji triaksial atau uji lainnya, batuan memiliki kekuatan lebih daripada 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 4.8(a). Manakala tegangan residual dengan pelepasan tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.8(b).



Gambar 4.8 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

4.4.2 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 4.9.



Gambar 4.9 (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

4.4.3 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 tak terdrainase dilakukan untuk mendapatkan nilai sebenar dari kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) pada sampel tak terganggu clay shale tak jenuh dan jenuh.

Kekuatan geser (c dan ϕ) yang diperoleh dalam uji triaksial tak terdrainase 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 kN/m^2 dan Semarang-Bawen adalah 700 kN/m^2 . Manakala sudut geser (ϕ) dalam clay shale Hambalang adalah 78.4° dan Semarang-Bawen adalah 59.4° . Nilai kekuatan geser tak jenuh pada tegangan puncak (c dan ϕ) akan menurun pada keadaan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp} dan ϕ_{rp}). Dan pada keadaan tegangan residual dengan pelepasan tegangan, kekuatan geser ini akan semakin berkurang nilainya (c_{rf} dan ϕ_{rf}).

4.4.4 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 kN/m^2 , manakala pada keadaan tegangan efektif adalah 190 kN/m^2 . Kemudian pada clay shale Semarang-Bawen, kohesi pada keadaan tegangan jumlah sama besar dengan keadaan tegangan efektif yaitu 300 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

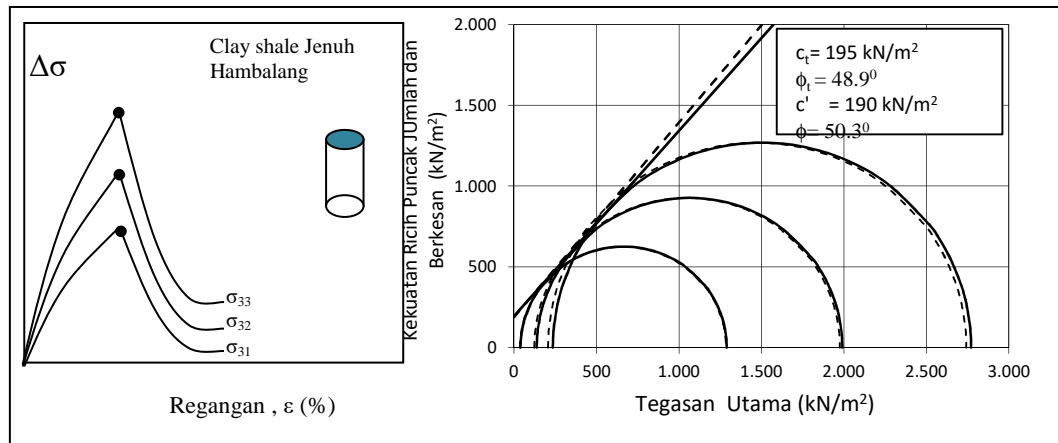
geser pada keadaan tegangan jumlah dan tegangan efektif. Tegangan efektif diperoleh dengan mengurangkan tegangan jumlah (σ_{tot}) dengan tegangan air pori (u), seperti Persaman 4.4 berikut.

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

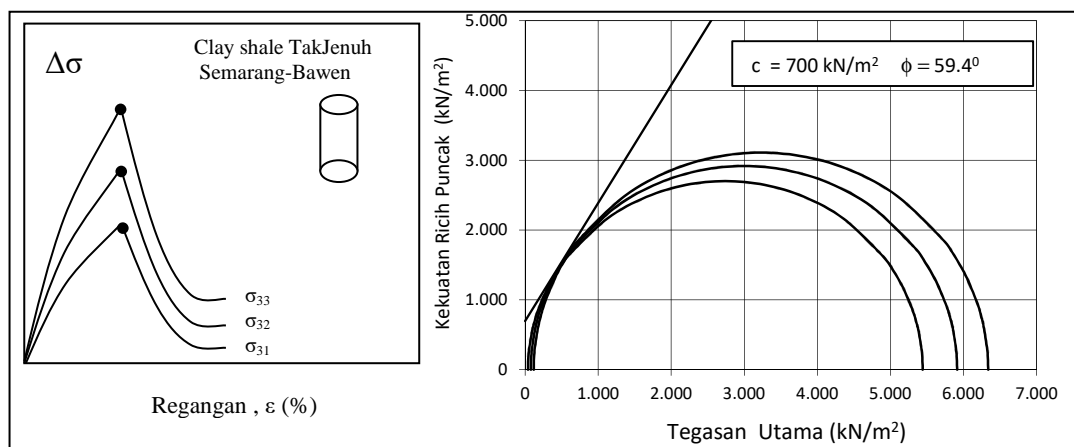
Tegangan jumlah dan tegangan efektif dihitung dalam tegangan sisih dan tegangan keliling untuk menentukan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dengan menggunakan gambar *Mohr-Coulomb*.

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. Berai 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.

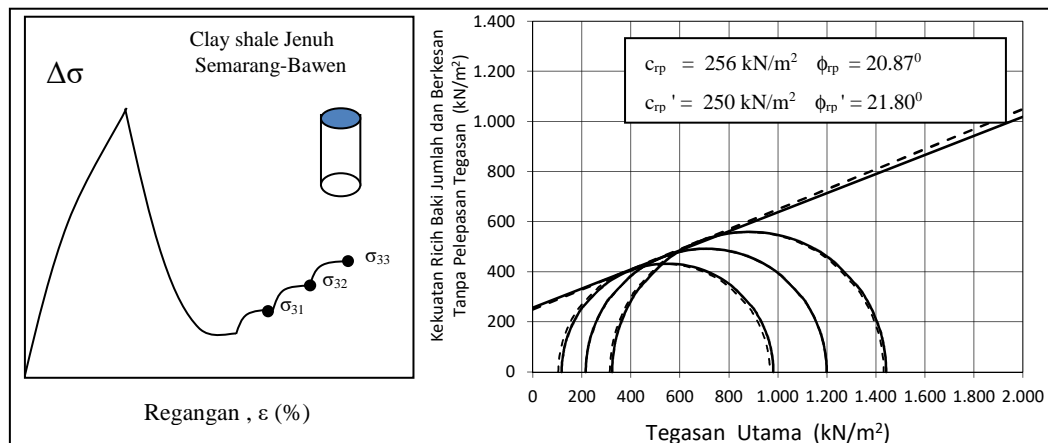
Hasil kekuatan geser residual clay shale pada keadaan asal yang diperoleh dari tegangan jumlah atau pun tegangan efektif telah diperoleh melalui metode tanpa pelepasan tegangan dan dengan perlepasan tegangan. Kekuatan geser residual dengan perlepasan tegangan lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan 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 4.10, 4.11, 4.12 dan 4.13.



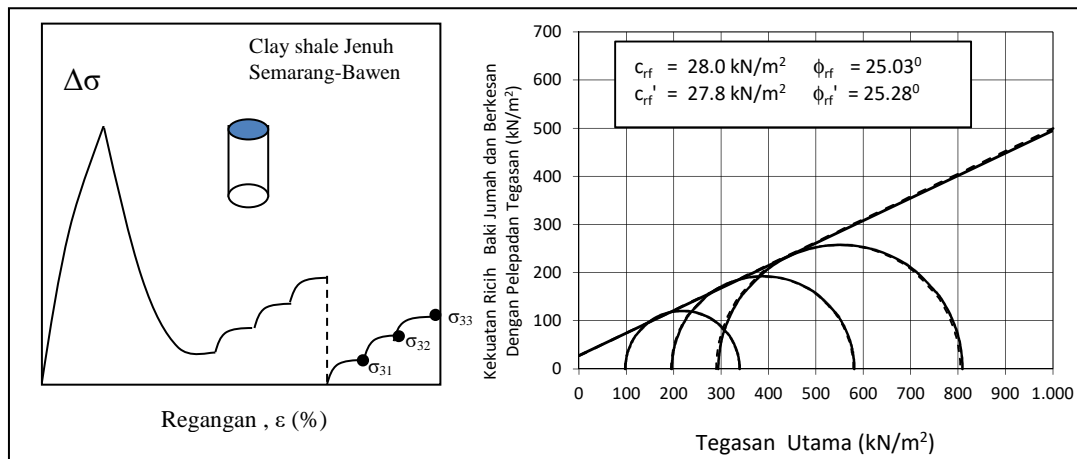
Gambar 4.10 Gambar Mohr-Coloumb clay shale Hambalang mula-mula (H-88), sampel jenuh pada tegangan puncak dan efektif dengan uji triaksial tahap berbilang



Gambar 4.11 Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-37, S-38, S-39), sampel tak jenuh pada tegangan puncak



Gambar 4.12 Gambar Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual tanpa pelepasan tegangan



Gambar 4.13 Mohr-Coloumb clay shale Semarang-Bawen mula-mula (S-86), sampel jenuh pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan dengan uji tahap berbilang triaksial

Kelakuan 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 4.14 dan Gambar 4.15. Gambaran keseluruhan dari kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang pada tahap awal dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Sampel S-37, S-38 dan S-39 adalah sampel mula-mula clay shale Semarang-Bawen sebelum dilakukan proses pelapukan. Pada Gambar 4.14 kelihatan seluruh sampel dalam keadaan segar dan lunak. Setelah dilakukan uji triaksial ketiga-tiga sampel tak jenuh tersebut mengalami keruntuhan dan membentuk bidang keruntuhan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. 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 4.23.

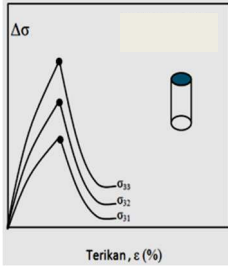
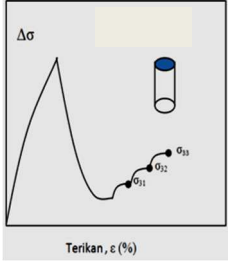
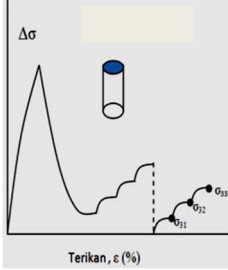


Gambar 4.14 Sampel S-37, S-38 dan S-39 pada keadaan awal senelum pengujian



Gambar 4.15 Gambar bidang keruntuhan S-37, S-38 dan S-39 setelah uji triaksial

Tabel 4.2 : Gambaran keseluruhan kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang pada keadaan mula-mula

Tegangan-Regangan Dari Uji Triaksial	Keadaan Sampel	Kekuatan Geser Tegangan Puncak			
		c (kN/m ²)		φ (°)	
		Semarang - Bawen	Hambalang	Semarang - Bawen	Hambalang
	Tak Jenuh	700	450	59.4	78.4
	Jenuh (jumlah)	300	195	53.2	48.9
	Jenuh (Efektif)	300	190	53.2	50.5
		Kekuatan Geser Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan			
		c _{rp} (kN/m ²)		φ _{rp} (°)	
	Tak Jenuh	285	270	46	45
	Jenuh (jumlah)	171	100	27.4	31.2
	Jenuh (Efektif)	171.5	98	28.1	31.9
		Kekuatan Geser Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan			
		c _{rf} (kN/m ²)		φ _{rf} (°)	
	Tak Jenuh	26.7	161	23.5	22
	Jenuh (jumlah)	28	17	25	15
	Jenuh (Efektif)	27.8	17	25.3	15

BAB 5

PENGARUH PELAPUKAN TERHADAP KEKUATAN GESER CLAY SHALE

5.1 Pendahuluan

Pada bab ini dibahas mengenai kasus pelapukan clay shale terhadap perubahan kekuatan geser. Pelapukan clay shale melalui proses pengeringan saja tanpa terbuka dengan hidrosfir dan dari proses siklus pembasahan dan pengeringan (hidrosfir dan asmosfera). Proses pengeringan sampel yang asal tak terganggu clay shale dilakukan di dalam ruang pengeringan, yang dilindungi dari pengaruh air hujan dari udara luar. Pada proses siklus pembasahan pengeringan, sampel clay shale proses pengeringannya ditempatkan pada udara bebas di luar ruangan, akan tetapi terlindung dari pengaruh air hujan. Seterusnya untuk proses pembasahan sampel clay shale direndam dalam air selama 5 menit saja sebanyak dua kali dalam setiap selama 8 hari.

Untuk mendapatkan pengaruh dari proses pelapukan clay shale pada setiap masa yang sudah diprogramkan, uji triaksial di laboratorium dilakukan seperti yang dibahas pada Bab 3 penelitian ini. Setiap uji triaksial dilakukan untuk memperoleh graf tegangan dan regangan pada tegangan keliling yang berbeda. Graf tegangan dan regangan diperoleh sehingga mencapai tegangan puncak, dan dilanjutkan hingga mencapai bagian tegangan residual. Kekuatan geser clay shale mulai ditentukan pada keadaan tegangan puncak dengan membuat graf lingkaran Mohr dari tiga tegangan keliling dan tegangan pucak yang berbeda pada sampel yang sama.

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 total dan tegangan efektif. Pada bagian ini perubahan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) pada tegangan puncak terhadap masa pengeringan hingga hari ke-80 dibahas. Masalah 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; Hormdee *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. Masalah 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).

5.2 Penentuan Kekuatan Geser Residual Dengan Dua Tahap

Melalui penelitian ini masalah baru yang dilakukan adalah menentukan kekuatan geser residual kepada dua tahap. Pertama, kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan kedua ialah kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan. Kekuatan geser residual dibedakan menjadi dua bagian utama karena dua pertimbangan utama. Pertama karena pada lereng clay shale yang sedang mengalami proses pelapukan, banyak terdapat joint dengan arah orientasi serta bentuk yang bermacam-macam (Kulatilake *et al.*, 2001). Apabila keadaannya tetap seperti itu maka keadaan kekuatan geser seperti ini dikatakan keadaan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan. Sedangkan apabila dilakukan galian pada lereng untuk keperluan pekerjaan, maka joint pada batuan akan terjadi orientasi semula sehingga menyebabkan berkurangnya kekuatan geser residual. Apabila keadaan ini terjadi maka kekuatan geser pada keadaan ini disebut kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan.

Uji untuk menetapkan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dilakukan terus setelah tegangan sisih menunjukkan garis asimptot dengan menaikkan tegangan keliling secara berkala atau yang disebut uji triaksial dengan tahap berbilang. Manakala untuk mendapatkan kekuatan geser akibat pelepasan tegangan, uji kekuatan geser residual dibuat tanpa selesainya pelepasan tegangan. Dengan menghilangkan seluruh tegangan keliling pada sel triaksial, maka ini akan memodelkan perilaku penggalian pada clay shale di lapangan lereng. Kemudian

tegangan keliling dilanjutkan kembali dengan metode uji triaksial dengan tahap berbilang. Pada keadaan terakhir ini diperoleh kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan. Masalah yang baru ini telah dijelaskan semula pada Bab 3 seperti dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Pada bab ini juga dibahas perbedaan perilaku perubahan kekuatan geser pada tegangan puncak hingga tegangan residual dengan pelepasan tegangan. Masalah ini dikaji pada clay shale tak jenuh dan jenuh pada keadaan tegangan total dan tegangan efektif. Pengurangan peratusan kekuatan geser disampaikan secara kuantitatif serta perubahan pengurangannya akibat proses pelapukan dalam peratusan. Pengurangan kekuatan geser akibat pelapukan juga dibentangkan dengan menentukan kadar pengurangan kekuatan geser dalam masa per hari. Manakala untuk kohesi unitnya ialah $\text{kN/m}^2/\text{hari}$ dan kadar pengurangan sudut geser dalam unit $^\circ/\text{hari}$.

Di akhir bab ini perilaku sudut joint clay shale Semarang-Bawen. Ratio antara sudut joint hasil penelitian dengan sudut joint secara teori dirumuskan seperti pada Persamaan (2.5). Kasus pengeringan clay shale terhadap perubahan sudut joint dari hasil penelitian dan sudut joint secara teori turut dimuatkan.

5.3 Perubahan Kekuatan Geser Total Clay Shale Akibat Proses Pengeringan

Akibat pengeringan sampel tak terganggu clay shale Semarang-Bawen dalam ruang pengeringan, maka terjadi proses pelapukan yang mengakibatkan pengurangan kekuatan geser. Parameter kekuatan geser yang dimaksudkan adalah kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) tak jenuh yang diperoleh dari uji triaksial. Kohesi dan sudut geser dalam ditentukan pada tegangan puncaknya dengan membuat graf lingkaran Mohr terlebih dahulu. Pengurangan kohesi dan sudut geser dalam telah diamati hingga masa 80 hari dengan jangka masa setiap 4 hari, 8 hari hingga 16 hari. Proses uji kekuatan geser sampel clay shale yang jenuh juga sama seperti yang dilakukan ke atas sampel tak jenuh. Proses uji ke atas sampel clay shale jenuh dilakukan pada sel triaksial dengan memberikan tegangan keliling dan juga tegangan balik secara

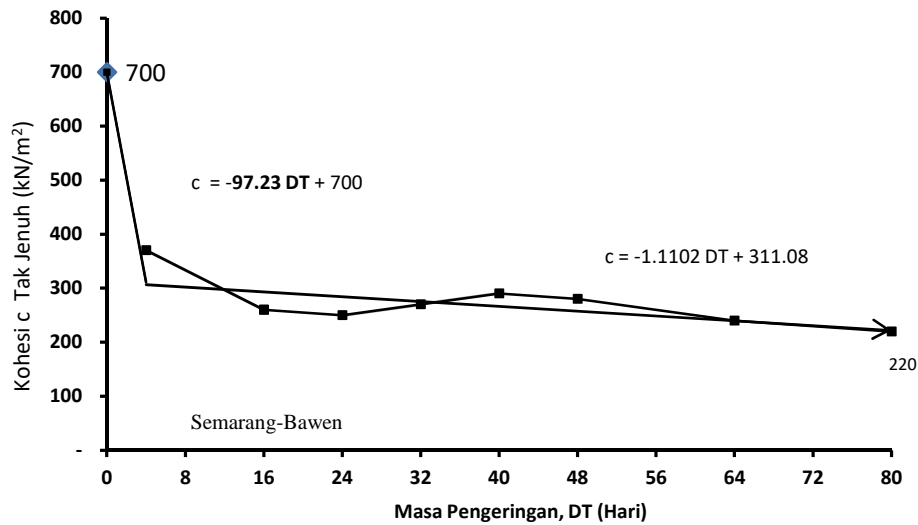
bertahap ke dalam sampel.. Tegangan sel dan tegangan balik dinaikkan secara bertahap dengan mengulangi bacaan perubahan tegangan air porinya. Oleh karena clay shale merupakan tanah lempung yang sangat mampat, maka masa yang diperlukan untuk membuat satu sampel clay shale jenuh agak lama yaitu 4 hari.

Semasa uji tiga paksi dilakukan ke atas sampel clay shale yang jenuh, pemerhatian dibuat pada perubahan tegangan air pori semasa pembebanan dilakukan. Ketika itu didapati tegangan air pori pada ketika pembebanan dilakukan, data pada tegangan puncaknya berupa tegangan total dan tegangan efektif. Tegangan efektif dihitung melalui perbezaan tegangan total dengan tegangan air porinya. Oleh yang demikian pada tahap ini kekuatan geser pada keadaan tegangan total dan kekuatan geser pada tegangan efektif dapat diperolehi, yaitu kohesi total dan kohesi efektif (c dan c') serta sudut geser dalam total dan sudut geser dalam efektif (ϕ dan ϕ').

5.3.1 Kohesi Clay Shale Tak Jenuh

Pengurangan kohesi (c) pada tegangan puncak clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan diperhatikan hingga 80 hari pengeringan. Pada peringkat awal sebelum pengeringan dibuat, kohesi clay shale Semarang-Bawen adalah 700 kN/m^2 , berkurang sehingga 220 kN/m^2 atau 68.6% pada hari ke-80 masa pengeringan..

Kadar pengurangan kekuatan geser pada tegangan puncak akibat proses pengeringan semasa 80 hari ditentukan dengan persamaan garis regresi linear antara kekuatan geser dan masa pengeringan terlebih dahulu. Kadar pengurangan kohesi (V_{cd}) clay shale Semarang-Bawen tak jenuh pada tegangan puncak adalah $97 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ pada awal hari pengeringan hingga hari ke-4. Sementara kadar pengurangan kohesi pada hari ke-4 hingga ke-80 adalah $1 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$. Perubahan kohesi clay shale tak jenuh pada tegangan puncak akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Perubahan kohesi clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan

Perubahan kekuatan geser clay shale akibat proses pengeringan hingga masa hari ke-80 diakibatkan terbukanya clay shale dengan atmosfer jangkain terjadinya pelepasan tegangan. Pelepasan tegangan terjadi disebabkan oleh karena pada pekerjaan lapangan. Di lapangan clay shale memiliki tegangan keliling yang bekerja menyelimuti sampel. Manakala sampel sudah berada di laboratorium, tegangan keliling ini hilang semuanya. Masalah inilah yang merupakan salah satu penyebab terjadinya pelapukan akibat pengeringan.

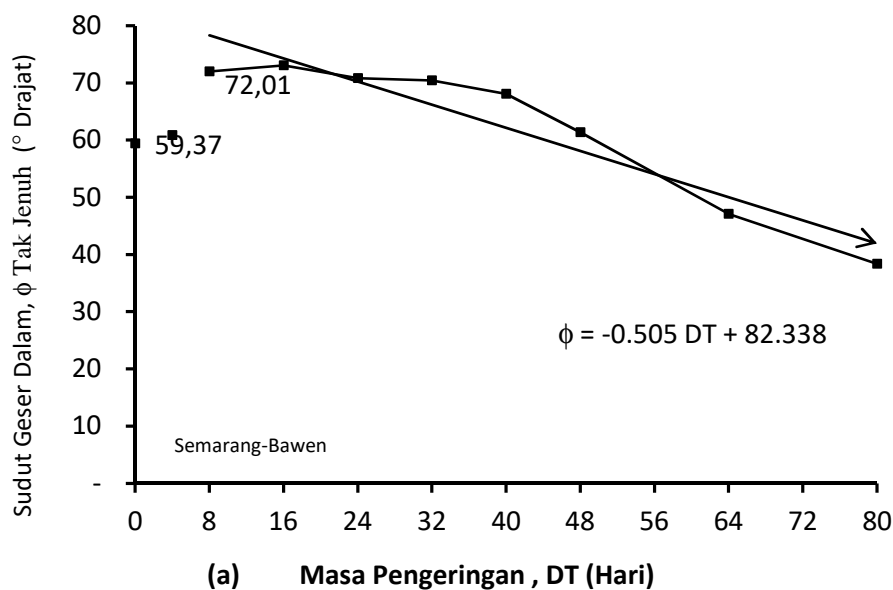
Uji awal juga telah dilakukan terhadap perubahan uji beban titik pada clay shale Subang akibat pelapukan pada udara semula jadi. Uji ini dilakukan antara uji beban titik terhadap gred pelapukan. Gred pelapukan satu (W-I) bermakna clay shale belum terjadi pelapukan dan masih merupakan batuan baru (*fresh rock*). Gred pelapukan bertambah hingga mencapai gred pelapukan ke-6 (W-VI) apabila semakin pelapukan yang terjadi semakin besar. Beban titik pada awalnya bernilai 225 kN/m² akan berkurang hingga mencapai 20 kg/cm² pada gred pelapukan ke-6 (Sadisun *et al.*, 2001).

5.3.2 Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh

Pengurangan sudut geseran dalam (ϕ) pada tegangan puncak clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan diperhatikan sehingga 80 hari pengeringan. Pada

peringkat awal sebelum dilakukan pengeringan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen sebesar 59.4° menurun hingga 38.4° atau 35.4% pada hari ke-80 masa pengeringan. Hasil penelitian sudut geser dalam pada asalnya sebesar 78.4° terjadi karena clay shale perilaku pada asalnya adalah seperti batuan. Hasil yang lebih besar dari 45° terjadi karena adanya pengaruh kekasaran (*roughness effect*) (Barton, 2014; Goodman, 1989) pada joint yang terjadi terutama pada tegangan keliling yang kecil seperti pada penelitian ini.

Kadar pengurangan sudut geser dalam ($V_{\phi d}$) clay shale Semarang-Bawen tak jenuh pada tegangan puncak sebesar $0.51^\circ/\text{hari}$. Perubahan sudut geser dalam clay shale tak jenuh pada tegangan puncak akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 5.2



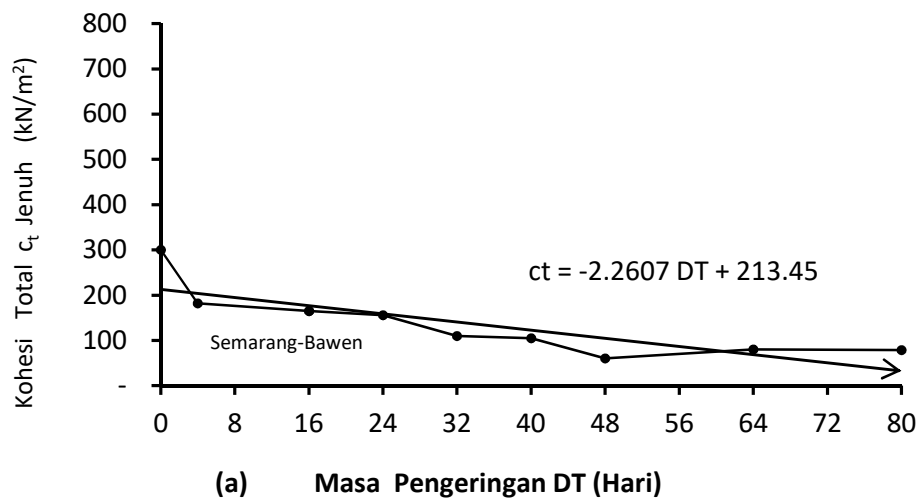
Gambar 5.2 Perubahan sudut geser dalam (ϕ) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan

5.3.3 Kohesi Clay Shale Jenuh

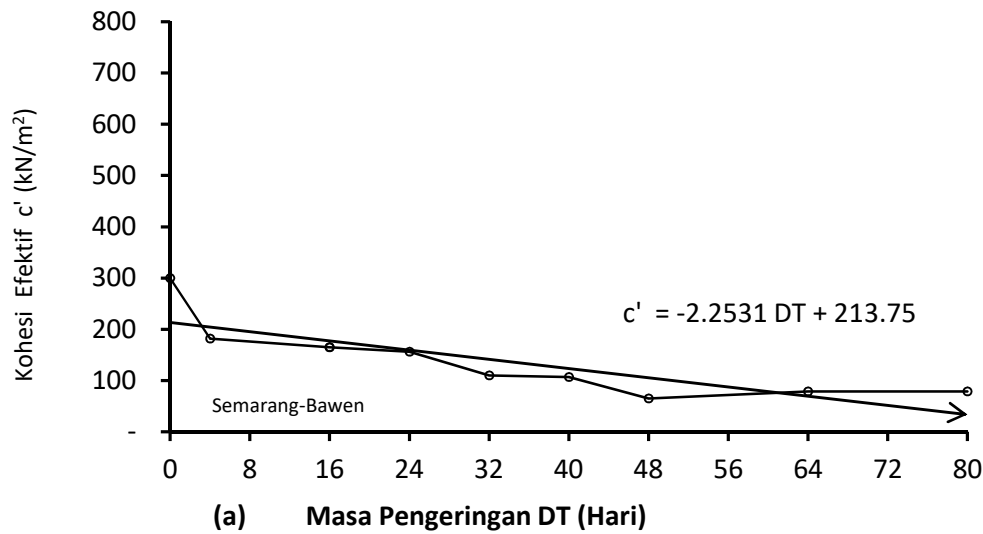
Pengurangan kohesi pada tegangan puncak clay shale jenuh akibat proses pengeringan diperhatikan hingga 80 hari pengeringan. Pada peringkat awal sebelum dilakukan pengeringan kohesi total (c_t) clay shale Semarang-Bawen adalah 300 kN/m^2 mengurang sehingga 79 kN/m^2 atau 73.7% pada hari ke-80 semasa

pengeringan. Manakala kohesi efektif (c') clay shale Semarang-Bawen asal sebesar 300 kN/m^2 berkurang sehingga 79 kN/m^2 atau 73.7% . Tiada terdapat perbedaan antara kohesi total dan kohesi efektif. Ini karena tegangan air pori (*pore water pressure*) adalah kecil bahkan tidak memberi kasusan, sehingga tak mengurangi tegangan efektif.

Kadar pengurangan kohesi total (V_{cdt}) clay shale Semarang-Bawen jenuh pada tegangan puncak adalah $2.26 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ pada permulaan hari pengeringan hingga ke hari 80. Manakala kadar pengurangan kohesi efektif ($V_{cd'}$) clay shale Semarang-Bawen adalah $2.25 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$. Perubahan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4.



Gambar 5.3 Perubahan kohesi total (c_t) clay shale jenuh akibat proses pengeringan



Gambar 5.4 Perubahan kohesi efektif (c') clay shale jenuh akibat akibat proses pengeringan

Penelitian terdahulu berkenaan perubahan gred pelapukan yang disebabkan udara asaljadi terhadap pengurangan kohesi efektif telah dikaji oleh beberapa peneliti. Kohesi efektif berkurang dengan bertambahnya gred pelapukan dari gred ke-0 hingga gred ke-5. Sampel yang diuji tidak mengalami proses pelapukan di laboratorium dengan uji kotak geser, namun sampel diperoleh dari lapangan dengan gred sampel yang berbeda. Kohesi efektif semua pada gred ke-0 adalah 57 kPa menjadi 26 kPa pada gred ke-V, atau menurun sebanyak 54.4% (Reißmüller, 1977).

5.3.4 Sudut Geser Dalam Clay Shale Jenuh

Pengurangan sudut geser dalam (ϕ) pada tegangan puncak clay shale jenuh akibat proses pengeringan diperhatikan sehingga dalam masa 80 hari pengeringan. Pada awal sebelum dilakukan pengeringan sudut geser dalam total (ϕ_t) clay shale Semarang-Bawen adalah 53.2° berkurang sehingga 19.4° atau 63.5% pada hari ke-80 masa pengeringan. Manakala sudut geser dalam efektif (ϕ') clay shale Semarang-Bawen awal adalah 53.2° berkurang sehingga 19.4° . Tidak terdapat perbedaan antara sudut geser dalam total dan sudut geser dalam efektif. Ini serupa dengan perubahan kohesi clay shale jenuh, tidak ada perbedaan antara tegangan total dengan tegangan efektif pada clay shale Semarang-Bawen yang jenuh.

Kadar pengurangan sudut geser dalam total ($V_{\phi_{dt}}$) clay shale Semarang-Bawen jenuh pada tegangan puncak adalah $0.30^\circ/\text{hari}$ pada awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Manakala kadar pengurangan sudut geser dalam efektif ($V_{\phi_{d'}}$) clay shale Semarang-Bawen adalah $0.30^\circ/\text{hari}$. Kadar pengurangan sudut geseran dalam total sama besar dengan kadar pengurangan sudut geser dalam efektif pada clay shale Semarang-Bawen. Perubahan sudut geser dalam total dan sudut geser dalam efektif pada clay shale Semarang dapat dilihat pada Gambar 5.5 dan Gambar 5.6.

Penelitian terdahulu berkenaan perubahan gred pelapukan yang disebabkan udara semula jadi terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif (ϕ') dengan uji kotak geser telah dikaji oleh beberapa peneliti (Gartung, 1986; Reißmüller, 1977). Terjadi pengurangan sudut geser dalam efektif dengan bertambahnya gred pelapukan dari gred ke-0 hingga gred ke-5. Sampel yang diuji tidak dilakukan proses pelapukan di laboratorium dengan uji kotak geser, namun sampel diperolehi dari lapangan dengan gred sampel yang berbeda. Sudut geser dalam efektif semua pada gred ke-0 adalah 35° menjadi 17° pada gred ke-V, atau 51.4% (Reißmüller, 1977).

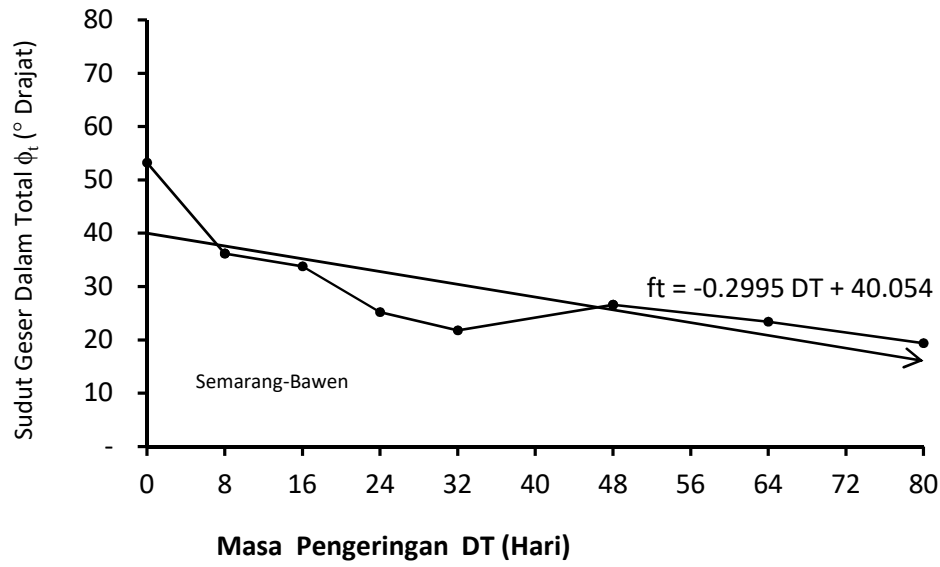
Dari uji geser langsung pada tegangan puncak dari clay shale formasi The Keuper, kekuatan geser pada keadaan asal adalah 90 kPa dan akan berkurang akibat pelapukan hingga mencapai gred ke-IV bernilai 54 kPa. Manakala sudut geser dalam yang pada asal bernilai 41° berkurang pada gred ke-IV akibat pelapukan menjadi 19° (Gartung, 1986). Dalam proses pelapukan tersebut uji tidak dilakukan di laboratorium, tapi dengan memperolehi dari lapangan penelitian.

Dari dua jenis batuan lempung keras yang mempunyai dua formasi berbeda yaitu Marl Taylor dan Shale Navarro, kesusakibat pengeringan dalam masa 45 hari menyebabkan kekuatan geser berkurang. Ini dapat dilihat pada Gambar 2.16 dan Tabel 2.1 pada penelitian literatur di Bab 2. Kohesi Marl Taylor sebanyak 1050 kPa pada masa awal menjadi 598 kPa pada masa 48 jam proses pengeringan. Manakala kohesi shale Navarro pada asalnya bernilai 733 kPa berkurang sehingga 475 kPa dalam masa 24 jam pengeringan. Pada masa selepas 48 jam sampel diuji karena sudah hancur (Youn *et al.*, 2010). Masalah ini terjadi pada Shale Navarro karena kadar

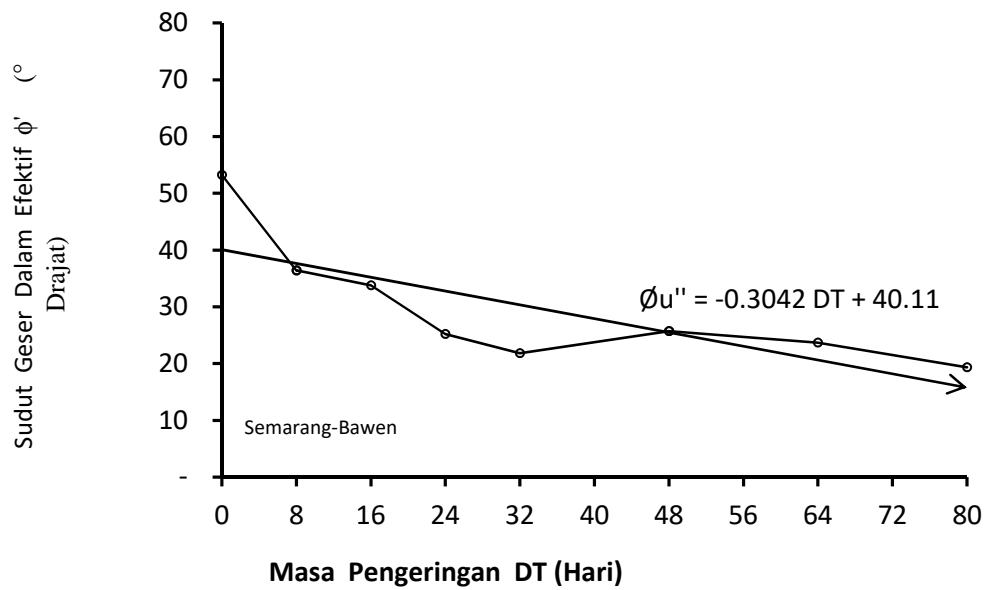
mineralnya mengandung mineral Smectite sebanyak 89% hingga 93%. Ini lebih besar apabila ratio mineral Smektit/Montmorilonit Marl Taylor berbeda antara 66% hingga 82% (Youn dan Tonon, 2010).

Penelitian terdahulu mendapati empat jenis batuan yang terdiri dari batuan pasir, batuan kapur, basalt dan granodiorite mengalami proses pelapukan yang berbeda. Kuantitatif pelapukan yang terjadi adalah dari gred I pada keadaan asal hingga gred V (Tugrul, 2004). Unconfined compression test dilakukan untuk menentukan besar tegangan mampatan yang terjadi akibat kasus pelapukan. Pada batuan pasir kekuatan mampatan rata-rata asal adalah 52.5 MPa. Akibat dari pelapukan kekuatan mampatan berkurang sebanyak 7.8 MPa pada gred IV yaitu sebesar 14.8%. Pada batuan kapur kekuatan mampatan rata-rata asal bernilai 109.5 MPa, akan berkurang sebanyak 70.5 MPa pada gred IV atau 64.4%. Pada basalt, kekuatan mampatan rata-rata asal adalah 111 MPa, dan berkurang 14 MPa pada gred ke-IV atau 12.6%. Manakala pada granodiorit kekuatan mampatan rata-rata asal adalah 127 MPa berkurang kepada 2.4 MPa pada gred ke-V atau 1.9% (Tugrul, 2004).

Berdasarkan kepada analisis dan perbincangan yang telah dilakukan di atas, maka ringkasan dari kaspelapukan terhadap perubahan kekuatan geser pada tegangan puncak dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut. Kasuseluruhan tabel-tabel berikut mengesahkan perbandingan antara penelitian terdahulu dengan hasil penelitian ini.



Gambar 5.5 Perubahan sudut geser dalam total (ϕ) clay shale jenuh akibat proses pengeringan



Gambar 5.6 Perubahan sudut geser dalam efektif (ϕ') clay shale jenuh akibat proses pengeringan

Tabel 5.1 : Perubahan kekuatan geser puncak akibat pelapukan proses pengeringan

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>a. Kekuatan geser yang diperoleh dari tegangan geser sangat dikasusani oleh joint batuan yang terjadi (Kulatilake <i>et al.</i>, 2001; Yang <i>et al.</i>, 2016).</p> <p>b. Uji kekuatan batuan clay shale Subang pada lapangan dengan Schmid Hammer Value hasil yang terjadi berbeda. Perbedaan terjadi karena gred pelapukan yang berbeda pula. Bertambah gred pelapukan, maka semakin menurun SHV yang terjadi (Sadisun <i>et al.</i>, 2001).</p> <p>c. Kohesi efektif semua pada gred ke-0 sebesar 57 kPa menjadi 26 kPa pada gred ke-V, atau menurun sebesar 54.4% Sudut geser dalam efektif semua pada gred ke-0 sebesar 350 menjadi 170 pada gred ke-V, atau menurun sebesar 51.4% (Reißmüller, 1977).</p> <p>d. Clay shale formasi The Keuper, kekuatan geser pada keadaan asal 90 kPa akan berkurang akibat pelapukan hingga mencapai gred ke-IV sebesar 54 kPa. Sudut geser dalamnya pada asal sebesar 41° berkurang pada gred ke-IV akibat pelapukan menjadi 19° (Gartung, 1986). Kohesi marl Taylor sebesar 1050 kPa pada masa asal menjadi 598 kPa pada masa 48 jam proses pengeringan. Manakala kohesi shale Navaro pada masa asal sebesar 733 kPa menurun sehingga 475 kPa pada masa 24 jam pengeringan, akan tepai pada masa 48 jam sudah tak tadak diuji karena sampel sudah hancur (Youn dan Tonon, 2010).</p>	<p>Perubahan kohesi (c) tak jenuh</p> <p>a. Pada clay shale Semarang-Bawen, kohesi asal $c = 700 \text{ kN/m}^2$ menjadi 220 kN/m^2 pada hari ke 80 atau 68.6%, dengan kadar pengurangan $97.2 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ pada hari asal hingga ke-4 dan $1.11 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari hari ke-4 hingga hari ke-80.</p> <p>Perubahan sudut geser dalam (ϕ) tak jenuh</p> <p>b. Pada clay shale Semarang-Bawen, ϕ asal 59.4° menjadi 38.4° pada hari ke 80, atau 35.4%, dengan kadar pengurangan $0.51^{\circ}/\text{hari}$ pada hari ke-4 hingga hari ke-80.</p> <p>Perubahan kohesi (c) jenuh</p> <p>c. Pada clay shale Semarang-Bawen, c_t asal 300 kN/m^2 menjadi 79 kN/m^2 pada hari ke 80, atau 79.7%, dengan kadar pengurangan $2.26 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ pada hari asal hingga hari ke-80. Manakala c' asal 300 kN/m^2 menjadi 79 kN/m^2 pada hari ke 80, atau 79.7%, dengan kadar pengurangan $2.25 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ pada hari asal hingga hari ke-80. ($c_t \approx c'$).</p>

Bersambung

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>d. Pada batuan pasir kekuatan mampatan rata-rata asal sebesar 52.5 MPa, menjadi sebesar 7.8 MPa pada gred ke-IV atau selebihnya tinggal 14.8%. Pada batuan kapur kekuatan mampatan rata-rata asal sebesar 109.5 MPa, menjadi sebesar 70.5 MPa pada gred ke-IV atau selebihnya tinggal 64.4%. Pada basalt kekuatan mampatan rata-rata asal sebesar 111 MPa, menjadi sebesar 14 MPa pada gred ke-IV atau selebihnya tinggal 12.6%. Manakala pada granodiorite kekuatan mampatan rata-rata asal sebesar 127 MPa, menjadi sebesar 2.35 MPa pada gred ke-V atau selebihnya tinggal 1.9% (Tugrul, 2004).</p>	<p>Perubahan sudut geser dalam (ϕ) jenuh</p> <p>d. Pada clay shale Semarang-Bawen, ϕ_t asal 53.2° menjadi 19.4° pada hari ke 80, atau 63.5%, dengan kadar pengurangan 0.3° drajat/hari pada hari asal hingga hari ke-80. Manakala ϕ' asal 53.2° menjadi 19.4° pada hari ke 80, atau 63.5%, dengan kadar pengurangan 0.3°/hari pada hari asal hingga hari ke-80. ($\phi_t \approx \phi'$). hari pada hari asal hingga hari ke-80.</p>

5.4 Perubahan Kekuatan Geser Residual Clay Shale Akibat Proses Pengeringan

Untuk memperolehi data kekuatan geser residual yang mencukupi dan tepat untuk mendapatkan data yang sebenar, maka program uji triaksial dilakukan seperti dinyatakan pada Gambar 3.4 di dalam bab metodologi penelitian. Daripada tiga sampel clay shale tak terganggu untuk uji triaksial, tujuh hasil parameter kekuatan geser diperolehi. Kekuatan geser pertama diperolehi dari tiga sampel semasa ia sudah mencapai tegangan puncak dengan tegangan keliling yang berbeda (zon A pada Gambar 3.4). Kekuatan geser yang kedua, ketiga dan keempat merupakan kekuatan geser tanpa pelepasan tegangan yang diperolehi pada sampel masing-masing dengan menaikkan tegangan keliling secara bertahap atau uji triaksial tahap berbilang (zon B). Manakala tiga kekuatan geser residual lainnya merupakan kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan (zon C). Semua kekuatan geser diperolehi dari sampel clay shale yang tak jenuh dan jenuh, pada tegangan total dan tegangan efektif

akibat pelapukan dengan proses pengeringan. Sedangkan yang mengalami proses sampel siklus pembasahan dan pengeringan, hanya uji pada sampel tak jenuh saja dilakukan.

Uji untuk menentukan kekuatan geser dengan tahap berbilang telah banyak dilakukan oleh peneliti terdahulu. Seperti uji geser langsung pada pasir dengan metode tersalir dan uji triaksial terkukuh tersalir dan tak tersalir (Gullic, 1970). Uji triaksial pada batuan juga telah dilakukan bertujuan untuk menentukan sifat-sifat jujuk daripada komponen-komponen dalam struktur batuan (Kim, 1979) serta dalam pasir kaku yang lemah (Ravi *et al.*, 2011). Sedangkan uji triaksial pada tanah tak jenuh juga telah dilakukan untuk menentukan pertambahan kekuatan geser akibat sedutan (Ho dan Fredlund, 1982). Dengan tujuan yang sama terhadap kasussedutan beberapa peneliti juga telah melakukan uji dengan tahap berbilang pada tanah tak jenuh, melalui uji geser langsung (Gan *et al.*, 1988; Nam, 2011). Untuk menghapuskan kasusan-kasuskebolehubahan tanah kepada hasil, uji tahap berbilang digunakan untuk memperoleh total parameter kekuatan geser yang banyak dan boleh diperolehi daripada hanya satu spesimen dengan menggunakan beberapa tegangan keliling (Hormdee *et al.*, 2012).

Dari beberapa peneliti terdahulu diatas yang telah melakukan metode tahap berbilang di dalam hasil kekuatan geser, kasusemuanya adalah untuk menentukan kekuatan geser pada tegangan puncak. Dengan menggunakan metode yang sama, penelitian ini memanfaatkan uji triaksial dengan tahap berbilang jangkain untuk mendapatkan parameter kekuatan geser residual. Masalah ini dilakukan pada zon B dan zon C pada Gambar 3.4 untuk mementukan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan.

5.4.1 Kohesi Residual Clay Shale Tak Jenuh

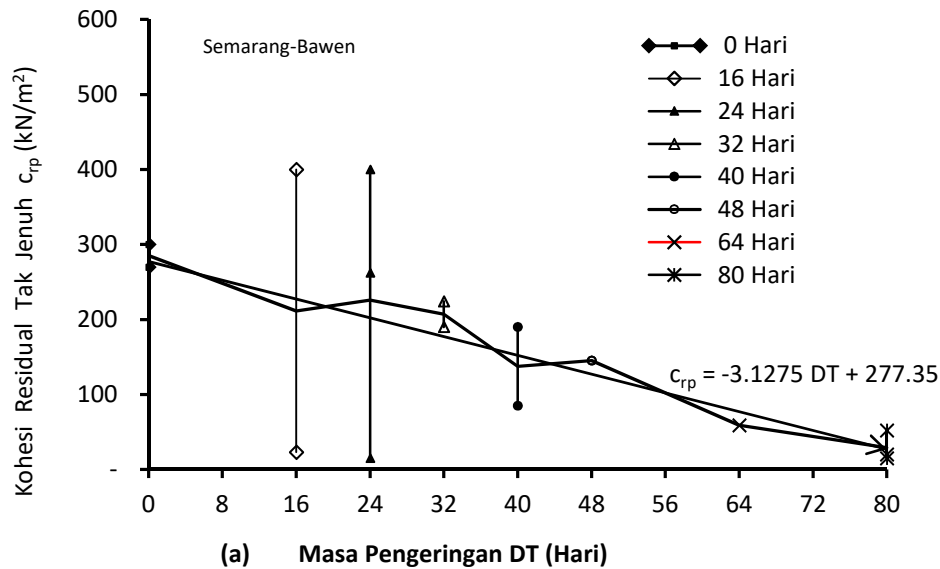
Kohesi residual clay shale Semarang-Bawen tak jenuh akibat proses pengeringan diperhatikan sehingga 80 hari. Pengurangan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) dan pengurangan kohesi residual dengan pelepasan

tegangan (c_{rf}) hingga pengeringan hari ke-80 pada clay shale tak jenuh telah diperoleh hasilnya. Masalah serupa juga telah menghasilkan pengurangan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) dan pengurangan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) hingga pengeringan hari ke-80 pada clay shale tak jenuh.

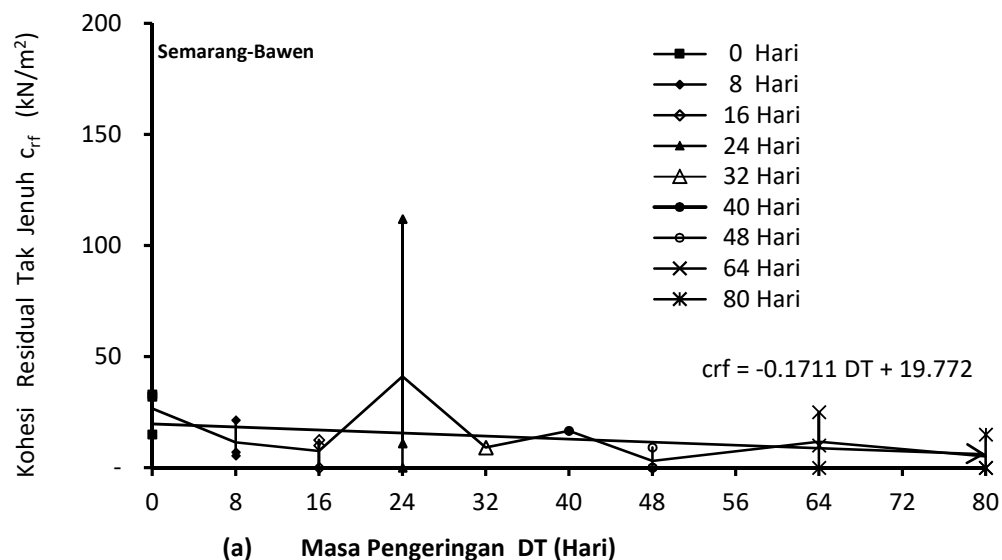
Pengurangan kekuatan geser residual clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, sebelum dilakukan pengeringan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) adalah 285 kN/m^2 , menurun hingga 29 kN/m^2 atau 89.8% pada hari ke-80 masa pengeringan.. Kadar pengurangan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (V_{crp}) untuk clay shale tak jenuh Semarang-Bawen adalah $3.13 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80.. Perubahan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan tak jenuh clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.7.

Kohesi residual asal dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) sebanyak 27 kN/m^2 , menurun hingga 5 kN/m^2 atau 81.3% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (V_{crf}) clay shale tak jenuh Semarang-Bawen adalah $0.17 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80.. Perubahan kohesi residual dengan pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen tak jenuh tak jenuh dapat dilihat pada Gambar 6.8.

Gambar 5.7 dan 6.8 menunjukkan bahwa kasus pelapukan akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen pada hari ke-16 dan hari ke-24 diperoleh kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rp}) yang cukup berbeda. Manakala sudut geser dalam tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) yang diperoleh daripada clay shale Semarang-Bawen pada hari ke-24 adalah serupa. Perbedaan hasil kekuatan geser akibat pengeringan pada hari yang sama disebabkan oleh perbedaan perubahan sifat-sifat indeks dari sampel uji. Jangkain itu, perbedaan orientasi dari bentuk joint yang terjadi pada clay shale adalah karena ia terbuka kepada atmosfer (Kulatilake *et al.*, 2001; Ladanyi dan Archambault, 1970; Jade dan Sitharam, 2013).



Gambar 5.7 Perubahan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



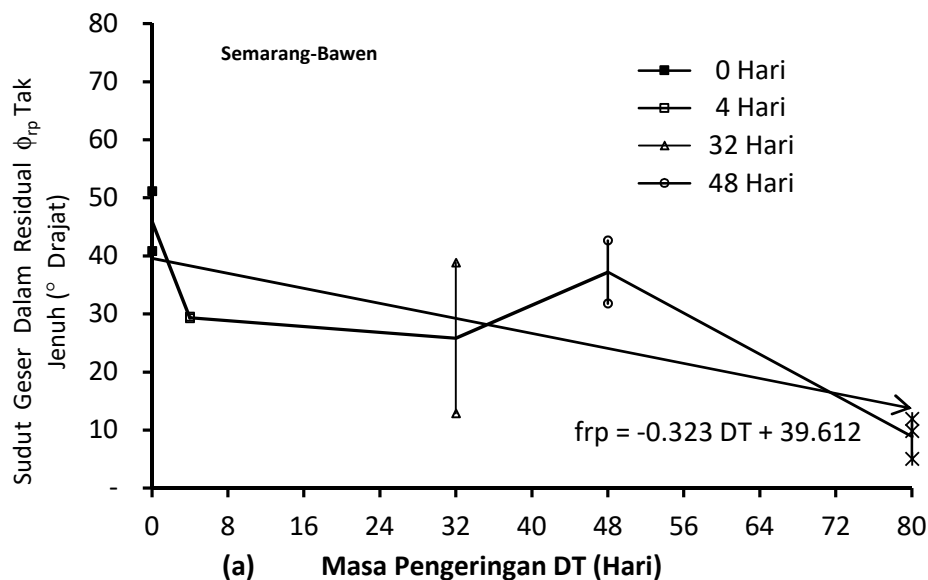
Gambar 5.8 Perubahan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen

5.4.2 Sudut Geser Dalam Residual Clay Shale Tak Jenuh

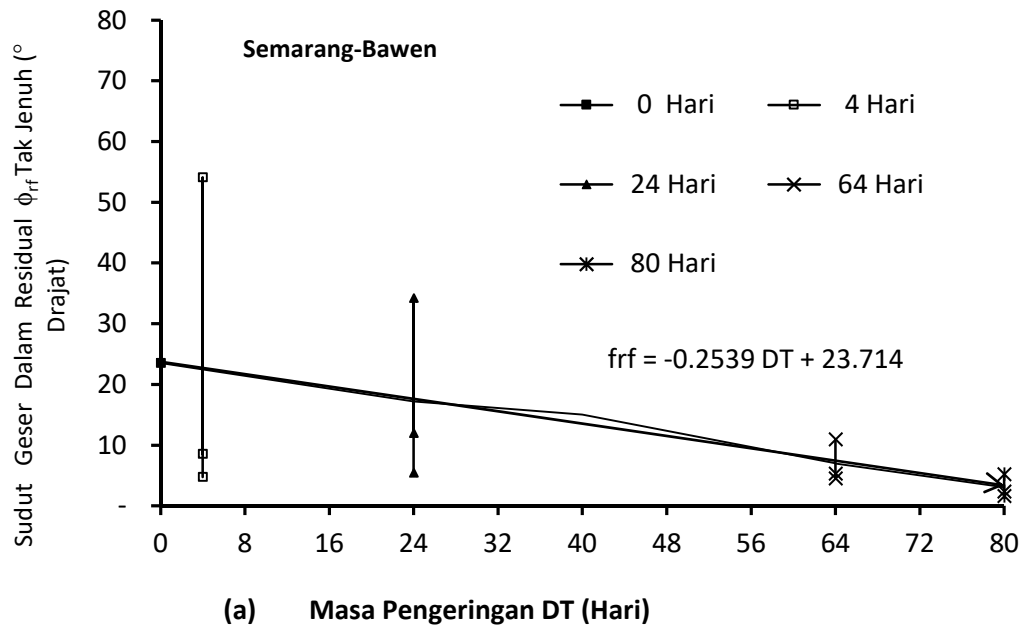
Pengurangan kekuatan geser residual clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, pada asal sebelum dilakukan pengeringan mempunyai sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) bernilai 46° , menurun hingga 8.9° atau 80.6% pada hari ke-80 pada masa pengeringan.. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual

tanpa pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rp}}$) clay shale tak jenuh Semarang-Bawen adalah $0.32^\circ/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80.. Perubahan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan tak jenuh clay shale Semarang-Bawen dilihat pada Gambar 6.9.

Sudut geser dalam residual asal dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) bernilai 23.5° menurun hingga 3.1° atau 86.8% pada hari ke-80 masa pengeringan.. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rf}}$) clay shale tak jenuh Semarang-Bawen adalah $0.25^\circ/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen tak jenuh tak jenuh dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.9 Perubahan sudut geser dalam tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.10 Perubahan sudut geser dalam dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) clay shale tak jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen

5.4.3 Kohesi Residual Clay Shale Jenuh

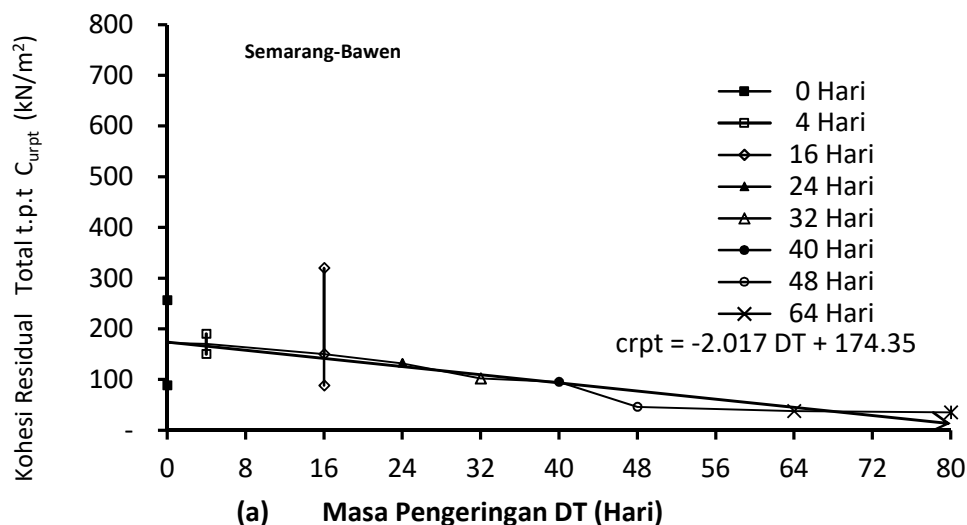
Pengurangan kekuatan geser residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen, pada keadaan asal sebelum dilakukan pengeringan kohesi residual total jenuh tanpa pelepasan tegangan (c_{rpt}) adalah 172 kN/m^2 , berkurang sehingga 35 kN/m^2 atau 79.7% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan (V_{crpt}) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $2.02 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan clay shale jenuh Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.11.

Kohesi residual efektif asal tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') adalah 170 kN/m^2 , berkurang sehingga 35.5 kN/m^2 atau 78.5% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (V_{crp}') clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $1.99 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen jenuh dapat dilihat pada Gambar 5.12.

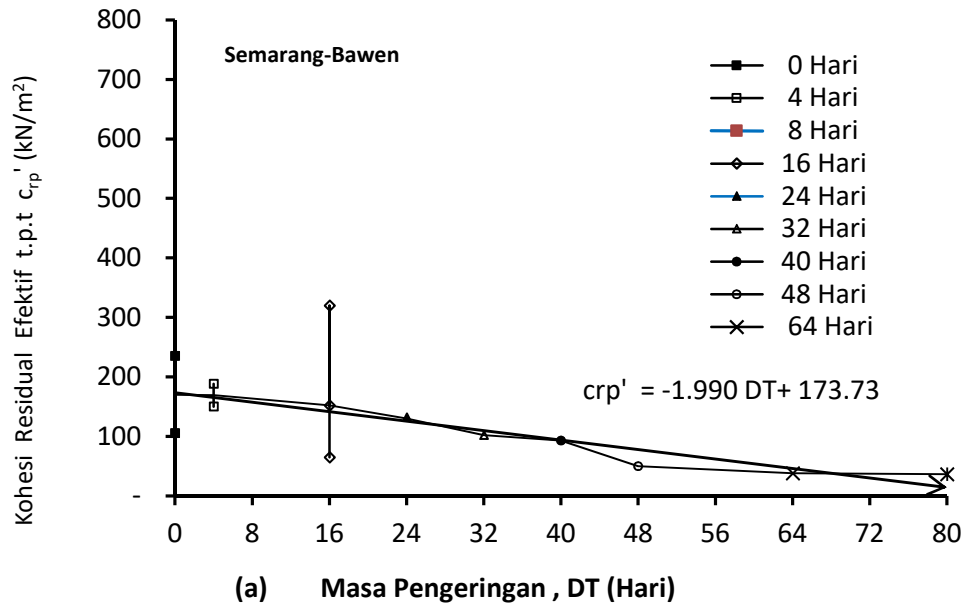
Perubahan kekuatan geser residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen, pada asal sebelum dilakukan pengeringan kohesi residual total dengan pelepasan tegangan (c_{rft}) adalah 28 kN/m^2 , berkurang sehingga 4.7 kN/m^2 atau 83.3% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan kohesi residual total dengan pelepasan tegangan ($V_{c_{rft}}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $0.31 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan kohesi residual total dengan pelepasan tegangan clay shale jenuh Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.13.

Kohesi residual efektif asal dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') adalah 27.8 kN/m^2 , berkurang sehingga 8 kN/m^2 atau 70% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan ($V_{c_{rf}'}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $0.23 \text{ kN/m}^2/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen jenuh dapat dilihat pada Gambar 5.14.

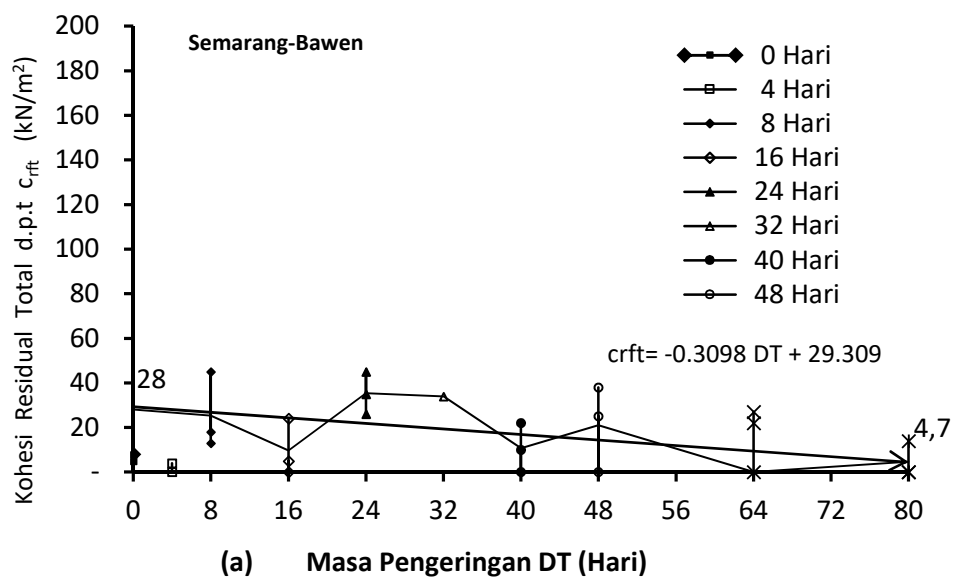
Hasil penelitian perubahan kohesi total (c) menjadi menjadi kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) hingga kohesi residual dengan pelepasan (c_{rf}) clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Tabel.5.2. Tabel tersebut juga menunjukkan pengurangan kohesi total, kohesi residual tanpa pelepasan tegangan dan kohesi residual dengan pelepasan tegangan akibat pelapukan dengan proses pengeringan, serta pada keadaan tak jenuh dan jenuh.



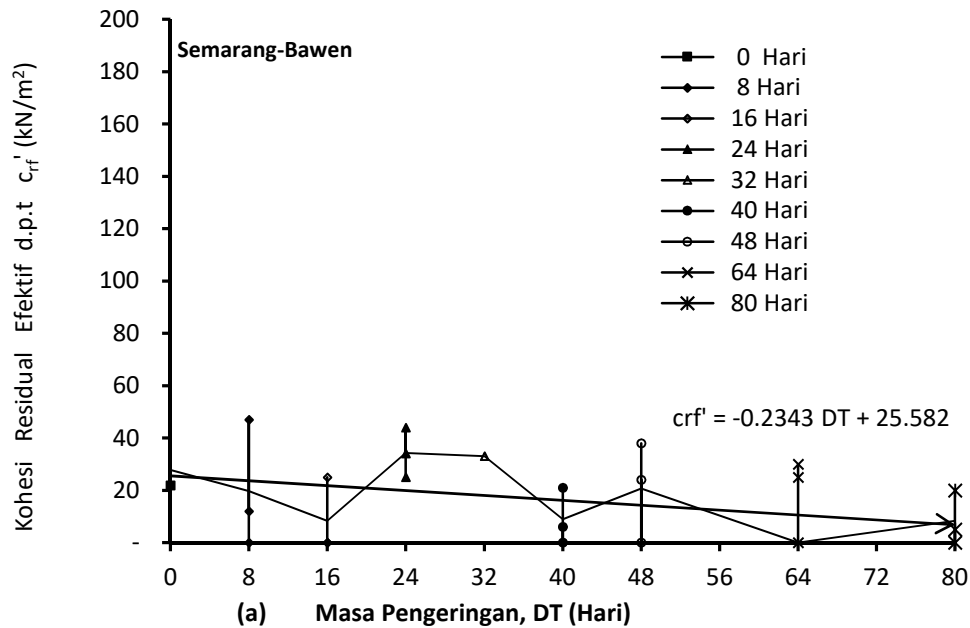
Gambar 5.11 Perubahan kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan (c_{rpt}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.12 Perubahan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.13 Perubahan kohesi residual total dengan pelepasan tegangan (c_{rt}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.14 Perubahan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen

5.4.4 Sudut Geser Dalam Residual Clay Shale Jenuh

Pengurangan kekuatan geser residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen, pada keadaan asal sebelum dilakukan pengeringan tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rpt}) adalah 27.4° , berkurang sehingga 10.9° atau 60.4% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rpt}}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen sebesar $0.21^\circ/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan clay shale jenuh Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.15.

Sudut geser dalam residual efektif asal tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') adalah 28.3° , berkurang sehingga 10.3° atau 63.6% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rp}'}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $0.21^\circ/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen jenuh jenuh dapat dilihat pada Gambar 5.16.

Perubahan kekuatan geser residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen, pada asal sebelum dilakukan pengeringan sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rfi}) adalah 25.3° , berkurang sehingga 4.6° atau 81.9% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rfi}}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $0.26^\circ/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan clay shale jenuh Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 5.17.

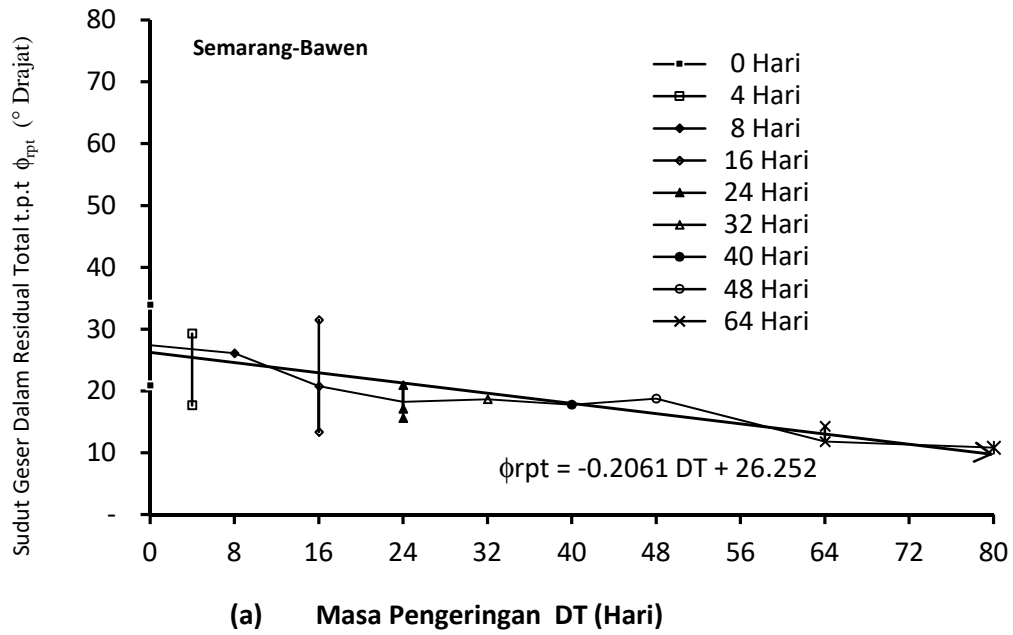
Sudut geser dalam residual efektif asal dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') adalah 25.3° , berkurang sehingga 4.5° atau 81.9% pada hari ke-80 masa pengeringan. Kadar pengurangan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ($V_{\phi_{rf}'}$) clay shale jenuh Semarang-Bawen adalah $0.25/\text{hari}$ dari awal hari pengeringan hingga hari ke-80. Perubahan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan clay shale Semarang-Bawen jenuh dapat dilihat pada Gambar 5.18.

Hasil penelitian perubahan sudut geser dalam total (ϕ) sehingga menjadi sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) dan sudut geseran dalam residual dengan pelepasan (ϕ_{rf}) clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Tabel 5.3. Pada tabel tersebut juga termasuk pengurangan sudut geser dalam total, sudut geseran dalam residual tanpa pelepasan tegangan dan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan akibat pelapukan dengan proses pengeringan, di dalam keadaan tak jenuh dan jenuh.

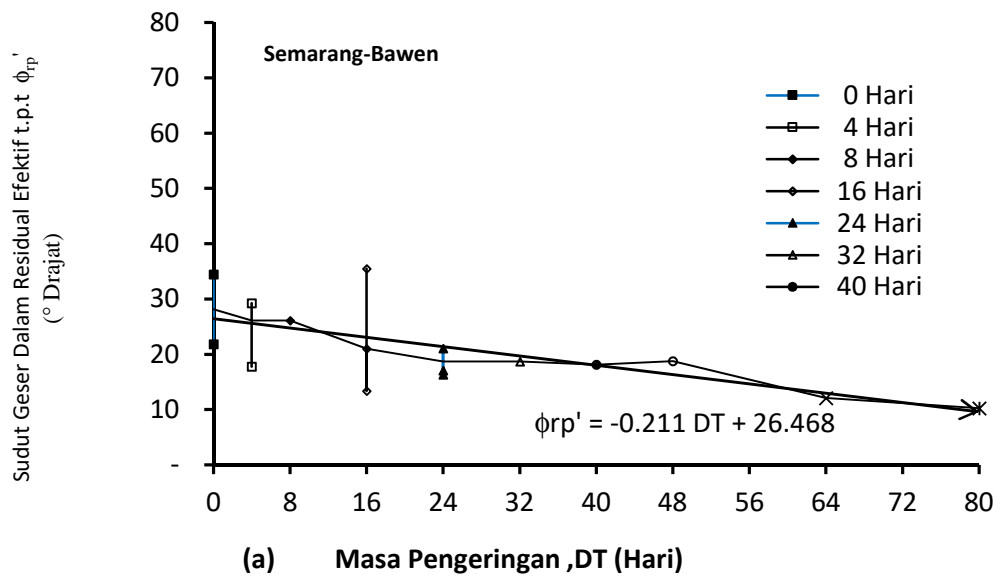
Penelitian terdahulu yang membicarakan perubahan kekuatan geser residual akibat pelapukan telah dilakukan pada batuan lempung Lilla arah utara-timur dari Spanyol. Batuan lempung ini mengandung mineral Illit, Palgorskit, Dolomit dan Kuarza. Kekuatan geser batuan lempung jenuh Lilla diuji dengan geser langsung dengan tegangan efektif 100 kPa, 200 kPa dan 300 kPa dilakukan dalam sampel tersebut dengan kaspelapukan akibat tiga siklus kelembapan relatif. Perubahan kekuatan geser terjadi pada keadaan tegangan puncak dan pada tegangan residual semasa tiga siklus berlangsung. Kohesi residual pada masa awal adalah 41.7 kPa

menurun sehingga menjadi 13 kPa setelah masa tiga siklus belangsung, atau sebanyak 31.2% Sudut geser dalam residual pada masa asal sebesar 45° menurun hingga menjadi 33° setelah masa tiga siklus belangsung, atau sebanyak 73.3% (Pineda *et al.*, 2014b). Besarnya perubahan sudut gesaran dalam residual diperoleh dari graf hubungan tegangan geser dan regangan dari uji geser langsung dengan tegangan normal efektif yang berbeda.

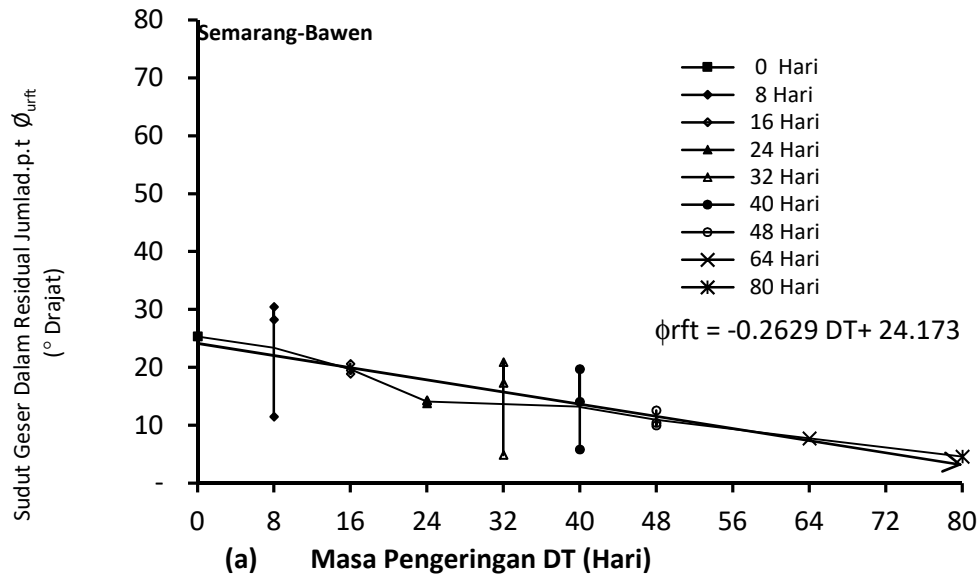
Perbedaan dari tiga uji kekuatan geser residual di laboratorium adalah merupakan uji pembalikan geser langsung (RDS), triaksial tersalir dan uji geser cincin pada sampel lempung. Pada penelitian terdahulu sudut geser dalam residual (ϕ_r) akan menurun apabila bertambah indeks keplastikan lempung (PI) serta juga dengan bertambahnya batas cecair (LL). Masalah ini terjadi pada semua uji yang dilakukan. Dari uji triaksial terkukuh tersalir (CD), pada batas kecair (LL) 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) 27° bernilai menurun menjadi 12° manakala batas cecair pada 115% atau menjadi 44%. Manakala dari uji perbalikan geser langsung (RDS), pada batas kecair (LL) 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) bernilai 22° menjadi 9° manakala batas cecair 115% atau menjadi 41%. Sedangkan dari uji geser pada cincin (RS), pada batas kecair (LL) 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) bernilai 17° menjadi 8° manakala batas cecair pada 115% menurun menjadi 47% (Bayin *et al.*, 2013). Hasil tertinggi dari sudut geser dalam residual terjadi pada uji triaksial tersalir (CD) bernilai 27° pada batas cecair (LL) 40%. Manakala sudut geser dalam residual terjadi pada uji perbalikan rich langsung (RDS) sebesar 22° pada batas cecair (LL) 40%, berkurang 81.5% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (CD). Sedangkan sudut geser dalam residual terjadi pada uji geser cincin (RS) adalah 17° pada batas cecair (LL) 40%, berkurang 63% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (Bayin *et al.*, 2013). Ringkasan dari penelitian terdahulu yang dibahas dengan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.4.



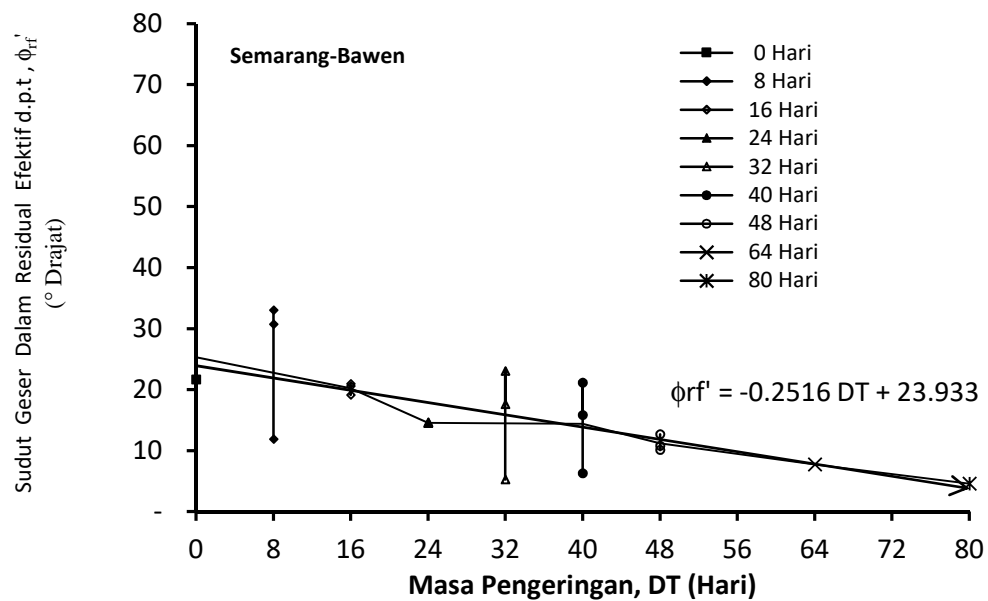
Gambar 5.15 Perubahan sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.16 Perubahan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.17 Perubahan sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan (ϕ_{urft}) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.18 Perubahan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan ($\phi_{rf'}$) clay shale jenuh akibat proses pengeringan clay shale Semarang-Bawen

Tabel 5.2 : Hasil penelitian perubahan kohesi total dan kohesi residual, pengurangan kohesi dan kadar pengurangan kohesi clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang akibat pelapukan proses pengeringan

Parameter Kekuatan Geser	Keadaan Sampel	Lokasi Clay shale	Kohesi		Pengurangan %	Kadar Pengurangan Kohesi (garis regresi) kN/m ² /hari	Ket.
			Awal (kN/m ²)	DT =80 hari (kN/m ²)			
Kekuatan geser Pada Tegangan Puncak							
Kohesi (c)	Tak Jenuh	SMG-BWN	700	220	68.6	1.11	4 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	450	75	83.3	3.08	0 ~ 80 hari
Kohesi Total (c _t)	Jenuh	SMG-BWN	300	79	73.7	2.26	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	195	60.5	69.0	1.34	0 ~ 80 hari
Kohesi Efektif (c')	Jenuh	SMG-BWN	300	79	73.7	2.25	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	190	64	65.3	1.29	0 ~ 80 hari
Kekuatan geser Pada Tegangan Residual							
Kohesi Residual Tanpa Pelepasan Tegangan (c _{rp})	Tak Jenuh	SMG-BWN	285	29	89.8	3.14	0 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	270	23	91.5	2.58	0 ~ 80 hari
Kohesi Residual Dengan Pelepasan Tegangan (c _{rt})	Tak Jenuh	SMG-BWN	25.7	5	81.3	0.17	0 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	161	0	100.0	1.22	0 ~ 80 hari
Kohesi Residual Total Tanpa Pelepasan Tegangan (c _{rp})	Jenuh	SMG-BWN	172	35	79.7	2.02	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	100	9	91.0	1.19	0 ~ 80 hari
Kohesi Residual Efektif Tanpa Pelepasan Tegangan (c _{rp} ')	Jenuh	SMG-BWN	170	35.5	78.5	1.99	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	98	9	90.8	1.15	0 ~ 80 hari
Kohesi Residual Total Dengan Pelepasan Tegangan (c _{rt})	Jenuh	SMG-BWN	28	4.67	83.3	0.31	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	17	0	100.0	0.15	0 ~ 80 hari
Kohesi Residual Efektif Dengan Pelepasan Tegangan (c _{rt} ')	Jenuh	SMG-BWN	27.8	8.33	70.0	0.23	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	17	0	100.0	0.16	0 ~ 80 hari

Tabel 5.3 : Hasil uji perubahan sudut geser dalam total dan sudut geser dalam residual, pengurangan sudut geser dalam dan kadar pengurangan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen dan Hambalang akibat pelapukan proses pengeringan

Parameter Kekuatan Geser	Keadaan Sampel	Lokasi Clay shale	Sudut Geser Dalam		Pengurangan %	Kadar Pengurangan Sudut Geser Dalam (°/hari)	Ket.
			Awal (drajat)	DT =80 hari (drajat)			
Kekuatan geser Pada Tegangan Puncak							
Sudut Geser Dalam (ϕ)	Tak Jenuh	SMG-BWN	59.4	38.4	35.4	0.31	4 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	78.4	42.8	45.4	0.38	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Total (ϕ_t)	Jenuh	SMG-BWN	53.2	19.4	63.5	0.30	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	48.9	22.3	54.4	0.35	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Efektif (ϕ')	Jenuh	SMG-BWN	53.2	19.4	63.5	0.30	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	50.3	22.2	55.9	0.36	0 ~ 80 hari
Kekuatan Geser Pada Tegangan Residual							
Sudut Geser Dalam Residual Tanpa Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr})	Tak Jenuh	SMG-BWN	45.97	8.9	80.6	0.323	0 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	45	12.9	71.3	0.39	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Residual Dengan Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr})	Tak Jenuh	SMG-BWN	23.5	3.1	86.8	0.25	0 ~ 80 hari
	Tak Jenuh	HBL	22	5.1	72.3	0.2	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Residual Total Tanpa Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr})	Jenuh	SMG-BWN	27.4	10.85	60.4	0.21	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	31.2	10.2	67.3	0.26	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Residual Efektif Tanpa Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr}')	Jenuh	SMG-BWN	28.1	10.3	63.6	0.21	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	32	10.7	65.6	0.27	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Residual Total Dengan Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr})	Jenuh	SMG-BWN	25.3	4.6	81.9	0.26	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	15	6.8	54.7	0.11	0 ~ 80 hari
Sudut Geser Dalam Residual Efektif Dengan Pelepasan Tegangan (ϕ_{pr}')	Jenuh	SMG-BWN	25.3	4.57	81.9	0.25	0 ~ 80 hari
	Jenuh	HBL	15	6.84	54.4	0.17	0 ~ 80 hari

Tabel 5.4 : Penelitian terdahulu yang dibahas berkenaan dengan hasil penelitian perubahan kekuatan geser pada tegangan puncak akibat proses pengeringan

Penulis	Penelitian terdahulu
(Pineda <i>et al.</i> , 2014b).	<p>Pada batuan lempung Lilla arah utara-timur dari Sepanyol : Kohesi residual pada masa asal sebesar 41.7 kPa menurun hingga menjadi 13 kPa atau 31.2% setelah masa tiga siklus belangsung. Sudut geser dalam residual pada masa asal bernilai 45° menurun sehingga menjadi 33° atau 73.3% setelah masa tiga siklus belangsung.</p>
(Bayin <i>et al.</i> , 2013)	<p>Pada penelitian terdahulu sudut geser dalam residual (ϕ_r) akan menurun bila bertambah indeks keplastikan lempung (PI) serta juga dengan bertambahnya batas cecair (LL).</p> <ol style="list-style-type: none"> Dari uji triaksial tersalir (CD), pada batas kecair (LL) 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) dari pada 27° menjadi 12° manakala LL = 115% menjadi 44.4%. Dari uji perbalikan geser langsung (RDS), pada LL = 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) dari pada 22° menjadi 9° manakala LL = 115% menjadi 41%. Dari uji geser ring (RS), pada batas kecair (LL) 40% sudut geser dalam residual (ϕ_r) dari pada 17° menjadi 8° manakala LL = 115% menjadi 47%.
(Bayin <i>et al.</i> , 2013)	<p>Hasil tertinggi dari sudut geser dalam residual terjadi pada uji triaksial tersalir (CD) adalah 27° pada batas cecair (LL) 40%.</p> <ol style="list-style-type: none"> Pada uji perbalikan rich langsung (RDS) adalah 22° pada LL = 40%, atau berkurang 81.5% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (CD). Pada uji geser cincin (RS) adalah 17° pada LL = 40%, atau berkurang 63% bila dibandingkan dengan uji triaksial tersalir (CD)

5.5 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 total, 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 masa asal sebelum terjadi pelapukan yang dibandingkan kepada kekuatan geser pada tegangan puncak asal sebelum terjadi pelapukan. Nilai kasuseluruhan diperkirakan dalam peratus pengurangan kekuatan geser yang diperolehi daripada data perubahan kekuatan geser pada Lampiran B.

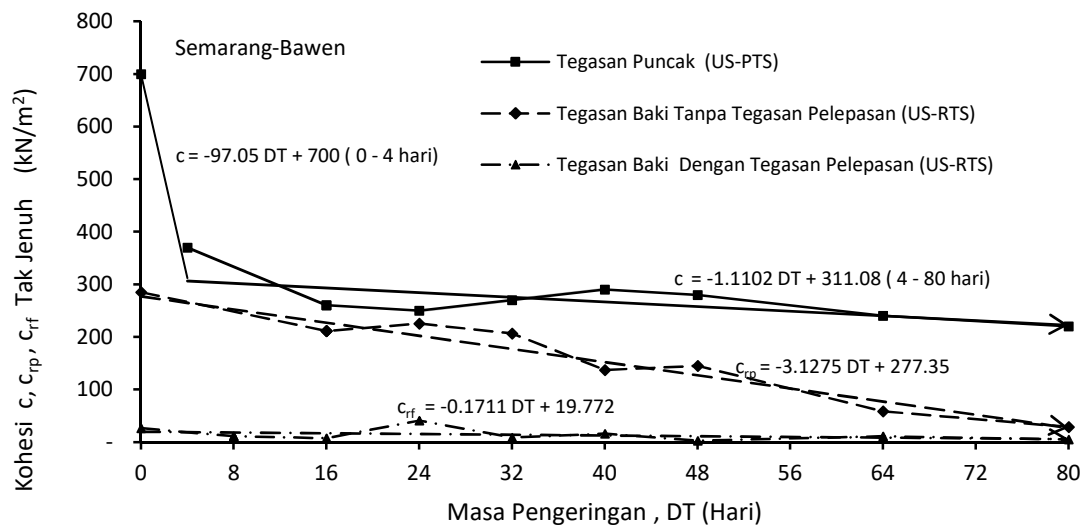
5.5.1 Clay Shale Tak Jenuh

Secara umumnya, perilaku kekuatan geser daripada tegangan puncak kepada tegangan residual jangkalu berkurang. Masalah 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 perencanaan geoteknik

Pada clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, kohesi pada tegangan puncak rata-rata (c) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah 700 kN/m^2 . Manakala pada asal kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) adalah 285 kN/m^2 atau 40.71%. Sementara kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) bernilai 25.7 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 masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) adalah 29 kN/m^2 atau 4.1%. Sementara pada hari ke-80 kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) sebesar 5 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 5.19.



Gambar 5.19 Perbedaan pengurangan kohesi clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak (c) hingga tegangan residual (c_{rp} dan c_{rf}) akibat proses pengeringan

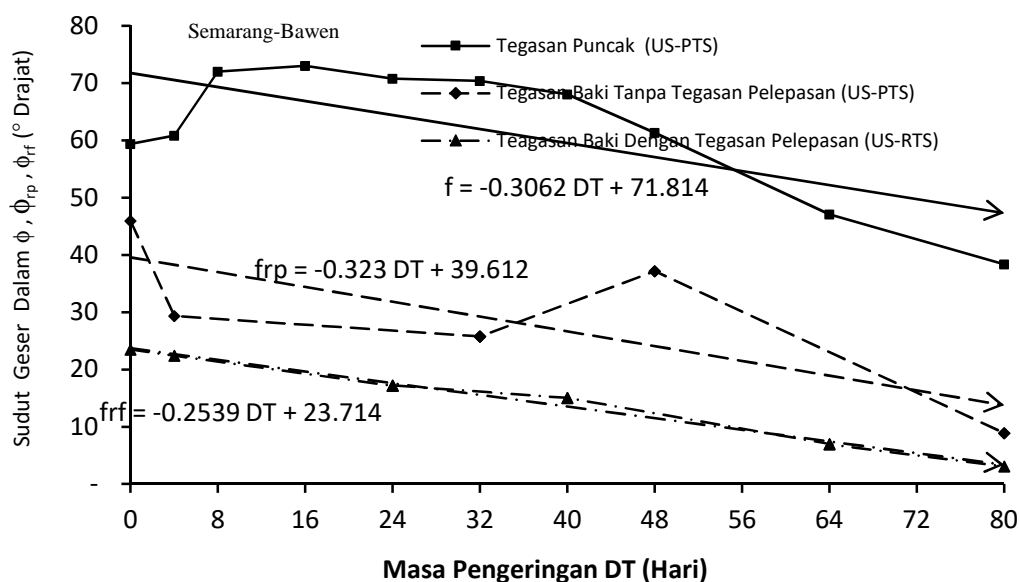
Pada clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam pada tegangan puncak rata-rata (ϕ) asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan sebesar 59.4° . Manakala sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) adalah 46° atau 77.8% dari sudut geser dalam pada tegangan puncak. Sementara sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) adalah 23.5° 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 masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) adalah 8.9° atau selebihnya tinggal 15%. Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) adalah 3.1 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 (ϕ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) dan tegangan

residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 5.20.

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 berkurang 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° berkurang pada gred ke-IV menjadi 26° atau 3.4%. Manakala pada keadaan tegangan residual sudut geser dalam (ϕ_r) bernilai 9° 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 (ϕ_r) adalah 30° berkurang hingga 5.5° . Berkurangnya sudut geser dalam residual (ϕ_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 5.20 Perbedaan pengurangan sudut geser dalam clay shale tak jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak (ϕ) hingga tegangan residual (ϕ_{rp} dan ϕ_{rf}) akibat proses pengeringan.

5.5.2 Perbedaan Pengurangan Kohesi Pada Clay Shale Jenuh

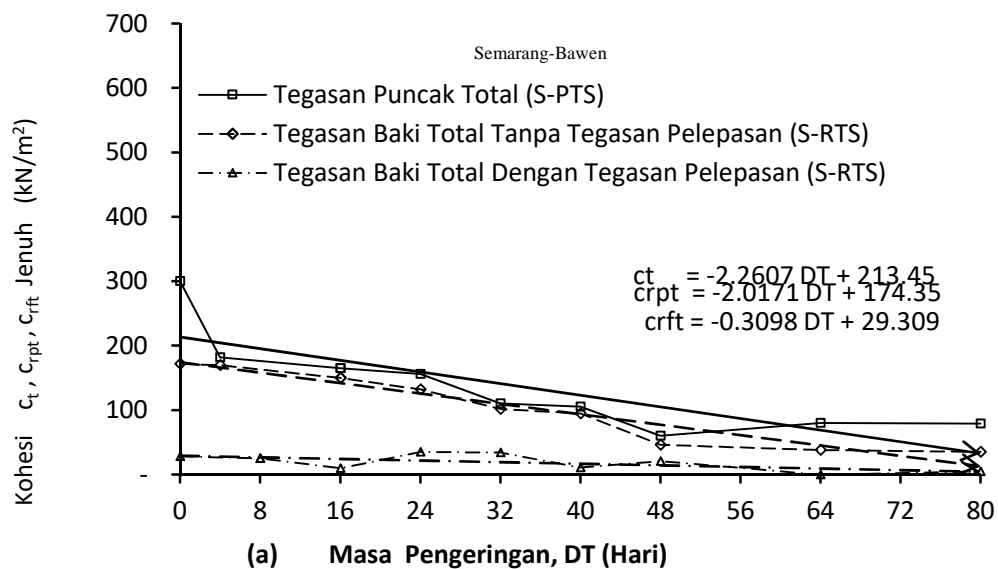
Pada clay shale jenuh Semarang-Bawen, kohesi total asal pada tegangan puncak rata-rata (c_i) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan bernilai 300 kN/m^2 . Manakala pada asalnya kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan (c_{rpt}) adalah 172 kN/m^2 atau 57.3%. Sementara kohesi residual total dengan pelepasan tegangan (c_{rft}) adalah 28 kN/m^2 atau 9.3% dari keadaan asal kohesi total pada tegangan puncak. Apabila pengurangan kohesi residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual total tanpa pelepasan tegangan (c_{rpt}) adalah 35 kN/m^2 atau 11.7%. Sementara pada hari ke-80 kohesi residual total dengan pelepasan tegangan (c_{rft}) adalah 4.67 kN/m^2 atau 1.6 % dari keadaan asal kohesi total 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 kN/m^2 . Manakala nilai asal kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') adalah 172 kN/m^2 atau 57.2%. Sementara kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') adalah 28 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 masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') adalah 37 kN/m^2 atau 12.2%. Sementara pada hari ke-80 kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') adalah 8 kN/m^2 atau 2.8 % dari keadaan asal kohesi efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan kohesi total 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 5.21.

Dari penelitian terdahulu seperti pada Gambar 2.10, kohesi berkasusaan (c') clay shale tanpa rendaman pada tegangan puncak adalah 269 kN/m^2 berkurang menjadi 0 kN/m^2 bila direndam pada tegangan puncak efektif maupun pada tegangan

residual efektif. Sementara sudut geser dalam pada tegangan puncak efektif (ϕ') bernilai 39° menurun bila sampel direndam menjadi 25° atau selebihnya tinggal 64.1%. Sudut geser dalam efektif berkurang lagi bila pada tegangan residual efektif sehingga sudut geser dalam residualnya efektif (ϕ_r') menjadi 15° 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 5.21 Perbedaan pengurangan kohesi clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak hingga tegangan residual akibat proses pengeringan (a) pada tegangan total (b) pada tegangan efektif

5.5.3 Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Pada Clay Shale Jenuh

Pada clay shale jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam total asal pada tegangan puncak rata-rata (ϕ_t) sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah 53.2° . Manakala pada keadaan asal sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rpt}) adalah 27.4° atau 51.5%. Sementara sudut geser

dalam residual total dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rft}) bernilai 25.3° atau 47.5% dari keadaan asal sudut geser dalam total pada tegangan puncak. Apabila pengurangan sudut geser dalam residual total clay shale jenuh Semarang-Bawen ditentukan setelah terjadi pelapukan hingga masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual total tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rpt}) adalah 10.9° atau selebihnya tinggal 20.4%. Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual total dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rft}) adalah 4.6° atau 8.6% dari keadaan asal sudut geser dalam total pada tegangan puncak.

Sudut geser dalam efektif (ϕ') asal clay shale jenuh Semarang-Bawen pada tegangan puncak rata-rata asal sebelum terjadinya pelapukan akibat proses pengeringan adalah 53.2° . Manakala pada asalnya sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') adalah 28.1° atau 52.8%. Sementara sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') adalah 25.3° 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 masa ke-80 hari akibat pengeringan, maka sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') adalah 10.3° atau 19.3%. Sementara pada hari ke-80 sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') adalah 4.6° atau 8.6% dari keadaan asal sudut geser dalam efektif pada tegangan puncak. Perbedaan pengurangan sudut geser dalam total dan sudut geser dalam efektif clay shale jenuh Semarang-Bawen dari tegangan puncak (ϕ) hingga tegangan residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) akibat proses pengeringan dapat dilihat pada Gambar 5.22.

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

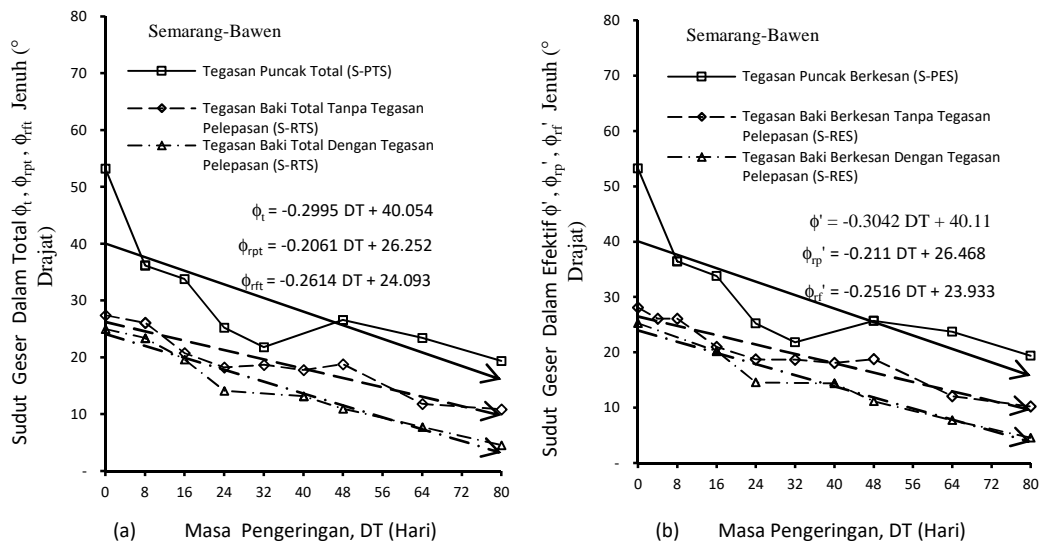
Penelitian terdahulu dari dua puluh empat jenis clay shale telah diperoleh hubungan antara perbedaan sudut geser dalam efektif pada tegangan total (ϕ') dengan sudut geser dalam pada tegangan residual efektif (ϕ_r'). Pada Gambar 5.24 perubahan minimum dari sudut geser dalam total efektif (ϕ') adalah 34° berkurangan pada sudut geseran dalam residual efektif (ϕ_r') 25° atau 25.5%. Manakala perubahan maksimum dari sudut geser dalam total efektif (ϕ') bernilai 24° berkurangan pada sudut geseran dalam residual efektif (ϕ_r') bernilai 5° atau 79.2% (Mesri dan Diaz, 1986).

Besarnya sudut geser dalam residual (ϕ_r) clay shale amat tergantung kepada batas cecair (LL). Kadar pengurangan sudut geseran 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 5.23. Pada Gambar 5.23 juga terdapat hasil penelitian clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang sebagai bentuk falidasi dalam penelitian mengenai kekuatan geser residual.

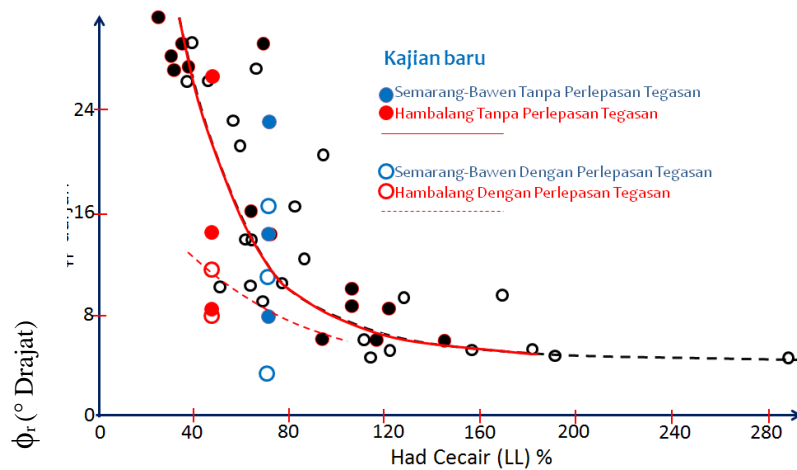
Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol, kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dilakukan dalam tiga siklus. Sudut geser dalam puncak (ϕ) asal adalah 46° dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) asal adalah 45° atau 97.8%. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus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

Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale Semarang-Bawen antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada keadaan asal, dapat dilihat pada Tabel 5.5. Manakala hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale Semarang-Bawen antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada keadaan asal dengan masa hari ke-80 proses pengeringan dapat dilihat pada

Tabel 5.6. Sementara penelitian terdahulu berkenaan dengan hasil penelitian sebagai wujud validasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 5.7



Gambar 5.22 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 5.23 Hubungan antara sudut geser dalam residual (ϕ_r) dengan batas Liquid Limits LL (Mesri dan Diaz, 1986)

5.5.4 Perbedaan Kekuatan Geser Pada Tegangan Total Dan Tegangan Efektif

Pada clay shale jenuh melalui uji triaksial jangkalu diperoleh tegangan total 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 total dan kekuatan geser efektif, yang akan menghasilkan kohesi total dan kohesi efektif (c_t dan c') serta sudut geser dalam total dan sudut geser dalam efektif (ϕ_t dan ϕ').

Untuk memperoleh perbedaan secara kuantitatif antara kekuatan geser total dan efektif, maka pada penelitian berikut telah kumpulkan semua data kekuatan geser pada tegangan total 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 total dan kekuatan geser efektif dengan menentukan persamaan linear yang menyatakan hubungan fungsi kekuatan geser efektif dan kekuatan geser totalnya. Dari Gambar 5.24 didapati bahwa kohesi efektif (c') clay shale Semarang-Bawen adalah 99% dari kohesi total. Sedangkan dari Gambar 5.29 diperoleh bahwa kohesi efektif (c') clay shale Hambalang adalah 99.5% dari kohesi total. Dengan demikian pada kedua clay shale tersebut didapati bahwa kohesi efektif adalah lebih kecil dari kohesi total, dengan kadar pengurangan antara 0.5% hingga 1%.

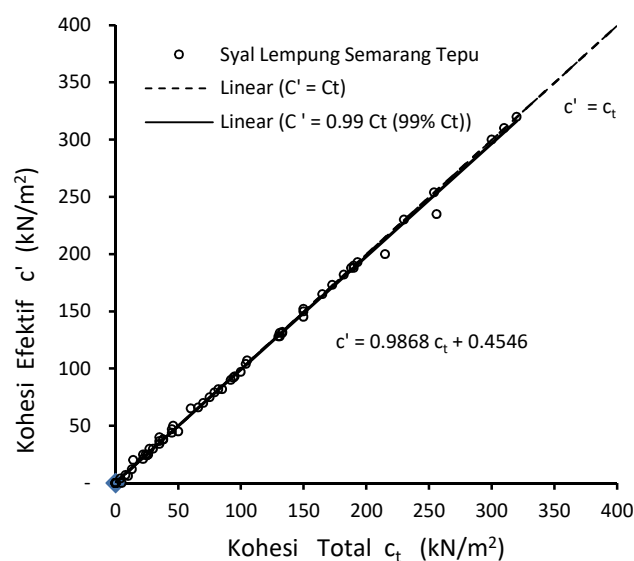
Dari Gambar 5.26 didapati bahwa sudut geser dalam efektif (ϕ') clay shale Semarang-Bawen adalah 0.4% lebih besar daripada sudut geser dalam total (ϕ_t). Sedangkan dari Gambar 5.31 diperoleh bahwa sudut geser dalam efektif (ϕ') clay shale Hambalang adalah 0.8% lebih besar daripada sudut geser dalam total (ϕ_t). Dengan demikian pada kedua clay shale tersebut diperoleh bahwa sudut geser dalam efektif sedikit lebih besar dari sudut geser dalam total, kenaikannya antara 0.4% hingga 0.8%. Dapat disimpulkan bahwa perubahan kekuatan geser efektif terhadap kekuatan geser totalnya 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.

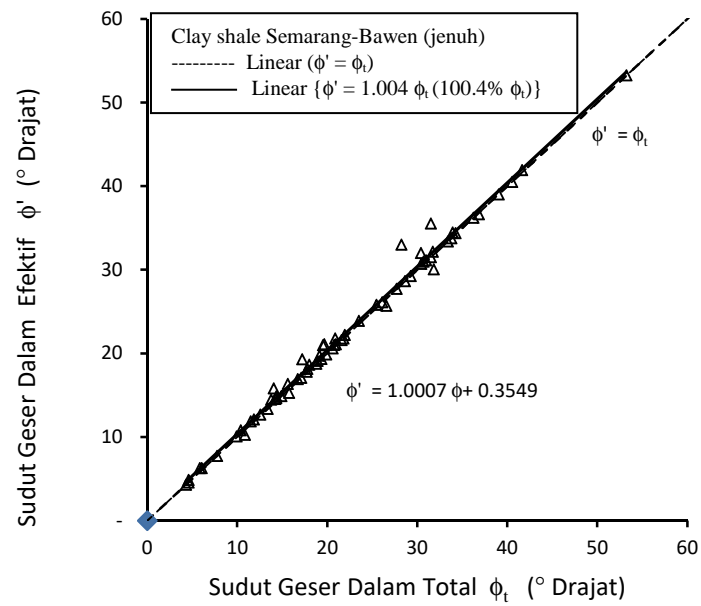
Pada penelitian terdahulu perbedaan kekuatan geser pada tegangan efektif antara tegangan puncak dan tegangan residual. Hubungan antara sudut geser dalam residual efektif (ϕ_r') jangkalu lebih kecil daripada sudut geser residual total efektif (ϕ'). Uji ini dilakukan kepada 24 jenis shale dan 10 jenis 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 kasus komposisi 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 (ϕ') dan sudut geser dalam tak tersalir (ϕ) adalah setengah pada mineral Montmorillonit hingga dua kali pada mineral Kaolinit sudut geser dalam tak tersalir (ϕ) (Ajmera *et al.*, 2012). Hubungan antara sudut geser dalam efektif tersalir dan sudut geser dalam tak tersalir dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut.

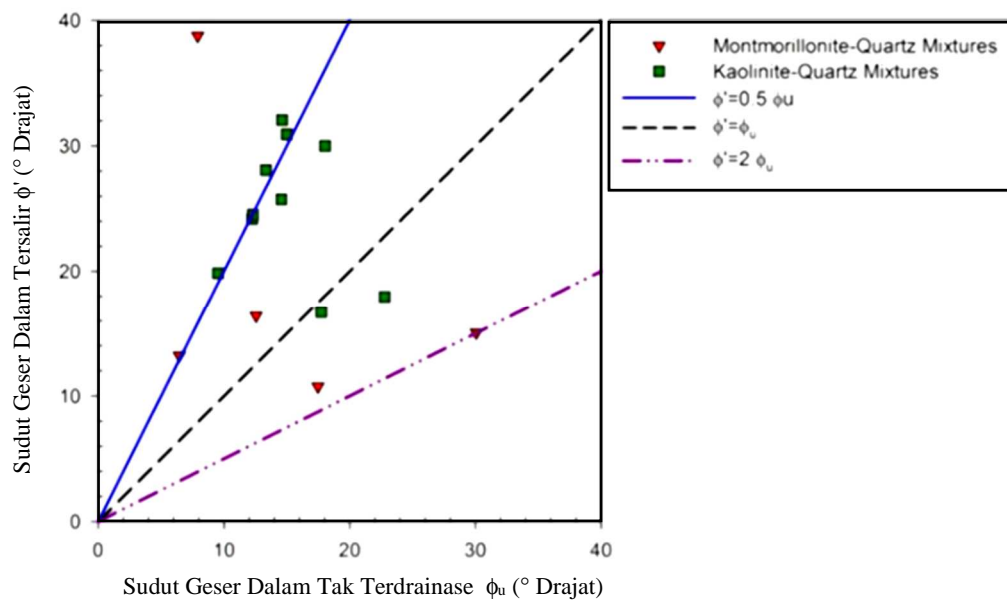
Falidasi antara hasil penelitian dan penelitian terdahulu berkenaan perbedaan kekuatan geser pada tegangan total dan tegangan efektif dapat dilihat pada Tabel 6.8.



Gambar 5.24 Perbedaan kohesi total dan kohesi efektif pada clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.25 Perbedaan sudut geser dalam total dan efektif clay shale Semarang-Bawen



Gambar 5.26 Hubungan antara ϕ_u tak tersalir dengan ϕ' terdrainase (Ajmera *et al.*, 2012)

Tabel 5.5 : Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada kondisi awal

Lokasi	Sampel Semula jadi		Pada Sampel Semula jadi (0 hari)							
	Tegangan Puncak		Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan				Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan			
	c kN/m ²	ϕ (°)	c _{rp} kN/m ²	(%) Selebihnya	ϕ_{rp} (°)	(%) Selebihnya	c _{rf} kN/m ²	(%) Selebihnya	ϕ_{rf} (°)	(%) Selebihnya
Tak Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Total)										
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	25.7	3.8	23.5	39.6
Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Total)										
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 5.6 : Hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual dengan pelepasan tegangan pada masa semula jadi serta masa hari ke-80

Lokasi	Pada sampel asal		Pada Sampel Hari ke-80							
	Tegangan Puncak		Tegangan Residual Tanpa Pelepasan Tegangan				Tegangan Residual Dengan Pelepasan Tegangan			
	c kN/m ²	ϕ (°)	c _{rp} kN/m ²	(%) Selebihnya	ϕ_{rp} (°)	(%) Selebihnya	c _{rf} kN/m ²	(%) Selebihnya	ϕ_{rf} (°)	(%) Selebihnya
Tak Jenuh Pada Keadaan Awal (Tegangan Total)										
Hambalang	450	78.4	13	2.89	12.9	15.45	0	0.00	5.1	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 Total)										
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	35.5	12.17	10.25	19.25	8.33	2.78	4.57	8.58

Tabel 5.7 : Penelitian terdahulu yang dibahas berkenaan dengan hasil penelitian perbedaan perubahan kekuatan geser pada clay shale antara tegangan total dengan tegangan residual tanpa pelepasan tegangan dan tegangan residual.

Penulis	Penelitian terdahulu
<p>(Gartung , 1986).</p> <p>(Dewoolkar dan Robert, 2005)</p> <p>(Timothy <i>et al.</i>, 1991).</p>	<p>Penelitian terdahulu pada pekerjaan galian clay shale formasi The Keuper.</p> <p>a. Kohesi (c) 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 jelek).</p> <p>b. Sudut geser dalam asal adalah 41° menurun pada gred ke-IV bernilai 26° atau 63.4%. Manakala pada keadaan tegangan residual sudut geser dalam (ϕ_r) adalah 9° atau 22%.</p> <p>Penelitian perubahan sudut geser dalam residual pada beberapa batuan lempung Fron Range Colorado</p> <p>Sudut geser dalam residual (ϕ_r) adalah 3° berkurangan sehingga sebesar 5.5°. Pengurangan sudut geser dalam residual (ϕ_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%</p> <p>Kohesi berkawasan (c') clay shale asal tanpa rendaman asal sebesar 5500 psf menurun menjadi 0 psf bila direndam. (ϕ') asal sebesar 39° akan berkurangan bila sampel direndam menjadi 25° atau 64.1%. Pada tegangan residual efektif (ϕ_r') menjadi 15° atau 38.5%.</p>
<p>(Pineda <i>et al.</i>, 2014)</p> <p>(Mesri dan Diaz, 1986).</p> <p>(Pineda <i>et al.</i>, 2014).</p>	<p>Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol, kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dalam 3 siklus.</p> <p>a. Kohesi puncak (c) asal adalah 108 kPa dan kohesi residual (c_r) asal sebesar 41.7 kPa atau 38.6%.</p> <p>b. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, kohesi puncak menjadi (c) 17 kPa atau 15.7%, manakala kohesi residual (c_r) menjadi 13 kPa atau 12%.</p> <p>Penelitian terdahulu dari 24 jenis clay shale pada hubungan ϕ' dan ϕ_r'</p> <p>a. Perubahan minimum dari ϕ' adalah 34° berkurang kepada ϕ_r' bernilai 25° atau 25.5%.</p> <p>b. Perubahan maksimum daripada ϕ' bernilai 24° menurun ϕ_r' bernilai 5° atau 79.2%</p> <p>Pada uji geser langsung pada sampel jenuh batuan lempung Lilla Sepanyol, kaspelapukan dengan siklus kelembapan relatif dalam 3 siklus.</p> <p>a. Sudut geser dalam puncak (ϕ) asal adalah 46° dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) asal adalah 45° atau 97.8%.</p> <p>b. Akibat pelapukan yang terjadi hingga siklus ke tiga, sudut geser dalam puncak (ϕ) menjadi 36° atau 78.2%, manakala sudut geser dalam residual (ϕ_r) menjadi 33° atau 71.7%</p>

Tabel 6.8 : Hasil penelitian dan penelitian terdahulu mengenai perbedaan antara kekuatan geser pada tegangan total dan tegangan efektif.

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>Uji ini dilakukan sebanyak 24 jenis shale dan 10 jenis mineral murni</p> <p>a. ϕ_r' jangkaku lebih kecil ϕ'</p> <p>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>	<p>Hubungan kekuatan geser efektif terhadap kekuatan geser total clay shale</p> <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</p> <p>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.</p>
<p>Penelitian mengenai kasus komposisi mineral dan laju geser pada kekuatan geser lempung pengampul</p> <p>Ratio perbedaan antara sudut geser dalam efektif tersalir (ϕ') dan sudut geser dalam tak tersalir (ϕ) adalah bahwa sudut geser dalam efektif tersalir (ϕ') sebesar setengah hingga dua kali sudut geser dalam tak tersalir (ϕ), $\phi' = (0.5 \sim 2) \phi$ (Ajmera <i>et al.</i>, 2012).</p>	

5.6 Perubahan Kekuatan Geser Clay Shale Akibat Siklus Pembasahan dan Pengeringan

Penelitian kasuspelapukan 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 masa yang sama apabila dibandingkan dengan proses pengeringan. Manakala kekuatan geser akibat siklus pembasahan dan pengeringan hanya dapat diuji sehingga masa hari ke-32 untuk clay shale Hambalang dan

maksimum hari ke-24 untuk clay shale Semarang-Bawen. Selepas masa 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 masa 8 hari atau setiap 4 hari. Manakala pembasahan dilakukan dengan cara merendam sampel clay shale kedalam air dalam masa 5 menit saja yang kemudian dilanjutkan dengan proses pengeringan lagi. Dipilihnya masa 5 menit pada proses perendaman, karena tujuannya adalah hanya untuk membasahi sampel clay shale hingga ke dalam joint yang terjadi akibat proses pelapukan. Masalah ini tidak dimaksudkan untuk membuat sampel menjadi jenuh. Penguji 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 semasa 5 menit disimulasikan sebagai keupayaan menyesuaikan keadaan akibat hujan hingga clay shale terendam oleh air hujan. Pada laboratorium dilakukan hanya dalam masa 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 Pamploma Marl dengan uji ekapaksi. Sebelum dilakukan uji geser sampel ia direndam dalam masa 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 6.9 berikut.

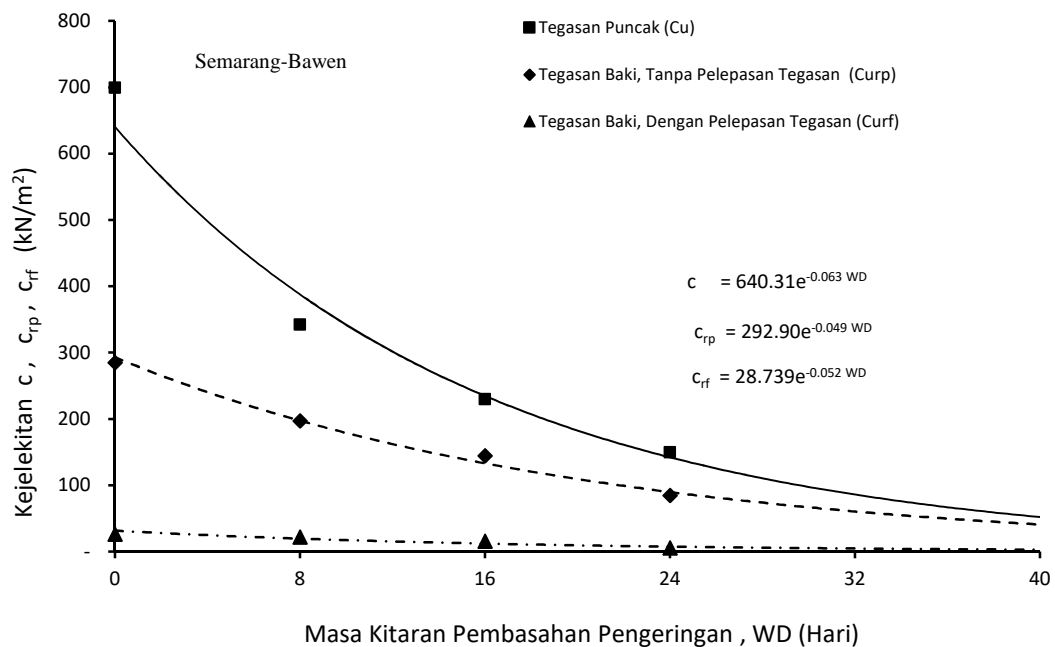
Tabel 6.9 : Siklus pembasahan dan pengeringan clay shale dan tabel uji triaksial.

0	2	2	6	6	10	10	14	14	18	18	22	22	26	26	30	30
2	6	10	14	18	22	26	30	34								
Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 Menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 menit	Pengeringan	Pembasahan 5 Menit	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

5.6.1 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 kN/m^2 . Manakala kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) pada keadaan asal adalah 285 kN/m^2 atau 40.7%, sedangkan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) pada asal adalah 27 kN/m^2 atau 3.8%. Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, kohesi total (c) pada hari ke-24 adalah 150 kN/m^2 atau 21.4%. Sedangkan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) pada hari ke-24 adalah 85 kN/m^2 atau 12.1% dan kohesi residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-24 adalah 6 kN/m^2 atau 0.9%. Perbedaan selisih pengurangan peratus kohesi residual akibat siklus pembasahan-pengeringan adalah lebih besar daripada akibat pengeringan pada masa yang sama. Masalah 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 masa hari ke-24 dapat dilihat pada Gambar 5.27.

Penelitian terdahulu yang membicarakan 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 kaspelapukan akibat tiga siklus kelembapan relatif. Perubahan kekuatan geser terjadi pada keadaan tegangan puncak dan pada tegangan residual semasa tiga siklus berlangsung. Kohesi puncak pada keadaan asal sebesar 108 kPa berkurang hingga menjadi 17 kPa setelah masa tiga siklus berlangsung, atau 15.6%. Manakala kohesi residual pada keadaan asal sebesar 41.7 kPa berkurang hingga menjadi 13 kPa setelah masa tiga siklus berlangsung, atau 31.2% (Pineda *et al.*, 2014a). Magnitud perubahan kohesi residual diperolehi dari graf hubungan tegangan geser dan regangan melalui uji geser langsung dengan tegangan normal efektif yang berbeda.

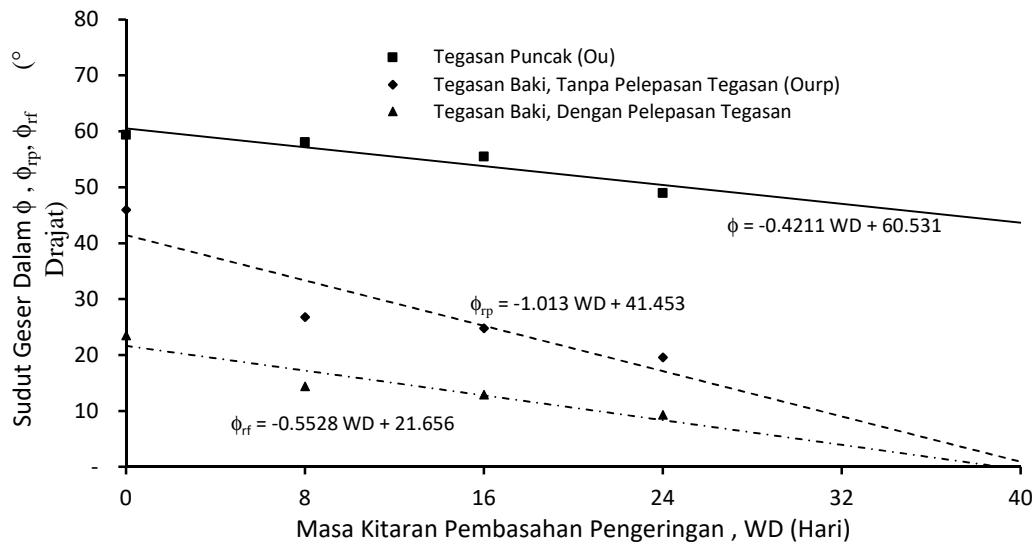


Gambar 5.27 Perubahan kohesi clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan masa pembasahan setiap 4 hari dengan masa rendaman 5 menit

5.6.2 Perbedaan Pengurangan Sudut Geser Dalam Clay Shale Tak Jenuh

Sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen pada keadaan asal (ϕ) sebelum proses siklus pembasahan dan pengeringan dilakukan sebesar 59.4° . Manakala sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) pada masa asal adalah 46° atau 77.4 %, sedangkan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) pada asal adalah 23.5° atau 39.6%. Akibat proses pelapukan di laboratorium dengan siklus pembasahan dan pengeringan clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, sudut geser dalam total (ϕ) pada hari ke-24 menjadi 49° atau 82.5%. Sedangkan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) pada hari ke-24 adalah 19.6° atau 33% dan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan pada hari ke-24 menjadi 9.3° 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 masa hari ke-24 dapat dilihat pada Gambar 5.29.

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 kaspelapukan akibat tiga siklus kelembapan relatif. Perubahan kekuatan geser terjadi pada keadaan tegangan puncak dan pada tegangan residual semasa tiga siklus berlangsung. Sudut geser dalam puncak pada keadaan asal sebesar 46° berkurangan hingga menjadi 36° setelah masa tiga siklus terjadi, atau 78.3%. Manakala sudut geser dalam residual pada masa asal adalah 45° dan berkurangan hingga menjadi 33° setelah terjadi masa tiga siklus atau 73.3% (Pineda *et al.*, 2014b). Magnitud perubahan kohesi residual diperolehi dari graf hubungan tegangan geser dan regangan melalui uji geser langsung dengan tegangan normal efektif yang berbeda.



Gambar 5.28 Perubahan sudut geser dalam clay shale Semarang-Bawen akibat siklus pembasahan dan pengeringan, dengan masa pembasahan setiap 4 hari dengan masa 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.

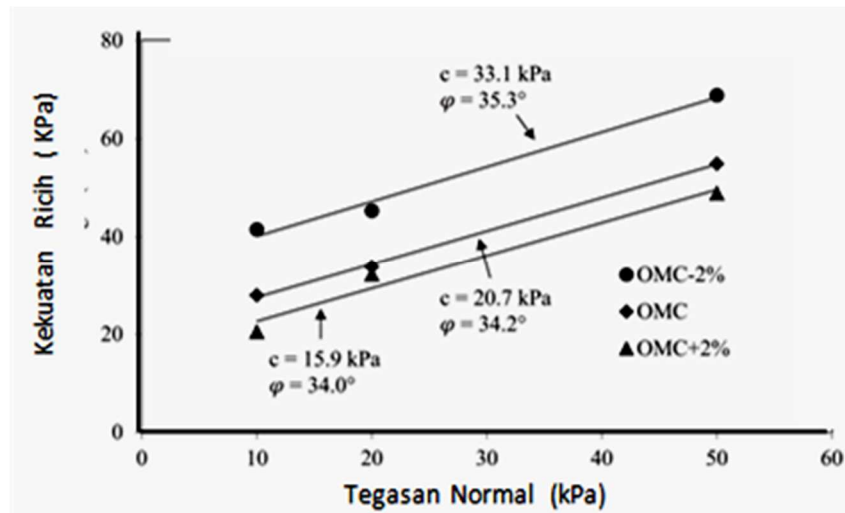
Pada penelitian lain banyak yang memperhatikan kasussedutan pada lempung tak jenuh, sehingga jika tegangan sedutan diperhitungkan maka parameter kekuatan geser yang dihasilkan akan lebih besar bila dibandingkan dengan mengabaikan tegangan sedutan. Penelitian mengenai kasussedutan pada lempung tak jenuh 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/m² hingga 110,650 kN/m². 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 ϕ_i adalah 43°, sudut geser dalam pada keadaan '*fully softened*' bernilai 21° dan keadaan tegangan residual adalah 9° (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 (ϕ) sebesar 34.2°. Pada keadaan OMC-2 %, kohesi (c) bertambah menjadi 33.1 kPa manakala sudut geser dalam (ϕ) menjadi 35.3°. Pada keadaan OMC+2 % kohesi (c) berkurang menjadi 15.9 kPa manakala sudut geser dalam (ϕ) berkurang menjadi 34° (Hatami *et al.*, 2016). Hubungan graf Coulomb dari penelitian tersebut seperti pada Gambar 5.30. Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai falidasi hasil penelitian dari kasussiklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser dapat dilihat pada Tabel 5.10.



Gambar 5.29 Variasi kekuatan geser terhadap tegangan normal akibat penambahan dan pengurangan kadar air lebih kurang 2% dari OMC (Hatami *et al.*, 2016)

Tabel 5.10 : Ringkasan dari penelitian terdahulu sebagai validasi hasil penelitian dari kasussiklus 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>Pada batuan lempung jenuh Lilla</p> <p>a. $\phi = 46^\circ$ pada masa asal menurun hingga menjadi 36° setelah masa tiga siklus terjadi, atau selebihnya tinggal 78.3%.</p> <p>b. $\phi_r = 45^\circ$ pada masa asal menurun hingga menjadi 33° setelah terjadi masa tiga siklus atau selebihnya tinggal 73.3%.</p> <p>Pada campuran pasir dan kaolinte tanah tak jenuh (SK-17).</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>Kasuspembasahan dan pengeringan, pemanasan dan penyejukan dan siklus pembekuan dan pencairan sebanyak 50 siklus.</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>Pada clay shale Bearpaw Kanada yang disusun asal</p> <p>Sudut geser dalam pada keadaan intact (ϕ_i) sebesar 43°, sudut geser dalam pada keadaan '<i>fully softened</i>' sebesar (ϕ) 21° dan keadaan tegangan residual (ϕ_r) adalah 9°.</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 (ϕ) adalah 34.2°.</p> <p>b. Pada keadaan OMC kurang 2%, kohesi (c) bertambah menjadi 33.1 kPa, sudut geser dalam (ϕ) menjadi 35.3°.</p> <p>c. Pada keadaan OMC lebih 2% kohesi (c) berkurang menjadi 15.9 kPa, sudut geser dalam (ϕ_u) berkurang menjadi 34°.</p>

Tabel 5.11 : 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	Masa Terjadi
		Keadaan asal (kN/m ²)	(%) Dari asal	WD 24 hari (kN/m ²)	(%)		
Tegangan Total	c (kN/m ²)	700	100.0	150	21.4 %	$c = 640.31e^{-0.063 WD}$	0 ~24 hari
	ϕ (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 ²)	285	40.7	85	12.1 %	$c_{rp} = 292.90e^{-0.049 WD}$	0 ~24 hari
	ϕ_{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_{rf} (kNm ²)	25.7	3.8	6	0.9 %	$c_{rf} = 28.739e^{-0.052 WD}$	0 ~24 hari
	ϕ_{rf} (drajat)	23.5	39.6	9.3	15.7 %	$\phi_{rf} = -0.5528 WD + 21.656$	0 ~ 24 hari

BAB 6

HUBUNGAN PARAMETER DAN ANALISIS BALIK PADA KASUS KERUNTUHAN LERENG DI TALAN TOLL SEMARANG – BAWEN STA 19+250

6.1 Pendahuluan

Hubungan parameter kekuatan geser di antara kekuatan geser residual dengan kekuatan geser puncak dibahas pada bab ini. Pembahasan antara kohesi residual terhadap kohesi puncak serta sudut geser dalam residual terhadap sudut geser puncak memberikan maklumat ratio antara kedua parameternya. Hubungan ini dibahas pada sampel clay shale tak jenuh dan jenuh. Keduanya dibahas pada kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan. Dari pembahasan ini diperoleh besarnya kekuatan geser residual adalah lebih kecil berbanding kekuatan geser puncaknya.

Pada bab ini juga dibahas hubungan di antara ratio disintegritas (D_R) akibat proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan terhadap perubahan kekuatan geser sampel clay shale tak jenuh. Perubahan ratio disintegritas (D_R) tersebut dibahas terhadap pengurangan kohesi puncak (c) serta kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) dan dengan pelepasan tegangan (c_{rf}). Perubahan ratio (D_R) akibat proses pengeringan dan siklus pembasahan pengeringan dibahas terhadap penurunan sudut geser dalam puncak (ϕ) serta sudut geser dalam residual tanpa

pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) dan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}).

Pada penelitian ini juga dibahas kasus keruntuhan lereng yang terjadi pada Jalan Toll Semarang-Bawen di STA 19+250. Sejarah terjadinya keruntuhan dibentangkan untuk mengetahui punca terjadinya keruntuhan tersebut. Pada lapangan tersebut, penelitian uji kekuatan geser residual di laboratorium ditetapkan sama dengan yang terjadi di lapangan ketika terjadi keruntuhan lereng.

Untuk penelitian selanjutnya, penentuan stratigrafi lapisan lapangan lereng diperoleh dari penelitian lapangan terdahulu. Penelitian terdahulu pada lapangan berupa penyelidikan tanah dan analisis topografi telah dirujuk sehingga keratan rentas lereng diperoleh dengan pasti. Hasil uji lubang jara dari beberapa titik uji penggerudian teras digunakan untuk mengetahui keadaan stratigrafi lapisan pada lereng dengan perbedaan ketebalan. Pada gambar keratan rentas bentuk gelongsoran yang terjadi akan dibentangkan. Bentuk gelongsoran yang terjadi amat penting dibuat mengikut keadaan di lapangan, agar parameter kekuatan geser residual diperoleh dengan betul.

Untuk memperoleh kekuatan geser residual asal yang terjadi pada bidang keruntuhan, maka dilakukan analisis balik pengiraan faktor keamanan. Dengan menetapkan faktor keamanan = 1.00, kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang terjadi pada bidang keruntuhan semasa runtuh akan diperoleh. Sepuluh kombinasi kohesi residual dan sudut geser dalam residual ditetapkan melalui dua metode pengiraan. Pertama dengan metode unsur terhingga (FEM) dengan bantuan program Plaxis V.7, keduanya dengan menggunakan metode kesetimbangan batas (LEM) dengan menggunakan metode irisan. Ini dilakukan dengan membuat graf antara kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang menyebabkan terjadi faktor keamanan lereng adalah 1.00. Pada graf tersebut terdapat hasil penelitian dari sepuluh kohesi residual dan sudut geser dalam residual dari metode unsur terhingga dan kesetimbangan batas bagi tujuan perbandingan.

Penelitian ini dilakukan pada kasus keruntuhan lereng STA 19+250 Jalan Toll Semarang-Bawen Jawa Tengah. Pada penelitian lereng yang telah runtuh, maka kekuatan geser yang terjadi pada kasus tersebut adalah kekuatan geser residual. Oleh karenanya hasil kekuatan geser residual yang terjadi di laboratorium menjadi sangat penting dalam penelitian ini. Semua parameter kekuatan geser residual clay shale Semarang-Bawen dimasukkan ke dalam graf yang sudah diperoleh antara kohesi residual dan sudut geser dalam residual yang menyebabkan faktor keamanan =1.00. Parameter itu adalah semua kekuatan geser residual yang diperoleh akibat proses pengeringan hingga tempoh 80 hari untuk sampel tak jenuh dan jenuh serta proses siklus pembasahan dan pengeringan hingga tempoh 24 hari. Dengan memasukkan seluruh parameter kekuatan geser residual clay shale Semarang-Bawen, maka dapat disimpulkan pada keadaan sampel dan metode pengujian kekuatan geser residual diperoleh dari laboratorium sesuai dengan kekuatan geser residual yang menyebabkan keruntuhan terjadi. Perkara ini akan bermanfaat dalam disain perbaikan lereng pada clay shale di masa depan.

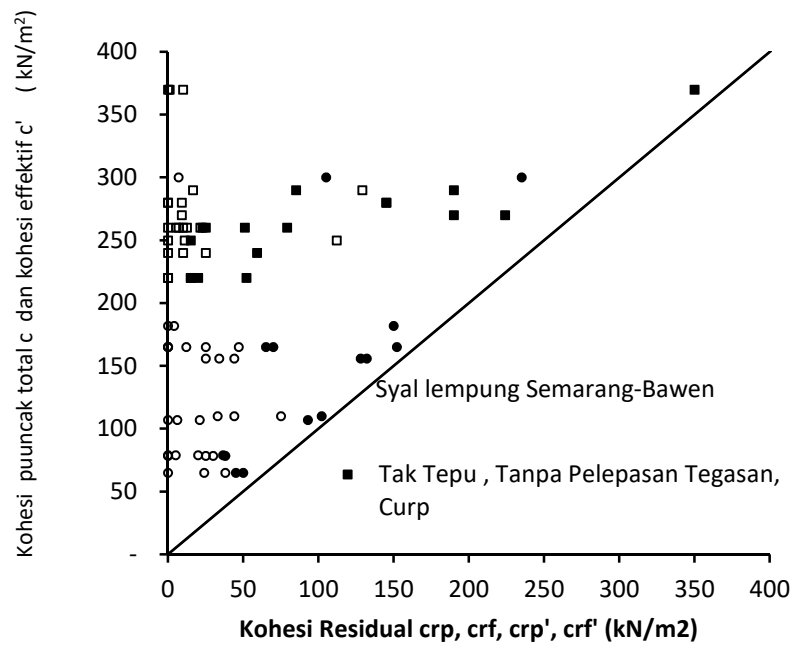
6.2 Hubungan Parameter Kekuatan Geser Residual Terhadap Kekuatan Geser Puncak

Pada kebiasaan laporan teknikal penelitian penyelidikan tanah secara umumnya hanya dilakukan uji kekuatan geser pada keadaan tegangan puncak saja. Sedangkan uji kekuatan geser residual pula hanya dilakukan pada penelitian khusus dan tidak termasuk di dalam laporan teknikal penyelidikan tanah pada umumnya. Kekuatan geser residual clay shale sangat diperlukan pada kasus dengan anjakan yang besar (*large displacement*) seperti pada lereng yang runtuh berterusan (*continous landslide*) yang terjadi pada lereng runtuh yang telah terjadi dimasa lalu. Kekuatan geser residual jangkalu lebih kecil daripada kekuatan geser puncaknya, sehingga adalah penting untuk mengetahui berapa perbedaan kekuatan geser residual terhadap kekuatan puncaknya.

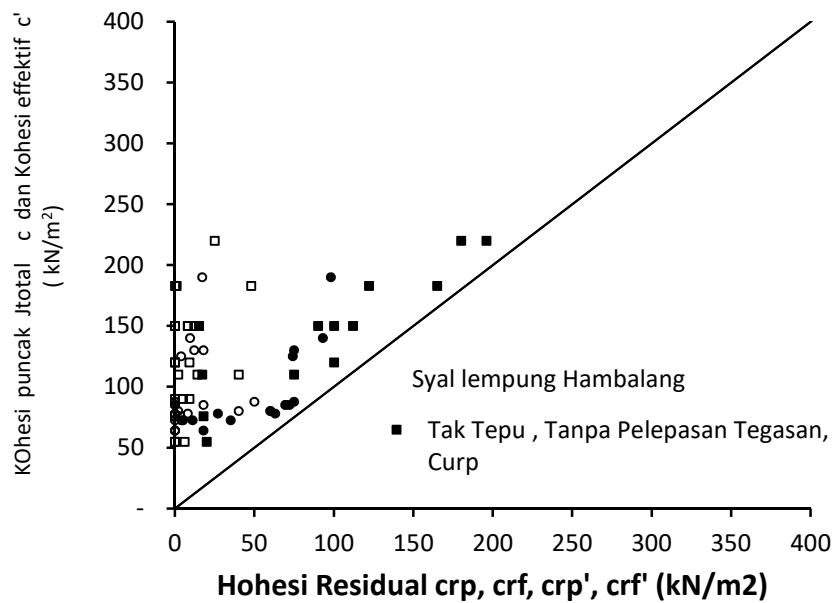
Daripada uji kekuatan geser clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, rentang peratusan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) terhadap kohesi pada

tegangan puncak (c) adalah di antara 2% hingga 43%, manakala rentang peratusan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) terhadap kohesi pada tegangan puncak tak tersalir (c) adalah di antara 0% hingga 5%. Sementara itu pada uji kekuatan geser clay shale jenuh Semarang-Bawen, rentang peratusan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) terhadap kohesi pada tegangan puncak efektif (c') adalah di antara 12% hingga 78%, manakala rentang peratusan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') terhadap kohesi pada tegangan puncak efektif (c') adalah di antara 0% hingga 25%.

Pada uji kekuatan geser clay shale tak jenuh Hambalang, rentang peratusan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) terhadap kohesi pada tegangan puncak (c) adalah di antara 4% hingga 67%, manakala rentang peratusan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) terhadap kohesi pada tegangan puncak (c) adalah di antara 0% hingga 36%. Sedangkan pada uji kekuatan geser clay shale jenuh Hambalang, rentang peratusan kohesi residual efektif tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}') terhadap kohesi pada tegangan puncak efektif (c') adalah di antara 3% hingga 39%, manakala rentang peratusan kohesi residual efektif dengan pelepasan tegangan (c_{rf}') terhadap kohesi pada tegangan puncak efektif (c') adalah di antara 0% hingga 26%. Hasil hubungan kohesi residual terhadap kohesi puncak clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 6.1, manakala hubungan kohesi residual terhadap kohesi puncak clay shale Hambalang pada Gambar 6.2.



Gambar 6.1 Hubungan kohesi residual terhadap kohesi jumlah dan efektif clay shale Semarang-Bawen

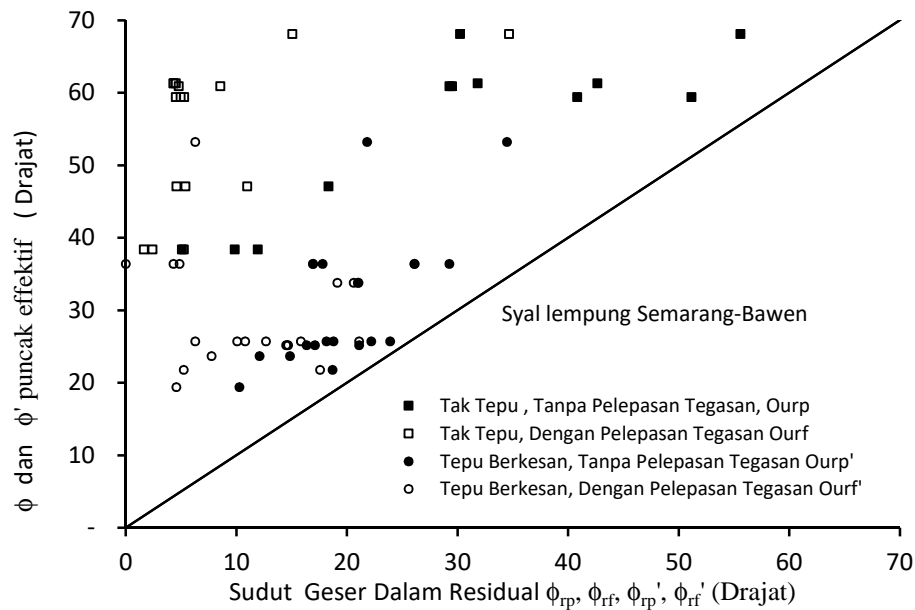


Gambar 6.2 Hubungan kohesi residual terhadap kohesi jumlah dan efektif clay shale Hambalang

Dari uji kekuatan geser clay shale tak jenuh Semarang-Bawen, rentang peratusan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah di antara 9% hingga 86%, manakala

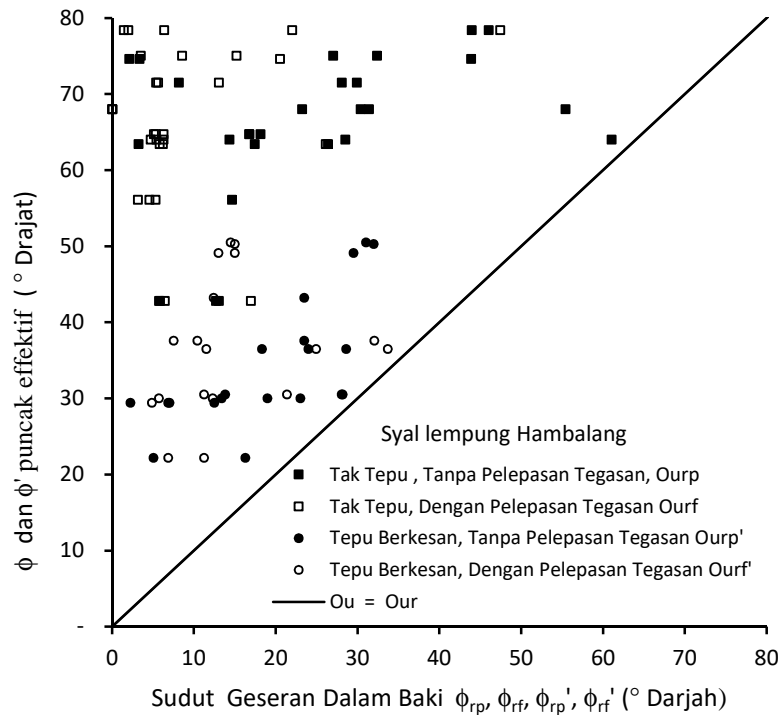
rentang peratusan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak berkabus (ϕ) adalah di antara 3% hingga 58%. Bagi uji kekuatan geser clay shale jenuh Semarang-Bawen, rentang peratusan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak efektif (ϕ') adalah di antara 19% hingga 65%, manakala rentang peratusan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak efektif (ϕ') adalah di antara 9% hingga 49%.

Pada uji kekuatan geser clay shale tak jenuh Hambalang, rentang peratusan sudut geser dalam residual tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}) terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah di antara 4% hingga 78%, manakala rentang peratusan sudut geser dalam residual dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}) terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah di antara 2% hingga 33%. Manakala pada uji kekuatan geser clay shale jenuh Hambalang, rentang peratusan sudut geser dalam residual efektif tanpa pelepasan tegangan (ϕ_{rp}') terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah di antara 4% hingga 62%. Sementara rentang peratusan sudut geser dalam residual efektif dengan pelepasan tegangan (ϕ_{rf}') terhadap sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah di antara 10% hingga 43%. Hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam puncak clay shale Semarang-Bawen dapat dilihat pada Gambar 6.3. Manakala hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam puncak clay shale Hambalang pada Gambar 6.4. Seluruh rentang peratusan tersebut berdasarkan Gambar 6.1, 6.2, 6.3, dan 6.4 yang diperolehi dari data tabel Lampiran B.



Gambar 6.3 Hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam puncak total dan efektif clay shale Semarang-Bawen

Pada clay shale Semarang-Bawen dan clay shale Hambalang, perbedaan kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) adalah lebih kecil bila dibandingkan kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}). Perkara ini terjadi pada clay shale tak jenuh ataupun jenuh serta pada tegangan jumlah atau tegangan efektif. Selama pelepasan tegangan terjadi penyusunan asal butiran-butiran clay shale dan joint sehingga mengakibatkan berkurangnya kekasaran pada bidang keruntuhan. Kekasaran pada bidang keruntuhan ini sangat mempengaruhi kekuatan geser yang terjadi. Semakin kecil terjadi kekasaran pada bidang geser, maka semakin kecil pula kekuatan geser yang terjadi (Jade dan Sitharam, 2003; Ladanyi dan Archambault, 1970; Moon dan Cumelevasiwamy, 2008; Nam *et al.*, 2006; Goodman, 1989)



Gambar 6.4 Hubungan sudut geser dalam residual terhadap sudut geser dalam jumlah dan efektif clay shale Hambalang

Daripada hasil penelitian rentang kohesi residual dengan pelepasan tegangan (c_{rf}) terhadap kohesi puncak (c) jangkalu lebih kecil daripada rentang kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) dan besar rentang bermula dengan sifar. Ini bermakna bahwa kohesi residual clay shale adalah sama dengan penelitian terdahulu dan jangkalu memperolehi sifar (Gartung , 1986; Mandar dan Robert, 2005; Timothy dan Duncan, 1991; Timothy *et al.*, 2005a; Timothy dan Hisyam, 1994). Kohesi residual clay shale bersamaan sifar akan terjadi hanya pada tegangan residual dengan pelepasan tegangan. Pada kohesi residual tanpa pelepasan tegangan (c_{rp}) rentang peratusan kohesi terhadap kohesi puncak tidak memperolehi bersamaan sifar tidak. Ini terjadi karena kasuskekasaran bidang keruntuhan dan faktor joint pada sampel, masih terjadi tindakan tegangan geser pada bidang keruntuhan, dan mengakibatkan terjadinya kohesi.

Penelitian terdahulu bagi mengetahui magnitud kekuatan geser residual batuan lempung telah dilakukan melalui uji kotak geser pada uji tak tersalir. Kohesi pada tegangan puncak adalah $39,407 \text{ kN/m}^2$ akan menjadi 0 kN/m^2 pada keadaan tegangan residual. Manakala sudut geser dalam pada tegangan puncak (ϕ) adalah 39°

pada tegangan residual menjadi $(\phi_r) = 15^\circ$ atau $\phi_r = 0.385\phi$ (Timothy dan Duncan, 1991). Sedangkan pada jenis clay shale formasi Keuper pada tegangan puncak kohesi $c = 82$ kPa dan sudut geser dalam puncak $\phi = 41^\circ$. Pada masa terjadi tegangan residual, kohesi residual $c_r = 0$ kPa dan sudut geser dalam residual $\phi_r = 9^\circ$ atau $\phi_r = 0.22\phi$ (Gartung, 1986).

Penelitian kekuatan geser residual terhadap 32 jenis clay shale yang berbeda dengan rentang batas cecair (LL) di antara 24% hingga 288% serta rentang indeks keplastikan (PI) di antara 16% hingga 44% telah dilakukan melalui uji cincin geser tersalir. Pada pecahan lempung lebih kecil daripada 20% dengan rentang batas cecair (LL) di antara 24% hingga 70%, diperoleh rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) di antara 19° hingga 31° . Manakala pada rentang pecahan lempung di antara 20% hingga 45% dengan rentang batas cecair (LL) di antara 40% hingga 130%, diperoleh rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) di antara 9° hingga 24° . Apabila pecahan lempung lebih besar dari 50% dengan rentang batas cecair (LL) di antara 45% hingga 228%, diperoleh rentang sudut geser dalam residual antara 5° hingga 18° (Timothy dan Hisyam, 1994). Dari penelitian ini diringkaskan bahwa sudut geser residual sangat dipengaruhi oleh pecahan lempung serta batas cecair (LL) clay shale. Semakin besar pecahan lempung maka semakin besar batas cecair (LL) dan mengakibatkan semakin kecil sudut geser dalam residual yang diperoleh. Ini telah dilakukan terhadap 24 jenis clay shale, dengan rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) di antara 5° hingga 32° (Mesri dan Diaz, 1986). Manakala pada analisis balik kestabilan lereng, sudut geser dalam puncak asal (ϕ) adalah 45° pada keadaan tegangan residual rentang sudut geser dalam residual di antara 9° hingga 13° , dan kohesi residual = 0 (Timothy *et al.*, 2005a).

Penelitian terdahulu yang lain dilakukan pada 7 lokasi batuan lempung yang berbeda pada lokasi Front Range Colorado. Penentuan kekuatan geser residual dilakukan dengan uji pembalikan cincin langsung serta uji geser cincin (Mandar dan Robert, 2005). Pada lokasi 1 rentang batas cecair (LL) di antara 65% hingga 82% dan rentang indeks keplastikan (PI) di antara 40% hingga 56%. Peningkatan tegangan normal efektif akan mengakibatkan meningkatnya tegangan geser residual dan berkurangnya sudut geser dalam residual. Tegangan normal efektif adalah 70 kPa dan

rentang kohesi residual c_r di antara 22 hingga 26.8 kPa. Manakala rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) di antara 16.5° hingga 21.9° . Pada lokasi 2 rentang batas cecair (LL) antara 48 - 80% dan rentang indeks keplastikan (PI) antara 39% hingga 55%. Tegangan normal efektif adalah 143.6 kPa dan rentang kohesi residual c_r antara 19.2 kPa hingga 31.6 kPa. Manakala rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) antara 7.6° - 16.4° (Mandar dan Robert, 2005).

Pada lokasi 3, rentang batas cecair (LL) antara 37% hingga 66% dan rentang indeks keplastikan (PI) di antara 20% hingga 44%. Tegangan normal efektif adalah 574.6 kPa dan rentang kohesi residual c_r di antara 46.9 kPa hingga 195.4 kPa. Manakala rentang sudut geser dalam residual (ϕ_r) di antara 5° hingga 18.8° . Sedangkan pada lokasi 4 batas cecair (LL) adalah 54% dan indeks keplastikan (PI) 33%, tegangan normal efektif adalah 67 kPa, dan kohesi residual c_r adalah 16.2 kPa serta sudut geser dalam residual ϕ_r adalah 14.4° . Di lokasi 5 batas cecair (LL) adalah 49% dan indeks keplastikan (PI) adalah 28%, tegangan normal efektif adalah 79 kPa dan kohesi residual c_r adalah 36.3 kPa serta sudut geser dalam residual ϕ_r adalah 25.3° (Mandar dan Robert, 2005).

Pada lokasi 6, rentang batas cecair di antara 44% hingga 62% dan rentang indeks keplastikan di antara 17% hingga 38%, tegangan normal efektif adalah 26.8 kPa, dan rentang kohesi residual di antara 6.2kPa hingga 10.5 kPa, manakala rentang sudut geser dalam residual di antara 11.6° hingga 16.8° . Di lokasi 7, batas cecair (LL) sebesar 64% dengan indeks keplastikan (PI) adalah 40% dan tegangan normal efektif adalah 26.8 ka, kohesi residual c_r adalah 6.5 kPa serta sudut geser dalam residual ϕ_r adalah 13.2° (Mandar dan Robert, 2005).

Berdasarkan daripada analisis dan pembahasan di atas, maka ringkasan dari hubungan parameter kekuatan geser residual terhadap kekuatan geser puncak dapat dilihat pada Tabel 6.1. Himpunan dari tabel-tabel berikut merupakan falidasi dengan membandingkan antara penelitian terdahulu dengan hasil penelitian ini.

Tabel 6.1 : Hubungan parameter kekuatan geser residual terhadap kekuatan geser puncak

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>a. Semakin kecil terjadi kekasaran pada bidang geser, maka semakin kecil pula kekuatan geser yang terjadi (Jade S, 2003; Ladanyi B, 1970; Moon S. Nam, 2008; Nam <i>et al.</i>, 2006; Goodman, 1989).</p> <p>b. Kohesi residual biasanya sifar atau ($c_r = 0$ c) (Gartung , 1986; Mandar dan Robert, 2005; Timothy dan Duncan, 1991; Timothy <i>et al.</i>, 2005a; Timothy dan Hisyam, 1994).</p> <p>c. $\phi_r = 0.385 \phi$ (Timothy dan Duncan, 1991) dan $\phi_r = 0.2 - 0.28\phi$ (Timothy <i>et al.</i>, 2005a).</p> <p>d. $\phi_r = 0.22 \phi$ (Gartung , 1986).</p> <p>e. Hubungan di antara batas cecair (LL) dengan ϕ_r dari 32 clay shale dari lokasi berbeda. Rentang LL = 24 - 70%, maka $\phi_r = 19 - 31^\circ$ Rentang LL = 40 - 130%, maka $\phi_r = 9 - 24^\circ$ Rentang LL = 45 - 288%, maka $\phi_r = 5 - 18^\circ$ (Timothy dan Hisyam, 1994).</p> <p>f. Hubungan batas cecair (LL) terhadap c_r dan ϕ_r dari 7 lokasi berbeda (Mandar dan Robert, 2005). Lokasi 1. Rentang LL = 62 - 82%, $\sigma_n' = 70$ kPa $c_r = 22 - 27,8$ kPa, $\phi_r = 16.5^\circ - 21.9^\circ$</p> <p>Lokasi 2. Rentang LL = 48 - 80%, $\sigma_n' = 143.6$ kPa $c_r = 22 - 27,8$ kPa, $\phi_r = 16.5^\circ - 21.9^\circ$</p> <p>Lokasi 3. Rentang LL = 62 - 82%, $\sigma_n' = 67$ kPa $c_r = 46.9 - 195$ kPa, $\phi_r = 5^\circ - 18.8^\circ$</p> <p>Lokasi 4. LL = 44 %, $\sigma_n' = 67$ kPa $c_r = 16.2$ kPa dan $\phi_r = 14.4^\circ$</p> <p>Lokasi 5. LL = 49 %, $\sigma_n' = 79$ kPa $c_r = 36.3$ kPa dan $\phi_r = 25.3^\circ$</p>	<p>Hubungan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan terhadap kekuatan geser puncak clay shale Semarang-Bawen.</p> <p>Clay shale tak jenuh :</p> <p>a. $c_{rp} = (2 - 43)\% c$; $\phi_{rp} = (9 - 86)\% \phi$</p> <p>b. $c_{rf} = (0 - 5)\% c$; $\phi_{rf} = (3 - 58)\% \phi$</p> <p>Clay shale jenuh (tegangan efektif) :</p> <p>d. $c_{rp}' = (12 - 78)\% c'$; $\phi_{rp}' = (19 - 65)\% \phi'$</p> <p>e. $c_{rf}' = (0 - 25)\% c'$; $\phi_{rf}' = (9 - 49)\% \phi'$</p> <p>Hubungan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan terhadap kekuatan geser puncak clay shale Hambalang.</p> <p>Clay shale tak jenuh :</p> <p>f. $c_{rp} = (4 - 67)\% c$; $\phi_{rp} = (4 - 78)\% \phi$</p> <p>g. $c_{rf} = (0 - 36)\% c$; $\phi_{rf} = (2 - 33)\% \phi$</p> <p>Clay shale jenuh (tegangan efektif) :</p> <p>h. $c_{rp}' = (3 - 39)\% c'$; $\phi_{rp}' = (4 - 62)\% \phi'$</p> <p>i. $c_{rf}' = (0 - 26)\% c'$; $\phi_{rf}' = (10 - 43)\% \phi'$</p>

Lokasi 6. Rentang LL = 42 - 62 %, $\sigma_n' = 26.8$ kPa $c_r = 6.2 - 10.5$ kPa, $\phi_r =$ $11.6^\circ - 16.8^\circ$ Lokasi 7. LL = 64 %, $\sigma_n' = 28.8$ kPa $c_r = 6.5$ kPa dan $\phi_r = 13.2^\circ$	
---	--

6.3 Penelitian Keruntuhan Pada Kasus Lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250

Untuk menentukan bagaimana parameter kekuatan geser residual clay shale dari uji triaksial diperoleh hasilnya harus sama dengan kekuatan geser residual pada masa keruntuhan terjadi. Keruntuhan yang telah terjadi pada lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 pada 29 Jun 2013 dijadikan penelitian kasus untuk menentukan ketepatan hasil penelitian. Stratigrafi lapisan tanah pada lereng yang terjadi keruntuhan dengan parameter tanah yang digunakan mempengaruhi hasil penelitian ini. Bentuk keruntuhan yang terjadi pada seksi gambar lereng harus sesuai dengan keruntuhan yang sebenarnya terjadi pada lapangan.

Kekuatan geser residual yang terjadi pada masa keruntuhan diperoleh melalui analisis balik yang dilakukan dengan metode unsur hingga dan metode kesetimbangan batas. Kekuatan geser residual terjadi pada bidang keruntuhan yang merupakan perantaraan antara sesama clay shale dan juga antara clay shale dengan lapisan Breksia Tuf. Rentang kekuatan geser residual yang terjadi dari kedua metode ditunjukkan dalam Gambar 6.22 yang menjadikan faktor keamanan lereng = 1.00. Dalam gambar tersebut terdapat hasil penelitian kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan dari laboratorium.

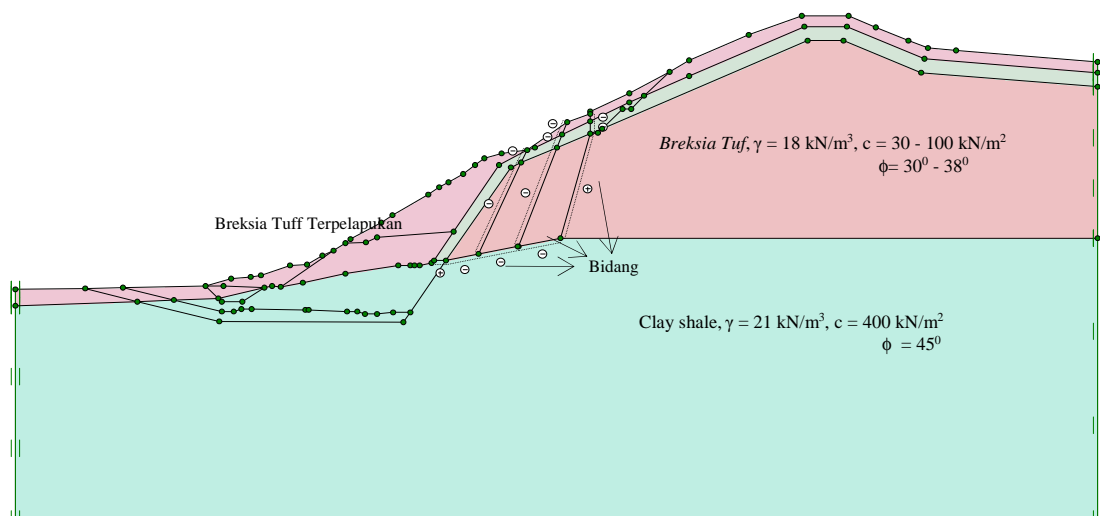
6.3.1 Stratigrafi Lapisan Tanah Pada Lereng Penelitian

Lapisan tanah pada kasus keruntuhan lereng penelitian untuk Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 diperoleh dari uji pengeboran yang dilakukan

sebelum dan sesudah terjadi keruntuhan. Dari uji pengeboran sebelum terjadi keruntuhan, tidak diperoleh sebarang maklumat terdapatnya lapisan clay shale pada lereng. Manakala uji pengeboran yang dilakukan setelah terjadi keruntuhan, didapati bahwa terdapat lapisan clay shale. Perkara ini terjadi karena terdapat perbedaan titik uji pengeboran masa sebelum dan sesudah terjadi keruntuhan.

Ketinggian lereng adalah 71 m dan mempunyai stratigrafi lapisan tanah permukaan Breksia Tuf yang terpelapukan berupa lanau berlempung dan lanau berpasir berwarna coklat dengan tahap kekerasan sederhana hingga keras. Di bawah lapisan tersebut terdapat lapisan Breksia Tuf yang tebal, diikuti dengan lapisan clay shale yang tebal sehingga di bawah dasar lereng.

Bentuk stratigrafi lapisan pada lereng penelitian pada Jalan Tol Semarang-Bawen pada STA 19+250 dapat dilihat pada Gambar 6.5. Pada gambar tersebut juga diperoleh bidang keruntuhan yang terjadi. Bidang keruntuhan terjadi pada lapisan Breksia Tuf, antara Breksia Tuf dan clay shale serta pada clay shale. Berai isi (γ) lapisan Breksia Tuf adalah 18 kN/m^3 , manakala berai isi (γ) clay shale adalah 21 kN/m^3 . Kohesi (c) lapisan Breksia Tuf adalah 100 kN/m^2 , manakala pada keadaan pelapukan adalah 30 kN/m^2 . Manakala sudut geser dalam (ϕ) antara pelapukan dan asal dengan rentang 30° hingga 38° . Kohesi (c) clay shale adalah 400 kN/m^2 dengan sudut geser dalam (ϕ) adalah 45° .



Gambar 6.5 Stratigrafi lapisan lereng pada STA 19+250 Jalan Tol Semarang-Bawen

6.3.2 Analisis Balik Untuk Penentuan Kekuatan Geser Residual Pada Keruntuhan Lereng

Untuk memperoleh kekuatan geser pada masa terjadinya keruntuhan, maka uji analisis balik dengan metode unsur terhingga serta metode kesetimbangan batas dilakukan. Kekuatan geser yang diperoleh dari analisis balik tersebut merupakan kekuatan geser residual yang terjadi pada bidang keruntuhan. Kekuatan geser residual tersebut bukan merupakan satu nilai kohesi residual dan satu nilai sudut geser dalam residual saja, namun merupakan beberapa variasi sepadanan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r), di mana setiap variasi kasusepadanan kekuatan geser residual mengakibatkan faktor keamanan = 1.00.

6.3.2.1 Analisis Balik Menggunakan Program Plaxis V-7

Analisis balik dengan metode unsur terhingga akan menggunakan program Plaxis V.7. Dalam program ini kekuatan geser residual pada bidang keruntuhan ditentukan dengan menggunakan ratio perantaraan R. Ratio perantaraan R ini adalah ratio kekuatan geser pada perantaraan (bidang keruntuhan) terhadap kekuatan geser puncak yang telah ditetapkan semula. Melalui analisis balik, ratio perantaraan R dan kekuatan geser puncak ditetapkan terlebih dahulu supaya beberapa padanan kekuatan geser residual yaitu kohesi residual dan sudut geser dalam residual untuk faktor keamanan = 1.00.

Dalam kasus berikut ditetapkan terlebih dahulu ratio perantaraan R bernilai = 0.225. Kemudian kekuatan geser residual clay shale (c_r dan ϕ_{ur}) diperoleh dengan menetapkan kekuatan geser puncak lapisan Breksia Tuf (c dan ϕ) sehingga mendapat faktor keamanan = 1.00. Kejelekian residual clay shale pada bidang keruntuhan di antara Breksia Tuf dan clay shale adalah 22.5% dari kohesi puncak Breksia Tuf. Pada kasus padanan pertama, c Breksia Tuf ditetapkan 130 kN/m². Kohesi residual dan sudut geser dalam residual clay shale diperkirakan seperti berikut,

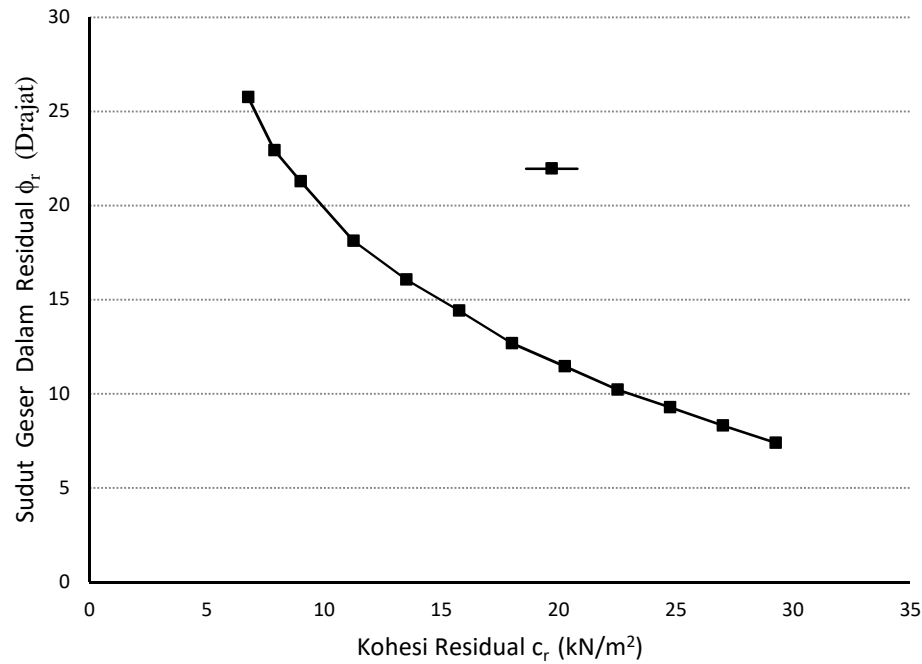
$$c_r = R_{\text{inter}} \times c \quad (6.2)$$

dan

$$\phi_r = \tan^{-1} (R_{\text{inter}} \times \tan \phi) \quad (6.3)$$

di mana c = kohesi puncak Breksia Tuf, ϕ = sudut geser dalam puncak Breksia Tuf, c_r = kohesi residual clay shale (FK = 1.00) dan ϕ_r = sudut geser dalam residual clay shale (FK = 1.00)

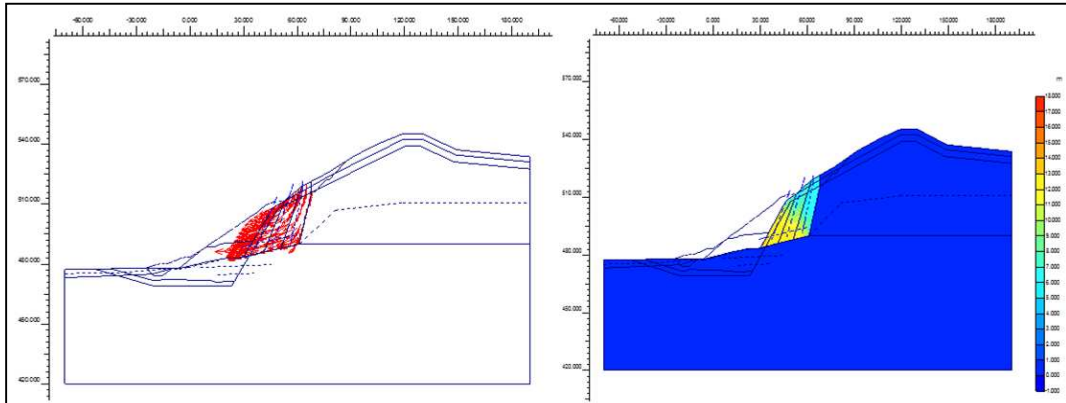
Melalui metode unsur terhingga menggunakan program Plaxis V.7 telah diperoleh 12 pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang terjadi pada bidang keruntuhan yang menyebabkan faktor keamanan = 1.00. Hasil hasil penelitian kohesi residual (c_r) terjadi pada rentang di antara 6.75 kN/m² hingga 29.25 kN/m² dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) pada rentang di antara 6.4° hingga 25.8°. Kohesi residual c_r yang diperoleh adalah 6.75 kN/m² dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) bernilai 25.8°. Jika kohesi residual diambil lebih besar dari 6.75 kN/m², maka sudut geser dalam residual yang diperoleh mesti lebih kecil dari 25.8°. Ini supaya faktor keamanan lereng tetap adalah 1.00. Hasil pasangan kohesi residual clay shale dan sudut geser dalam residual shale dengan faktor keamanan lereng adalah 1.00 dapat dilihat pada Tabel 6.3. Manakala hubungan di antara kohesi residual dengan sudut geser dalam residual sehingga menyebabkan faktor keamanan adalah 1.00 pada kasus keruntuhan lereng dengan program Plaxis V.7 dapat dilihat pada Gambar 6.16. Sementara bentuk sesaran jumlah dan distribusi tegangan dari hasil program Plaxis V.7 pada kasus keruntuhan lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 29+250 dapat dilihat pada Gambar. 6.17. Bentuk sesaran jumlah yang diperoleh dengan metode unsur terhingga sangat signifikan seperti keruntuhan yang ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 6.6 Variasi daripada koheksi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang terjadi pada bidang keruntuhan antara clay shale dengan Breksia Tuf yang menyebabkan faktor keamanan $SF=1.00$ dengan program Plaxis V.7

Tabel 6.3 : Hasil analisis balik menggunakan program Plaxis V.7

Bil	Breksia Tuf								R inter	Faktor keamanan (SF) menghampiri 1.00	Kekuatan Geser Residual Clay shale	
	γ_d	γ_{sat}	c	ϕ	E	μ	k_x	k_y			c_r	ϕ_r
	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²	Drajat	kN/m ²		m/hr	m/hr			kN/m ²	Drajat
1	17	18	130	30	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0032	29.25	6.4
2	17	18	120	33	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0061	27	8.3
3	17	18	110	36	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0053	24.75	9.3
4	17	18	100	38.7	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0013	22.5	10.2
5	17	18	90	42	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0045	20.25	11.5
6	17	18	80	45	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0037	18	12.7
7	17	18	70	48.8	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0055	15.75	14.4
8	17	18	60	52	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0073	13.5	16.1
9	17	18	50	55.5	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0069	11.25	18.1
10	17	18	40	60	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0074	9	21.3
11	17	18	35	62	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0021	6.875	22.9
12	17	18	30	65	150000	0.25	0.01	0.01	0.225	1.0069	6.75	25.8



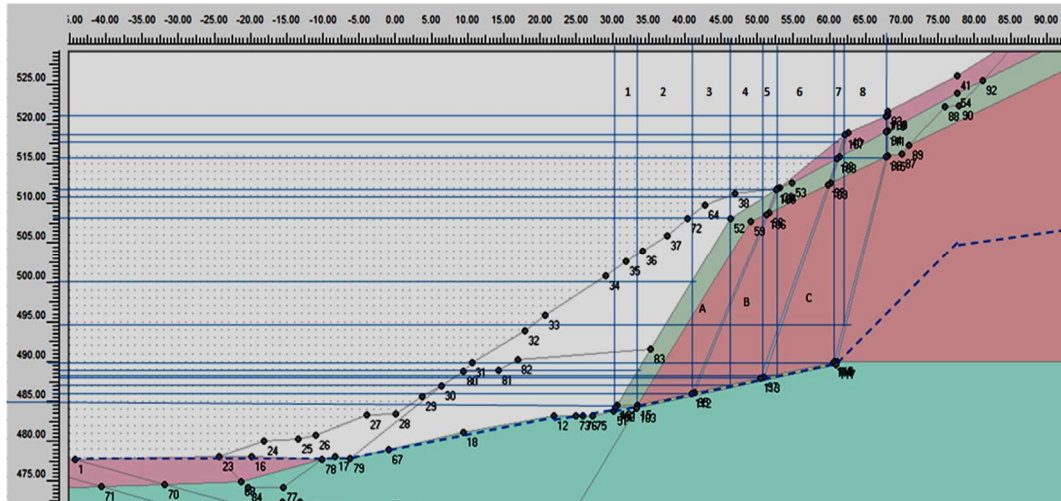
Gambar 6.7 Deformasi total dan distribusi tegangan pada kasus keruntuhan lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 menggunakan program Plaxis V.7

6.3.2.2 Analisis Balik Dengan Metode Irisan (*Slice Methods*)

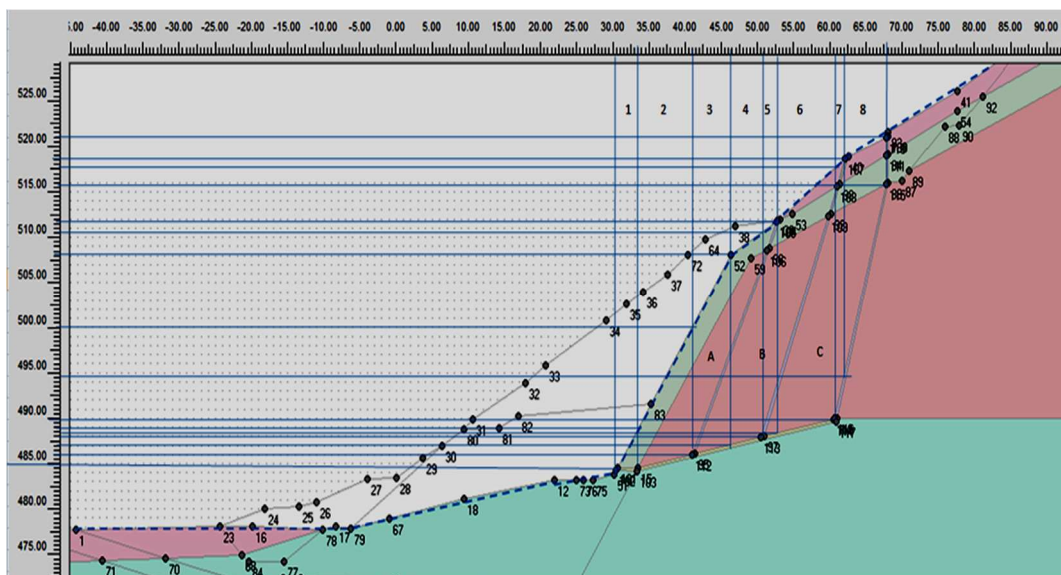
Pada penentuan faktor keamanan lereng dengan menggunakan metode irisan, bentuk bidang kegaruntuhan perlu ditetapkan semula. Penetapan bidang keruntuhan sama dengan keadaan yang sebenarnya dan seperti pada metode unsur terhingga. Setelah penetapan bidang keruntuhan, maka blok tanah yang runtuh dibuat beberapa irisan. Setiap irisan ditetapkan berat tanah efektif serta panjang bidang gelongsor pada setiap irisan tersebut. Pada metode irisan, kekuatan geser yang diperkirakan terjadi pada bidang keruntuhan di dalam penentuan faktor keamanan lereng adalah 1.00. Dan kekuatan geser yang terjadi adalah merupakan kekuatan geser residual berupa kohesian residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r).

Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap faktor keamanan ialah keadaan permukaan air pada lereng. Pada kasus ini, penentuan kekuatan geser residual dengan metode irisan dibuat pada dua keadaan, yaitu pada keadaan muka air tanah tertinggi (HWL) dan pada keadaan muka air tanah terendah (LWL). Gambar lereng untuk analisis balik dengan metode irisan dapat dilihat pada Gambar 6.8 muka air tanah terendah (LWL) dan Gambar 6.9 pada muka air tanah tertinggi (HWL). Jumlah irisan dibuat sebanyak 8 irisan, dan ditentukan 12 pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang semuanya menjadikan faktor keamanan lereng adalah

1.00. Tabel 6.4 merupakan salah satu kasus dalam pengiraan pada faktor keamanan adalah 1.00 dan diperolehi kohesi residual c_r sebesar 50 kN/m^2 dan sudut geser dalam residual $\phi_r = 8.57^\circ$.



Gambar 6.8 Metode irisan pada lereng dengan keruntuhan blok dengan muka air tanah terendah (LWL)



Gambar 6.9 Metode irisan pada lereng dengan keruntuhan blok dengan muka air tanah tertinggi (HWL)

Tabel 6.4 : Kasus analisis balik kestabilan lereng dengan cara metode irisan

Variation 1 ABC

Irisan Bil.	Luas Irisan m ²	Berat Irisan kN	α (°)	C_r Kn/m ²	ϕ_r (°)	Li m	c. Li kN/m	W cos α tan ϕ kN/m	W sin α kN/m	Faktor Keamanan
1	6.435	115.83	0.0	50	8.57	3.3	165	16.45561	0	
2	68.53	1233.54	10.4	50	8.57	6.829554	391.4777	182.8188	223.4711	
3	91.955	1655.19	10.4	50	8.57	5.389174	269.4587	245.3101	299.8582	
4	98.775	1776.95	10.4	50	8.57	4.575713	228.7857	263.504	322.0977	
5	43.89	790.02	10.4	50	8.57	1.931968	96.5984	117.0862	143.1219	
6	185.6	3340.8	10.4	50	8.57	8.134602	406.7301	495.1287	605.2274	
7	30.485	548.73	66.4	29	6.5	3.246633	94.15235	28.92664	502.8199	
8	85.26	1534.68	66.4	29	6.5	14.48498	420.0643	80.9016	1406.279	
							2072.267	1431.132	3502.876	1.00

Hasil penelitian pada lereng dengan muka air tanahterendah (LWL) melalui metode irisan memperoleh sebanyak 12 variasi pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam (ϕ_r) dengan rentang di antara 4 kN/m² hingga 50 kN/m² dan sudut geser dalam dengan rentang di antara 8.57° hingga 16.4°. Pasangan kekuatan geser residual yang memberikan faktor keamanan = 1.00 terjadi pada kohesi residual minimum (c_r) bernilai 4 kN/m² dengan sudut geser dalam maksimum (ϕ_r) adalah 16.4°. Manakala pada kohesi maksimum terjadi adalah 50 kN/m², maka sudut geser dalam minimum adalah 8.6°. Pada hasil penelitian pada lereng dengan muka air tanah tertinggi (HWL) melalui metode irisan sebanyak 12 variasi pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam (ϕ_r) diperoleh masing-masing di antara 6 - 25 kN/m² dan di antara 9° hingga 15.6°. Pasangan kekuatan geser residual yang memberikan faktor keamanan adalah 1.00 terjadi pada kohesi residual minimum (c_r) adalah 6 kN/m² dengan sudut geser dalam maksimum (ϕ_r) adalah 15.6°. Apabila kohesi maksimum yang terjadi adalah 25 kN/m², maka sudut geser dalam minimum adalah 9°. Hasil dari dua belas pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) dengan metode irisan akibat muka air tanahterendah (LWL) dapat dilihat pada Tabel 6.5, manakala untuk akibat muka air tanahtertinggi (HWL) dapat dilihat pada Tabel 7.6.

Tabel 6.5 : Hasil analisis balik dengan metode irisan dalam menentukan variasi kekuatan geser perantaraan antara Breksia Tuf dan clay shale pada muka air tanahterendah (LWL)

Bilangan Variasi	Kekuatan Geser Perantaraan antara Breksia Tuf- Breksia Tuf		Kekuatan Geser Perantaraan Breksia Tuf - Clay shale		Faktor Keamanan
	c (kN/m ²)	ϕ°	c _r (kN/m ²)	ϕ_r°	
1	29	6.5	50	8.57	1.00
2			46	9.36	
3			42	10.15	
4			38	10.95	
5			34	11.72	
6			30	12.50	
7			26	13.27	
8			22	14.05	
9			18	14.81	
10			12	15.95	
11			8	16.70	
12			4	16.43	

Tabel 7.6 : Hasil analisis balik dengan metode irisan dalam menentukan variasi kekuatan geser perantaraan antara Breksia Tuf dan clay shale pada muka air tertinggi (HWL)

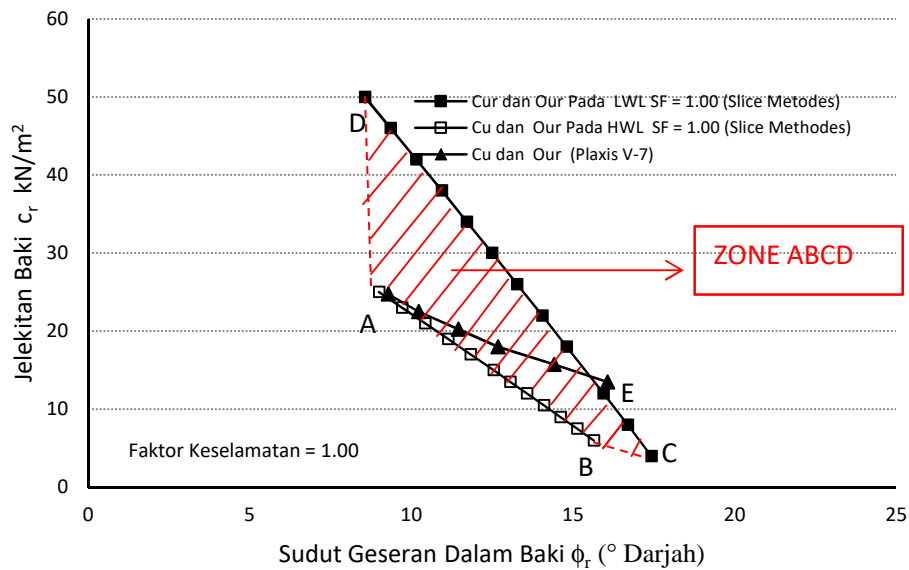
Variasi Iterasi	Kekuatan Geser Perantaraan antara Breksia Tuf- Breksia Tuf		Kekuatan Geser Perantaraan Breksia Tuf - Clay shale		Faktor Keamanan
	c (kN/m ²)	ϕ°	c _r (kN/m ²)	ϕ°	
1	20	5	25	9	1.00
2			23	9.72	
3			21	10.43	
4			19	11.14	
5			17	11.18	
6			15	12.55	
7			13.5	13.06	
8			12	13.58	
9			10.5	14.10	
10			9	14.62	
11			6.5	15.13	
12			6	15,65	

6.3.2.3 Perbedaan Analisis Balik Antara Metode Irisan Dengan Plaxis V.7

Pasangan kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang diperoleh dari metode kesetimbangan batas dan metode unsur terhingga pada faktor keamanan = 1.00 dapat dilihat pada Gambar 6.20. Garis AB merupakan kekuatan geser residual dengan metode kesetimbangan batas pada muka air tanah tertinggi, sedangkan garis CD merupakan kekuatan geser residual dengan metode batas kasusimbangan pada muka air tanah terendah. Garis AE merupakan kekuatan geser residual metode unsur terhingga. Variasi kohesi residual dan sudut geser dalam residual dengan menggunakan metode batas kasusimbangan menghasilkan satu garis linear, di mana pada permukaan air tanah terendah kekuatan geser residual lebih besar bila dibandingkan dengan muka air tanah tertinggi. Manakala akibat metode unsur hingga dengan program Plaxis V-7 diperoleh garis AE yang tidak linear diperolehi ini berbeda dengan metode batas kasusimbangan yang bentuk garis linear. Perbedaan ini karena pada metode kesetimbangan batas hanya ada satu pembolehubah untuk memperolehi pasangan kekuatan geser residual yaitu kekuatan geser residual clay shale pada bidang keruntuhan saja agar faktor keamanan adalah 1.00. Manakala pada metode unsur terhingga menggunakan program Plaxis V.7 pembolehubah ada dua, yaitu kekuatan geser puncak tanah Breksia Tuf yang bervariasi dan ratio perantaraan R untuk memperolehi beberapa kekuatan geser residual clay shale dengan faktor keamanan =1.00.

Hasil penelitian yang signifikan pada bagian ini adalah pada Gambar 6.20 diperolehnya zon ABCD. Zon ABCD tersebut merupakan zon di mana terjadi pasangan kekuatan geser residual berupa kohesi residual (c_r) dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) yang menyebabkan faktor keamanan lereng menjadi 1.00. Seluruh hasil penelitian kekuatan geser triaksial di laboratorium pada keadaan tegangan residual pada clay shale Semarang-Bawen akibat proses pelapukan akan dimasukkan ke dalam gambar tersebut. Semua kekuatan geser residual clay shale tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan yang diperoleh pada clay shale tak jenuh ataupun jenuh, serta pada tegangan jumlah ataupun tegangan efektif. Dengan cara ini nilai kekuatan geser residual clay shale di laboratorium yang tepat akan diperolehi pada ketika keruntuhan lereng terjadi. Jangkanjutnya hasil penelitian ini dapat

memberikan parameter sebenar untuk digunakan dalam disain binaan geoteknik yang berdepan dengan masalah clay shale.



Gambar 6.10 Perbedaan variasi kohesi residual dan sudut geser dalam antara metode irisan dan metode unsur terhingga untuk faktor keamanan = 1.00

Beberapa penelitian terdahulu telah menentukan kohesi residual pada tanah lempung pada umumnya adalah sifar. Ini karena pada keadaan tegangan residual, sampel tanah lempung benar-benar telah runtuh sepenuhnya, di mana bidang keruntuhan telah membentuk bagian yang memisahkan tanah lempung tersebut (Duncan dan Timothy, 1992b; Gartung, 2009; Liew *et al.*, 2003; Mesri dan Huvaj, 2012; Timothy dan Hisyam, 1992). Namun ada juga para peneliti yang menetapkan kohesi residual c_r lebih besar dari sifar. Perkara ini karena pada bidang yang terjadi keruntuhan, bidang tersebut tidak memisahkan keduanya dengan sempurna dan masih terdapat bagian yang melekat. Dengan demikian maka dari uji kekuatan geser di laboratorium pun masih terdapat kohesi residual dan tidak sifar (Binod *et al.*, 2005; Himawan, 2013; Irsyam *et al.*, 2007; Irsyam *et al.*, 2011; Liew *et al.*, 2003; Singh, 2012; Watry dan Lade, 2000; Yang *et al.*, 2009).

Binod *et al.* (2005) telah melakukan analisis balik daripada enam kasus keruntuhan di Okimi, Yosio, Mukohidehara, Engyoji, Iwagami dan Tsuboyama di Jepun untuk mengetahui kekuatan geser residual yang terjadi. Bila dengan metode pertama dengan menganggap kohesi residual c_r sifar dan faktor keamanan adalah

1.00, sedangkan dengan metode kedua dengan c_r lebih besar dari sifar dengan faktor keamanan 0.98. Hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.6 (Binod *et al.*, 2005).

Pada 24 kasus lereng semula jadi formasi Orinda America bila digunakan kohesi rata-rata sebesar 1.97 kN/m^2 dan sudut geser dalam 25° maka faktor keamanan rata-rata yang diperoleh ialah 1.06 dan faktor keamanan maksimum adalah 1.39. Manakala pada 10 kasus lereng yang dipotong kohesi rata-rata adalah 0.49 kN/m^2 dan sudut geser dalam 35° maka faktor keamanan rata-rata diperoleh 1.01 dan faktor keamanan maksimum adalah 1.30. Sedangkan pada lima kasus lereng yang ditimbun kohesi rata-rata adalah 1.97 kN/m^2 dan sudut geser dalam 30° maka faktor keamanan rata-rata diperoleh 1.02 dengan faktor keamanan maksimum adalah 1.14 (Duncan dan Timothy, 1992a).

Kasus keruntuhan pada lereng lapisan clay shale dengan pelapukan yang tinggi terjadi pada Jalan Tol Jakarta-Bandung Cipularang di KM 97+500 pada tahun 2006. Dalam kasus tersebut analisis balik kestabilan lereng dilakukan dan diperoleh kohesi residual c_r adalah 5 kN/m^2 dan sudut geser dalam residual ϕ_r sebesar 13° (LAPI ITB, 2006). Sementara kasus keruntuhan lainnya pada lereng dengan clay shale yang terpelapukan di jalan yang sama terjadi di KM 92+800 pada tahun 2009. Pada kasus ini diperoleh kohesi residual clay shale sebesar 10 kN/m^2 dan sudut geser dalam residual ϕ_r adalah 12° (LAPI ITB, 2009b). Di jalan yang sama masih terdapat pula keruntuhan lainnya yang terjadi pada KM 96+600 B. Dengan cara analisis balik diperoleh kohesi residual c_r adalah 5 kN/m^2 dan sudut geser dalam ϕ_r bernilai 12° . Sementara keruntuhan yang terjadi pada KM 92+400 B diperoleh kohesi residual c_r adalah 10 kN/m^2 dan sudut geser dalam residual ϕ_r adalah 5° (LAPI ITB, 2009a).

Keruntuhan lereng yang terjadi pada bagian jangkatan semenanjung Malaysia diperbaiki dengan menggunakan cerucuk lobang jara berdiameter 1,200 mm dan 1,500 mm telah menggunakan metode *contiguous bored pile* (CBP). Dalam analisis perbaikan lereng tersebut sebelumnya telah dilakukan analisis balik untuk menentukan parameter kekuatan geser residual. Penentuan pemakaian parameter kekuatan geser residual yang tepat akan menjadikan analisis CBP lebih sempurna. Analisis balik dihitung melalui dua keadaan. Pertama pada keadaan lereng asal

potongan pada bagian bawah lereng dilakukan dan tidak terjadi keruntuhan, dan keadaan kedua semasa terjadi keruntuhan. Dengan menggunakan program PC Stabil yang faktor keamanan adalah 1.00, pada keadaan pertama diperoleh c_r adalah sifar dan ϕ_r adalah 24° dan pada keadaan kedua diperoleh c_r adalah sifar dan ϕ_r adalah 14.4° . Sedangkan bila menggunakan program Plaxis pada keadaan pertama diperoleh c_r adalah 0.5 kPa dan ϕ_r adalah 25.9° dengan faktor keamanan adalah 1.04 dan pada keadaan kedua diperoleh $c_r = 0.5$ kPa dan ϕ_r adalah 15° dengan faktor keamanan adalah 1.03 (Liew *et al.*, 2003).

Keruntuhan pada lereng terjadi juga pada longgokan bentonite di Plos Verdes semenanjung California. Kekuatan geser residual yang terjadi pada masa keruntuhan ditentukan dengan metode analisis balik, di mana diperoleh dua keadaan. Pada faktor keamanan = 1.00, c_r diperoleh adalah 6.18 kPa dan sudut geser dalamnya $\phi_r = 6.7^\circ$. Pada faktor keamanan berkurang menjadi 0.98, maka diperoleh $c_r = 0$ dan sudut geser dalam residual $\phi_r = 7^\circ$ (Watry dan Lade, 2000).

Analisis balik pada suatu keruntuhan yang terjadi di Forest City, South Dakota Africa Jangkatan, telah dikaji dengan analisis dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D). Analisis tersebut dilakukan dengan metode kesetimbangan batas serta dengan metode unsur terhingga. Pada metode batas kasusimbangan dilakukan pula dengan tiga metode, yaitu Morgensten Price, Spencer dan Bishop's Simplified. Dari analisis 2D melalui metode kesetimbangan batas diperoleh sudut geser dalam residual masing-masing adalah ϕ_r adalah 6.2° dengan metode Morgensten Price, ϕ_r adalah 6.6° dengan metode Spencer dan ϕ_r adalah 6.4° dengan metode Bishop's Simplified. Manakala dengan analisis 3D melalui metode kesetimbangan batas diperoleh sudut geser dalam residual ϕ_r masing-masing ϕ_r adalah 4° dengan metode Morgensten Price, ϕ_r adalah 4.7° dengan metode Spencer dan ϕ_r adalah 5.7° dengan metode Bishop's Simplified. Sedangkan bila dengan metode unsur terhingga sudut geser dalam residual ϕ_r diperoleh dengan rentang di antara 6.6° hingga 6.8° (Alekhya, 2013).

Penelitian yang terdahulu daripada peneliti lain melalui analisis balik dilakukan penetapan kohesi residual asal pada tanah residual Gneissic. Ini untuk

menentukan berapakah nilai sudut geser dalam residual yang terjadi dengan nilai faktor keamanan yang mendekati angka 1.00. Jika ditentukan kohesi residual asal yang lebih besar, maka akan diperoleh sudut geser dalam residual yang lebih kecil (Coutinho *et al.*, 1999). Hasil variasi kekuatan geser residual yang diperoleh dalam penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.7.

Tabel 6.7 : Ringkasan hasil analisis balik (Coutinho *et al.*, 1999)

Sudut geser dalam residual ϕ_r (drajat)							
28.5		29.0		29.5		30.5	
c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK
5	1.019	3	1.007	1	1.003	1	1.024
7	1.046	5	1.039	3	1.024	3	1.044
----	----	----	----	5	1.053	5	1.073

6.3.3 Hasil Penelitian Kekuatan Geser Residual di Laboratorium Dalam Penentuan Parameter Skestabilan Lereng

Batas kekuatan geser residual yang terjadi pada kasus keruntuhan lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 telah diperoleh melalui analisis balik dengan metode kesetimbangan batas dan metode unsur terhingga. Hasil penelitian nilai kohesi residual dan sudut geser dalam residual seperti pada Gambar 6.10 adalah berupa dalam bentuk zon ABCD. Untuk menentukan hasil metode penelitian kekuatan geser residual di laboratorium yang tepat dalam penentuan keruntuhan lereng, maka semua hasil kekuatan geser residual di laboratorium dimasukkan dalam gambar tersebut. Kekuatan geser yang dimasukkan ke dalam Gambar 6.10 adalah kekuatan geser residual pada clay shale mula-mula dan clay shale yang berpelapukan akibat proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan.

Pada Gambar 6.11 dan 6.12 (Gambar 6.11 yang diperbesar) semua hasil penelitian kekuatan geser residual dari laboratorium clay shale Semarang-Bawen telah dimasukkan. Terdapat banyak hasil kekuatan geser residual yang hasilnya tidak berada di dalam zon ABCD. Nilai kekuatan geser residual yang seperti ini adalah metode dan hasil yang tidak berpengaruh dalam hal keruntuhan yang terjadi.

Pengaruh pelapukan akibat proses pengeringan pada clay shale Semarang-Bawen terhadap terjadinya keruntuhan pada lereng mula terjadi setelah tempoh pengeringan 32 hari. Manakala pengaruh pelapukan akibat proses siklus pembasahan dan pengeringan dengan pembasahan setiap 4 hari terhadap terjadinya keruntuhan pada lereng, mulai terjadi setelah hari ke 8.

Dalam kasus keruntuhan ini, metode uji triaksial clay shale Semarang-Bawen di laboratorium menghasilkan sembilan pasangan kekuatan geser residual yang hasilnya berada pada zon ABCD tersebut. Hasil ke sembilan kekuatan geser di laboratorium adalah berupa kekuatan geser tanpa pelepasan tegangan dan kekuatan geser dengan pelepasan tegangan. Sampel clay shale boleh dalam keadaan tak jenuh ataupun jenuh, dengan proses dan masa pengeringan yang berbeda. Metode uji kekuatan geser di laboratorium dengan hasil yang sama dengan kekuatan geser pada masa keruntuhan lereng dapat dilihat pada Tabel 6.8.

Tabel 6.8 : Metode uji kekuatan geser residual di laboratorium yang sama dengan kekuatan geser pada masa keruntuhan lereng

Tempoh Pelapukan n (Hari)	Proses Pelapukan		Sampel Triaksial	Kekuatan Geser Residual	
	DP	WD		Tanpa Pelepasan Tegangan	Dengan Pelepasan Tegangan
80	✓		Tak Jenuh	✓	---
80	✓		Jenuh	✓	---
80	✓		Jenuh	✓(efektif)	---
48	✓		Tak Jenuh	---	✓
48	✓		Jenuh	---	✓ (efektif)
40	✓		Jenuh	---	✓
32	✓		Tak Jenuh	---	✓
8		✓	Tak Jenuh	---	✓
16		✓	Tak Jenuh	---	✓

DP adalah pengeringan, WD adalah pembasahan dan pengeringan

Dari uji triaksial dengan tahap berbilang untuk memperolehi kekuatan geser residual clay shale Semarang-Bawen akibat kaspengeringan hingga masa 80 hari dan siklus pembasahan dan pengeringan hingga tempoh 24 hari, diperolehi 72 data kekuatan geser residual. Dari 72 data kekuatan geser residual tersebut hanya 9 data

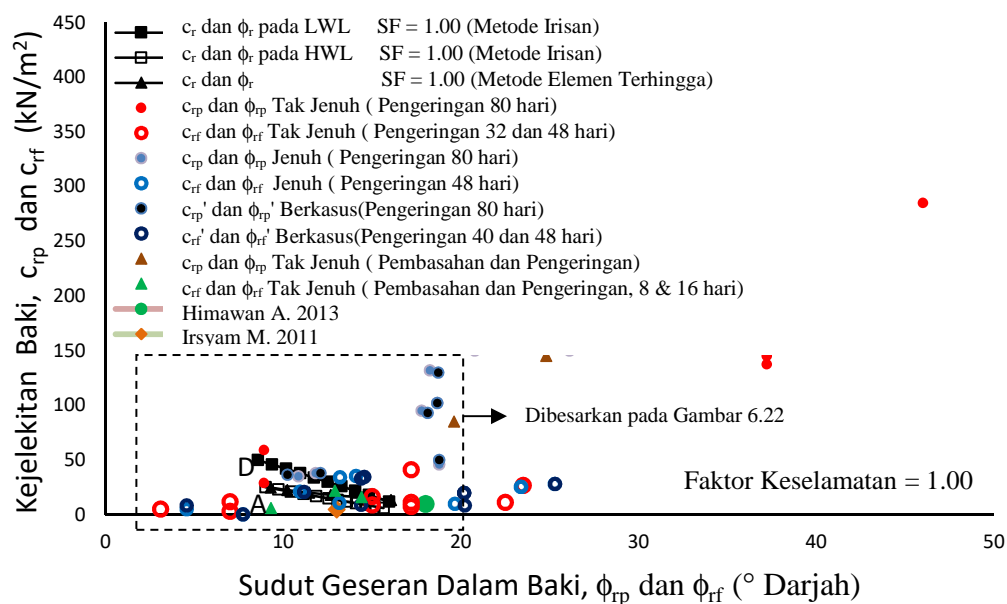
kekuatan geser residual berada di dalam zon ABCD, 8 data kekuatan geser residual berada dibawah zon ABCD dan 54 data kekuatan geser residual berada di atas zon ABCD. Data kekuatan geser residual yang berada di bawah zon ABCD bermakna bahwa kekuatan geser residual yang diperoleh tersebut kecil, dan hal ini disebabkan oleh karena data clay shale pada tersebut lebih terpelapukan dibandingkan dengan keadaan yang sebenar terjadi pada masa gelongsor. Data-data kekuatan geser residual yang berada di atas zon ABCD bermakna bahwa kekuatan geser residual yang diperolehi adalah lebih besar bila dibandingkan kekuatan geser residual yang sebenar terjadi pada masa gelongsoran.

Pada Gambar 6.11 dilihat bahwa terdapat 9 data kekuatan geser residual clay shale akibat kasusproses pengeringan yang terletak di dalam zon ABCD atau sebanyak 12.5% dari semua data kuat geser residual. Dari 9 data kekuatan geser residual tersebut 5 data di antaranya diperolehi dengan pelepasan tegangan (c_{rf} dan ϕ_{rf}) dan 4 data tanpa pelepasan tegangan. Manakala untuk memperoleh kekuatan geser residual clay shale Semarang-Bawen akibat kasus siklus pembasahan dan pengeringan dalam masa 16 hari, 2 data kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan diperolehi. Metode pelapukan dengan proses siklus pembasahan dan pengeringan dengan tempoh 8 hingga 16 hari, adalah lebih efektif dari segi masa pelaksanaan uji di laboratorium, karena apabila dengan proses pengeringan, diperlukan masa pengeringan dalam tempoh rentang 38 hari hingga 80 hari.

Penelitian terdahulu terhadap 16 kasus keruntuhan lereng yang terjadi pada lokasi dan masa yang berbeda, penelitian melalui analisis balik yang dibandingkan dengan uji kekuatan geser di laboratorium. Kekuatan geser di laboratorium dilakukan dengan uji pembalikan geser terus dan uji dengan geser cincin. Pada kasus ini semua kohesi residual dari uji laboratorium memperoleh c_r adalah sifar dan sudut geser residual (ϕ_r) dari laboratorium diperoleh dengan rentang di antara 7° hingga 21° . Manakala dari analisis balik daripada 16 kasus tersebut diperoleh sudut geser dalam pada rentang di antara 6.5° hingga 21° (Mesri dan Huvaj, 2012).

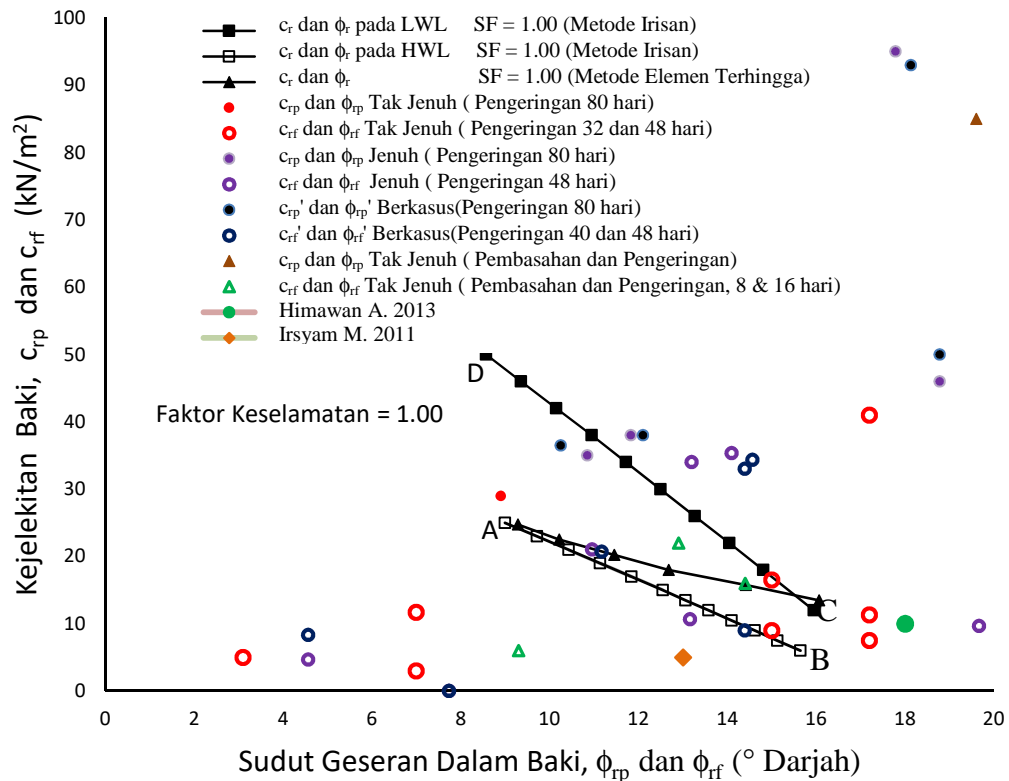
Penelitian terdahulu terhadap keruntuhan yang terjadi pada lereng di Jalan Tol Cipularang Jawa-Barat Indonesia pada tahun 2007, analisis balik telah dilakukan

untuk mengetahui kekuatan geser residual yang terjadi pada lapisan clay shale yang terpelapukan. Melalui program plaxis V-7 diperoleh kohesi residual c_r adalah 13 kN/m² dan sudut geser dalam ϕ_r adalah 5° (Irsyam *et al.*, 2007). Sementara penelitian terdahulu mendapati keruntuhan pada Jalan Tol Semarang-Bawen di STA 19+250 terjadi pada lereng yang lapisan tanah pada dasar lereng berupa clay shale. Analisis balik dilakukan pada lereng yang dipotong untuk mengetahui kekuatan geser residual. Kohesi residual yang diperoleh ialah sebanyak 18 kN/m² dan sudut geser dalam residual diperoleh adalah 12° (Himawan , 2013).



Gambar 6.11 Hasil penelitian seluruh kekuatan geser residual di laboratorium terhadap kekuatan geser dari analisis balik keruntuhan lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250

Pada Gambar 6.12, kekuatan geser residual dari laboratorium yang tepat dengan kekuatan geser residual dari analisis balik diperoleh dari kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan pada 80 hari masa pengeringan serta dari kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan pada 32, 40, 48 dan 80 hari pengeringan. Berdasarkan kepada analisis dan pembahasan di atas, maka ringkasan dari analisis balik untuk penentuan parameter kekuatan geser residual di laboratorium pada kasus keruntuhan lereng yang terjadi di sisi Jalan Tol Semarang-Bawen STA 29+250 dapat dilihat pada Tabel 6.9. Rangkuman pada tabel tersebut merupakan validasi yang membandingkan antara penelitian terdahulu dengan hasil penelitian ini.



Gambar 6.12 Hasil penelitian sebagian kekuatan geser residual di laboratorium yang sesuai dengan kekuatan geser dari analisis balik keruntuhan lereng Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250

Tabel 6.9 : Analisis balik untuk penentuan parameter kekuatan geser residual di laboratorium pada kasus keruntuhan lereng yang terjadi di sisi Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian
<p>a. Beberapa penelitian terdahulu para peneliti dalam menentukan kohesi residual pada tanah lempung pada umumnya menetapkan $c_r = 0$. (Duncan dan Timothy, 1992b; Gartung, 2009; Liew <i>et al.</i>, 2003; Mesri dan Huvaj, 2012; Timothy dan Hisyam, 1992)</p>	<p>a. Untuk memperoleh hubungan kekuatan geser yang diperlehi dari analisis balik dan uji triaksial tahap berbilang di laboratorium, maka diambil suatu kasus keruntuhan lereng Jalan Tol Semarang-Bawen pada STA 19+250.</p> <p>Dari analisis balik diperoleh rentang kekuatan geser residual yang terjadi pada keruntuhan sebagai berikut</p>

Bersambung

Penelitian Terdahulu	Hasil Penelitian																																						
<p>b. Ramai juga para peneliti yang menetapkan kohesi residual $c_r \neq 0$. (Binod <i>et al.</i>, 2005; Himawan, 2013; Irsyam <i>et al.</i>, 2007; Irsyam <i>et al.</i>, 2011; Liew <i>et al.</i>, 2003; Singh, 2012; Watry dan Lade, 2000; Yang <i>et al.</i>, 2009)</p> <p>c. Penelitian pada kasus 6 keruntuhan yang terjadi di Okimi, Yosio, Mukohidehara, Engyoji, Iwagami dan Tsuboyama di Jepang. metode pertama menganggap $c_r = 0$ kPa dan faktor keamanan = 1.00, dan metode penelitian kedua dengan $c_r > 0$ kPa dengan faktor keamanan = 0.98 (Binod <i>et al.</i>, 2005).</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Landslide</th> <th>Method 1</th> <th colspan="2">Method 2</th> <th rowspan="2">With average measured strengths (FS)</th> </tr> <tr> <th>$c' = 0$ FS=1.0 ϕ'_{res} (degrees)</th> <th>$c' = z_{avg}$ FS=0.98 ϕ'_{res} (degrees)</th> <th>c' (kPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Okimi</td> <td>12.7</td> <td>9.1</td> <td>13</td> <td>1.016</td> </tr> <tr> <td>Yosio</td> <td>14.3</td> <td>9.7</td> <td>5.8</td> <td>1.098</td> </tr> <tr> <td>Mukohidehara</td> <td>19.7</td> <td>15.4</td> <td>11</td> <td>0.987</td> </tr> <tr> <td>Engyoji</td> <td>16.2</td> <td>11.2</td> <td>8</td> <td>0.772</td> </tr> <tr> <td>Iwagami</td> <td>15.1</td> <td>10.4</td> <td>9.6</td> <td>1.038</td> </tr> <tr> <td>Tsuboyama</td> <td>11</td> <td>6.3</td> <td>7</td> <td>1.057</td> </tr> </tbody> </table> <p>d. Pada Plos Verdes semenanjung California (deposit bentonite), pada faktor keamanan = 1.00, c_r diperoleh adalah 6.18 kPa dan sudut geser dalamnya $\phi_r = 6.7^\circ$. Manakala faktor keamanan berkurang sedikit menjadi 0.98, maka diperoleh $c_r = 0$ dan $\phi_r = 7^\circ$ (Watry dan Lade, 2000).</p> <p>e. Pada keruntuhan crun yang terjadi di Forest City, South Dakota Africa Jangkatan. Dari analisis 2D diperoleh, $c_r = 0$. $\phi_r = 6.2^\circ$ dengan metode Morgensten Price, $\phi_r = 6.6^\circ$ dengan metode Spencer dan $\phi_r = 6.4^\circ$ dengan metode Bishop's Simplified</p>	Landslide	Method 1	Method 2		With average measured strengths (FS)	$c' = 0$ FS=1.0 ϕ'_{res} (degrees)	$c' = z_{avg}$ FS=0.98 ϕ'_{res} (degrees)	c' (kPa)	Okimi	12.7	9.1	13	1.016	Yosio	14.3	9.7	5.8	1.098	Mukohidehara	19.7	15.4	11	0.987	Engyoji	16.2	11.2	8	0.772	Iwagami	15.1	10.4	9.6	1.038	Tsuboyama	11	6.3	7	1.057	<p>Metode unsur terhingga menggunakan Plaxis V-7</p> <p>b. Sejumlah 12 pasangan kekuatan geser residual bermula pada kohesi maksimum $c_r = 29.3$ kN/m² dengan sudut geser dalam minimum $\phi_r = 6.4^\circ$ (titik A) dan seterusnya sehingga diperoleh kohesi minimum $c_r = 6.7$ kN/m² dengan ϕ_r maksimum sebesar 25.8° (titik E).</p> <p>Metode kesetimbangan batas dengan cara irisan.</p> <p>c. Pada keadaan muka air tanah tertinggi (HWL), sejumlah 12 pasangan kekuatan geser residual bermula pada kohesi minimum $c_r = 6$ kN/m² dengan sudut geser dalam maksimum $\phi_r = 15.7^\circ$ (titik A) dan seterusnya sehingga diperoleh kohesi maksimum $c_r = 25$ kN/m² dengan ϕ_{ur} minimum sebesar 9° (titik B).</p> <p>d. Pada keadaan muka air tanah terendah (LWL), sejumlah 12 pasangan kekuatan geser residual bermula pada kohesi minimum $c_r = 4$ kN/m² dengan sudut geser dalam maksimum $\phi_r = 16.43$ (titik D) dan seterusnya sehingga diperoleh kohesi maksimum $c_r = 50$ kN/m² dengan ϕ_r minimum sebesar 6.4° (titik C).</p> <p>e. Zon ABCD adalah adalah suatu zon di dalam graf hubungan di antara c_r dan ϕ_r yang terjadi dan menyebabkan faktor keamanan lereng = 1.00 yang diperoleh dengan metode kesetimbangan batas. Manakala garis AE yang diperoleh dengan metode unsur terhingga (Plaxis V-7) berada pada zon tersebut.</p>
Landslide		Method 1	Method 2			With average measured strengths (FS)																																	
	$c' = 0$ FS=1.0 ϕ'_{res} (degrees)	$c' = z_{avg}$ FS=0.98 ϕ'_{res} (degrees)	c' (kPa)																																				
Okimi	12.7	9.1	13	1.016																																			
Yosio	14.3	9.7	5.8	1.098																																			
Mukohidehara	19.7	15.4	11	0.987																																			
Engyoji	16.2	11.2	8	0.772																																			
Iwagami	15.1	10.4	9.6	1.038																																			
Tsuboyama	11	6.3	7	1.057																																			

Bersambung

Penelitian Terdahulu		Hasil Penelitian																																																	
<p>f. Hasil variasi kekuatan geser residual yang diperoleh tanah residual dapat dilihat pada Tabel 6.8 berikut (Coutinho <i>et al.</i>, 1999)</p> <table border="1" data-bbox="341 544 869 703"> <thead> <tr> <th colspan="8">Sudut geseran dalam baki θ_r (darjah)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">28.5</th> <th colspan="2">29.0</th> <th colspan="2">29.5</th> <th colspan="2">30.5</th> </tr> <tr> <th>c_r (kPa)</th> <th>FK</th> <th>c_r (kPa)</th> <th>FK</th> <th>c_r (kPa)</th> <th>FK</th> <th>c_r (kPa)</th> <th>FK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>1.019</td> <td>3</td> <td>1.007</td> <td>1</td> <td>1.003</td> <td>1</td> <td>1.024</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.046</td> <td>5</td> <td>1.039</td> <td>3</td> <td>1.024</td> <td>3</td> <td>1.044</td> </tr> <tr> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>---</td> <td>5</td> <td>1.053</td> <td>5</td> <td>1.073</td> </tr> </tbody> </table> <p>g. Pada 16 kasus keruntuhan lereng yang terjadi pada lokasi dan masa yang berbeda yang membandingkan kekuatan geser dari uji laboratorium dengan analisis balik jangkaku diperoleh $c_r = 0$ (Mesri dan Huvaj, 2012).</p> <p>h. sudut geser residual (ϕ_r) dari laboratorium diperoleh dengan rentang di antara $7^\circ - 21^\circ$. Manakala dari analisis balik dari 16 kasus tersebut diperoleh sudut geser dalam pada rentang di antara $6.5^\circ - 21^\circ$ (Mesri dan Huvaj, 2012).</p> <p>Analisis balik pada keruntuhan di Jalan Tol Cipularang diperoleh $c_r = 13 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi_r = 5^\circ$ (Irsyam <i>et al.</i>, 2007). Sementara pada keruntuhan Jalan Tol Semarang-Bawen di STA 19+255, $c_r = 18 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi_r = 12^\circ$ (Himawan, 2013). Kedua kasus tersebut terjadi pada tanah clay shale.</p>		Sudut geseran dalam baki θ_r (darjah)								28.5		29.0		29.5		30.5		c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	5	1.019	3	1.007	1	1.003	1	1.024	7	1.046	5	1.039	3	1.024	3	1.044	---	---	---	---	5	1.053	5	1.073	<p>f. Terdapat 9 nilai kekuatan geser residual dari 72 hasil dari uji triaksial clay shale semula dan akibat proses pelapukan di laboratorium yang berada pada zon ABCD tersebut.</p> <p>g. Setiap uji triaksial tahap berbilang untuk memperoleh kekuatan geser residual, memperoleh kekuatan geser residual tanpa perlepasan tegangan (c_{rp}; ϕ_{rp}) dan kekuatan geser residual dengan perlepasan tegangan (c_{rf}; ϕ_{rf}).</p> <p>h. 9 kekuatan geser residual dari laboratorium yang masuk dalam zon ABCD adalah :</p> <ul style="list-style-type: none"> - c_{rp}, ϕ_{rp} dari proses pengeringan 80 hari (TT) - c_{rf}, ϕ_{rf} dari proses pengeringan 32 dan 48 hari (TT) - c_{rp}', ϕ_{rp}' dari proses pengeringan 80 hari (T) - c_{rf}', ϕ_{rf}' dari proses pengeringan 80 hari (T) - c_{rf}', ϕ_{rf}' dari proses pengeringan 40 dan 48 hari (T) - c_{rf}', ϕ_{rf}' dari proses siklus pembasahan dan pengeringan 8 dan 16 hari (TT) <p>Maklumat : (TT = tak jenuh, T = Jenuh).</p>	
Sudut geseran dalam baki θ_r (darjah)																																																			
28.5		29.0		29.5		30.5																																													
c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK	c_r (kPa)	FK																																												
5	1.019	3	1.007	1	1.003	1	1.024																																												
7	1.046	5	1.039	3	1.024	3	1.044																																												
---	---	---	---	5	1.053	5	1.073																																												

BAB 7

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Dalam bab ini, kesimpulan dibuat berdasarkan hasil penelitian serta analisis dan pembahasan penelitian kasus pelapukan terhadap kekuatan geser clay shale Semarang-Bawen. Kesimpulan juga disokong daripada penentuan parameter skestabilan lereng pada kasus gelongsoran di Jalan Tol Semarang-Bawen STA 19+250 dalam disain geoteknik dengan pengurangan magnitud parameter disain untuk clay shale dalam kestabilan lereng.

Uji triaksial clay shale dengan tahap berperingkat pada setiap sampelnya telah diperoleh kekuatan geser pada tegangan puncak (c dan ϕ), serta kekuatan geser pada tegangan residual (c_r dan ϕ_r). Penentuan kekuatan geser residual clay shale menggunakan uji triaksial dengan tahap berperingkat dilakukan tanpa pelepasan tegangan (c_{rp} dan ϕ_{rp}) dan dengan pelepasan tegangan (c_{rf} dan ϕ_{rf}). Uji ini adalah uji triaksial dengan anjakan besar '*large displacement*' dan perilakunya sangat sesuai untuk disain skestabilan 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 ϕ_{rp}) dapat digunakan di dalam penentuan kekuatan geser residual pada kasus skestabilan

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 ϕ_{rf}), dapat digunakan dalam penentuan kekuatan geser residual pada kasus kestabilan 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 kestabilan lereng yang telah runtuh, akibat kerja galian pada lereng clay shale sememangnya belum pernah diteliti sebelum ini dan metode ini sesuai untuk digunakan pada masa depan.

Proses pelapukan clay shale di laboratorium sangat diperlukan dalam penentuan kekuatan geser residual. Dengan mengenakan pelapukan pada clay shale di laboratorium secara proses pengeringan serta siklus pembasahan dan pengeringan, maka kekuatan geser residual dari laboratorium yang lebih tepat dapat diperolehi melalui kekuatan geser residual yang dilakukan pada disain analisis balik kestabilan lereng clay shale di lapangan. Kasus pelapukan kepada clay shale akibat siklus pembasahan dan pengeringan menghasilkan kadar pengurangan kohesi yang lebih besar berbanding dengan kadar pengurangan kohesi akibat kasus pelapukan dari proses pengeringan.

Sebelum ini masih belum ada metode standar yang boleh digunakan dalam analisis disain kestabilan lereng pada kasus keruntuhan lereng. Oleh karenanya, penelitian ini merupakan satu usaha untuk membangunkan metode yang mampu menyelesaikan permasalahan dalam disain tiga penelitian kasus lereng pada clay shale. Dalam kasus pertama yang diteliti yaitu lereng yang belum pernah terjadi keruntuhan, didapati kekuatan geser akibat tegangan puncak pada sampel yang telah dipengaruhi oleh proses pelapukan. Kohesi c yang digunakan pada lapisan *interface* di antara tanah di bagian atas dengan lapisan clay shale adalah 31% hingga 49% dari kohesi puncak. Manakala sudut geser dalam ϕ pula di antara 81% hingga 98% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini dibuat ke atas sampel dengan proses pelapukan siklus pembasahan dan pengeringan. Pembasahan sampel adalah 5 minit dalam setiap 4 hari yaitu dua kali dalam tempoh 8 hari. Manakala pada lapisan clay shale yang tidak dipengaruhi oleh air tanah, kohesi c yang digunakan adalah di antara 17% hingga 29%

dari kohesi puncak. Seterusnya sudut geser dalam ϕ adalah antara 55% hingga 65% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini dibuat ke atas sampel dengan proses pengeringan.

Selanjutnya, kasus kedua yang diteliti ialah lereng yang telah terjadi keruntuhan akan tetapi tidak dilakukan penggalian, maka kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan digunakan. Kohesi c pada lapisan *interface* yang digunakan adalah dengan rentang di antara 21% hingga 28% dari kohesi puncak. Manakala sudut geser dalam ϕ adalah di antara 32% hingga 45% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini menggunakan sampel dengan proses pelapukan siklus pembasahan dan pengeringan. Pembasahan sampel adalah selama 5 minit dalam setiap 4 hari yaitu dua kali dalam tempoh 8 hari. Untuk lapisan clay shale yang tidak dipengaruhi oleh air bumi, kohesi c yang digunakan adalah di antara 3% hingga 4% dari kohesi puncak. Manakala sudut geser dalam ϕ adalah di antara 1% hingga 2% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini menggunakan sampel dengan proses pengeringan.

Kasus ketiga adalah pada lereng yang telah terjadi keruntuhan akan tetapi ada lapangan telah dilakukan penggalian (*soil cutting*) yang kemudian dilakukan penimbunan. Pada kasus seperti ini maka kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan digunakan. Kohesi c yang digunakan pada lapisan *interface* adalah dengan rentang 2% hingga 9% dari kohesi puncak. Manakala sudut geser dalam ϕ adalah 19% hingga 24% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini adalah dengan sampel yang melalui proses pelapukan siklus pembasahan dan pengeringan. Pembasahan sampel juga dibuat selama 5 minit pada setiap 4 hari yaitu dua kali dalam tempoh 8 hari. Manakala pada lapisan clay shale yang tidak dipengaruhi pelepasan air bumi, kohesi c yang digunakan adalah dengan rentang di antara 3% hingga 4% dari kohesi puncak. Sudut geser dalam ϕ di antara 1% hingga 2% dari sudut geser dalam puncak. Uji triaksial pada keadaan ini menggunakan sampel dengan proses pengeringan. Ketiga-tiga kasus di atas dibandingkan dengan penelitian terdahulu seperti Gartung (1986) dan Emberhardt (2004) dari aspek penurunan kekuatan geser clay shale akibat proses pelapukan yang dilakukan secara mula-mula di lapangan

melalui penentuan grad pelapukan. Manakala uji kekuatan geser di laboratorium dilakukan dengan menggunakan uji geser langsung.

Disini, hasil penelitian digunakan sebagai validasi uji triaksial clay shale di laboratorium dengan proses pelapukan dalam penentuan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan. Dengan tahap berperingkat, kekuatan geser residual di laboratorium adalah sama dengan kekuatan geser residual yang terjadi pada kasus keruntuhan lereng yang di analisis balik menggunakan program Plaxis V.7. Hasil ini telah dilakukan pada kasus keruntuhan lereng di Jalan Tol Semarang-Bawen pada STA 19+220.

Penentuan kekuatan geser residual yang terjadi semasa keruntuhan lereng ditentukan dengan analisis balik, yaitu menggunakan metode unsur terhingga dan metode kesetimbangan batas. Kedua-dua metode tersebut telah memberikan hasil penelitian yang sama. Melalui metode unsur terhingga menggunakan program Plaxis V-7 pada keadaan pelevasi air bumi rata-rata, diperolehi beberapa kekuatan geser residual dengan rentang kohesi residual c_r di antara 6.75 kN/m^2 hingga 29.25 kN/m^2 dan rentang sudut geser dalam ϕ_r di antara 7.4° hingga 25.8° . Sedangkan dengan menggunakan metode batas kasusimbangan cara Irisan, rentang kekuatan geser dihitung pada keadaan pelevasi air bumi tertinggi (HWL) dan pelevasi air bumi terendah (LWL). Pada keadaan kedua-dua pelevasi air bumi tersebut diperolehi rentang kohesi geser c_r di antara 4 kN/m^2 hingga 50 kN/m^2 dan rentang sudut geser dalam residual ϕ_r di antara 9° hingga 17.4° . Dengan rentang kekuatan geser residual tersebut keruntuhan pada lereng dengan faktor keamanan adalah bersamaan 1.00.

Dengan metode uji kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan pada clay shale tak jenuh dan jenuh, telah diperolehi hasil yang sesuai dengan rentang kekuatan geser yang terjadi di lapangan. Ini termasuk sembilan hasil kekuatan geser residual yang terdiri dari empat kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan lima kekuatan geser residual dengan pelepasan tegangan. Hasil kekuatan geser residual ini tidak akan sama dengan analisis balik secara FEM dan LEM tanpa melibatkan proses pelapukan di laboratorium. Dengan demikian proses pelapukan di laboratorium perlu dilakukan melalui metode baru

yang dapat dimanfaatkan untuk diperoleh kekuatan geser residual clay shale di masa depan. Hanya dengan pembuktian hasil melalui kasus keruntuhan lereng, maka metode ini dapat dijadikan metode standar pada masa depan dalam menentukan kekuatan geser residual tanpa pelepasan tegangan dan dengan pelepasan tegangan melalui uji triaksial dengan tahap berperingkat.

7.2 Saran

Untuk permasalahan kestabilan lereng pada clay shale pada masa depan, metode yang betul adalah perlu bagi penelitian lapangan sebenar pada lereng. Perkara utama yang perlu ditentukan dalam penelitian ialah geologi terperinci pada lapangan lereng clay shale yang ada keruntuhan pada masa lalu, tanpa harus melakukan kerja-kerja galian terlebih dahulu. Penelitian ini perlu dilengkapi dengan penelitian topografi untuk memberi gambaran sebenar yang terjadi pada lapangan. Penelitian kasus boleh dilanjutkan pada gelongsoran lereng clay shale yang terjadi tanpa adanya kerja-kerja galian untuk validasi penentuan kekuatan geser yang terjadi daripada uji di laboratorium.

Jangankutnya dicadangkan juga supaya melakukan uji kekuatan geser pada tegangan puncak hingga tegangan residual akibat pelapukan dengan menggunakan metode kekuatan geser yang lain seperti kotak geser langsung pembalikan (*reversal direct shear box*). Uji laboratorium kekuatan geser residual tersebut juga dicadangkan supaya diteliti dengan metode sistem tahap berperingkat.

REFERENSI

- Abdullah, A. S. (2004). Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences* 25 (2005) 747–757.
- Abdulmohsin, W. D. (1992). Soil Suction - Potential Model. *Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No. 4, April, 1992.*
- Abdulmohsin, W. D. (1990). Field Performance of Expansive Shale Formation. *JKAU: Eng. Sci.. Vol. 2, pp. 165-182.*
- Aghamelu, O. P., Nnabo, P. N. and Ezeh, H. N. (2011). Geotechnical and environmental problems related to shales in the Abakaliki area, Southeastern Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 5(2), pp. 80-88, February, 2011.*
- 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.
- Alatas, I. M. (2012). Geotechnical Engineering Aspect in Infrastructure Building on Difficulties soil. *C-Line Journal, Civil Eng Departement of ISTN.*
- Alatas, I. M. and Wawan, K. (2016). Shrink and Swell Behaviour of Clay Shale Under Variation of Surcharge Load on Daihatsu Motor Assembly Plant Factory in Surya Cipa Industrial Estate, West Java, Indonesia, March 2016. In *Technical Report: Nippo Corp Japan - Kadii Joint Operation.*
- 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.
- Antonio, B. and Helbert, H. E. (2008). Deep Tunnels in Clay Shales: Evaluation of Key Properties for Short and Long Term Support. *GeoCongress 2008*.
- ASTM D 422-72 (1989). Standard Method for Particle-Size Analysis of Soils. *Annual Book for ASTM Standard*.
- ASTM D 653-88 (1989). Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids. In *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D 854-83 (1989). Test Method for Specific Gravity of Soils. In *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D 2216-80 (1989). Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil-Aggregate Mixtures. In *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D 2850-87 (1989). Test Method for Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression. In *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D 4318-84 (1989). Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In *Annual Book of ASTM Standard*.
- 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.
- Binod, T., Thomas, L. B., Hideaki, M. and Gyanu, R. T, (2005). Comparison of Residual Shear Strengths from Back Analysis and Ring Shear Tests on Undisturbed and Remolded Specimens. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, September 1, 2005*.
- Bishop, A.W. (1966). The Strength of Soil as Engineering Materials. *Geotechnique* , Vol 16, No. 2.

- Blatt, H. and Robaert, J. T. (1996). *Igneous, Sedimentary and Metamorphic, 2nd edition, Freeman, pp. 281–292*
- Bless, S. J. and Ahren, T. J. (1977). Measurements of The Longitudinal Modulus of Pierre Clay Shale At Varying Strain Rates. *Geophysics, Vol.42, No.1 (February 1979), pp.34-40.*
- Brandon, T. L. (2013). Advances in Shear Strength Measurement, Assessment, and Use for Slope Stability Analysis. *Geo-Congress 2013 © ASCE 2013.*
- Briaud, J. L., Zhang, X. and Moon, S. (2003). Shrink Test-Water Content Method for Shrink and Swell Predictions. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering , Vol.129 No.7, July 1, 2003 : 590-600.*
- 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.*
- Cheang, W. (2013). *Initial Stress and Phy-C Reduction Analysis.* Bandung-Indonesia, 9-11 December 2013.
- Chen, F. H. (1988). *Foundation on Expansive Soil, 2nd Edition, Ersevier, New York.*
- Craig, R. F. (1987). *Soil Mechanics:* Van Nostroad Reinhold (UK). pp (324-326).
- Das, B. M (2006). *Principle of Geotechnical Engineering, 7th Edition.* pp (365-373).
- David, N. R. and Timothy, T. W. (1990). Shale Durability Ratio Sistem 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.
- Duncan, J. M. and Timothy, D. S. (1992). Soil Strength from back analysis of slope failure. *Stability and performance of slopes and embankments II Proceedings , Berkeley CA.*
- Effendi, A. C. (1974). Peta Geologi Lembar Bogor, Jawa Bandung, Indonesia: Direktorat Geologi Bandung.
- Emberhardt, E., Thuro, K. and Luginbueh M. (2004). Slope Instability Mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls- The 99 Ruffi landslide Switzerland. *Elsevier.*

- Erguler, Z. A. and Shakoor, A. (2009). Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after Slake Durability Testing. *Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XV, No. 2, May 2009, pp. 81–89.*
- Fauziah, A. and Syukri (2006). Characterization and Geotechnical Properties of Penang Residual Soils with Emphasis on Landslides. *American Journal of Environmental Sciences, Vo.2 (4): 121-128, 2006.*
- Fityus, S. G., Smith, D. W. and Allman, M. A. (2004). Expansive Soil Test Site Near Newcastle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE / JULY 2004.*
- 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 Divission, 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.*
- Goodman, R. E. (1989). *Intoduction to Rock Mechanics, Second Edition.* Canada: John Wiley & Sons.
- Gorok, P. and Torok, A. (2007). Slope stability assessment of weathered clay by using field data and computer modelling: a case study from Budapest. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 417–422, 2007.*
- Gow, T. L. (2012). Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium VS Finite Element Method. *Proceeding Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) HATTI - XVI, Jakarta. 2012*

- 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.
- Gutierrez, G. I. C., Bryson L. S. and Hopkins T. C. (2011). Correlations between Geotechnical Properties and the Swell Behavior of Compacted Shales. *Geo-Frontiers 2011* © ASCE 2011.
- 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.*
- Himawan, A. (2013). Alternatif Mitigasi Kelongsoran dan Perkuatan Lereng Galian Tower SUTT STA 19+255 Pembangunan Jalan Tol Semarang - Solo Tahap I Ruas Ungaran - Bawen Paket V Tinalun - Lemah Ireng STA 18+000 - 21+825 In *Technical Report LAPI ITB 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.*
- Holtz and Wesley, G. (1983). Compaction and Related Properties of Retorted Oil Shale, *Journal of Geotechnical Engineering.*
- 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.*
- Horsrud, P. (2001). Estimating Mechanical Properties of Shale From Empirical Correlations. *Society of Petroleum Engineers.*
- Indrawan, I. G. B., Rahardjo, H. and Leong, E. C, (2006). Effects of Coarse-Grained Materials on Properties of Residual Soil. *Journal of Engineering Geology* 82, 154-164.

- 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 Ciplarang 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*.
- Irsyam, M., Jataputra, A. A., Himawan, A. and Kartawiria, A. (2011). Kasus-Kasus Kelongsoran Pada Tanah Clay Shale dan Alternatif Penanggulangannya. *Proceeding of the 9th Indonesian Society for Geotechnical Engineers Conference and 15th Yearly Scientific Meeting, Jakarta .December 2011*.
- ISRM (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods: International Society for RockMechanics (ISRM), . Ankara, Turkey.
- 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*.
- Kainthola, A. (2013). A review Numerical of slope stability analysis. *International Journal of Sciences , Engineering and Technology Reseach (IJSETR) Volume 2, No. 6, June 2013*.
- Kamon, M. (1987). Geotechnical Properties and Weathering Joints of Decomposed Granite. Paper presented at Proceeding of 8th ARCSMF, Vol. 1, 181-184.
- Kim, M. (1979). Multistage Triaxial Testing of Rocks. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 98-105.
- Kourkoulis, R., Gelagoti F., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2011). Slope Stabilizing Piles and Pile-Groups: Parametric Study and Design Insights. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 7, July 1, 2011.
- Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2012). Hybrid Method for Analysis and Design of Slope Stabilizing Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 1, January 1, 2012.

- 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.
- LAPI, ITB P. T. (2013). Alternatif Mitigasi Kelongsoran dan Perkuatan Lereng Galian Tower SUTT STA 19+255 Pembangunan Jalan Tol Semarang - Solo Tahap I Ruas Ungaran - Bawen Paket V Tinalun - Lemah Ireng STA 18+000 - 21+825. In *Technical Report LAPI ITB PT*.
- LEMIGAS, L. (2015). SEM and XRD Report for Semarang-Bawen and Hambalang Clay Shale. Jakarta: LEMIGAS.
- Liew, S. S., Gue, S. S. and Liong, C. H. (2003). Geotechnical Investigation and Monitoring Results of a Landslide Failure at Southern Peninsular Malaysia (Part 2: Back Analyses of Shear Strength and Remedial Works). In *Technical Report Gue & Partners Sdn Bhd, Malaysia*.
- Lin, L. C. and Benson, C. H. (2000). Effect of Wet-Dry Cyclic on Swelling and Hydraulic Conductivity of GCLs. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2000, 126(1): 40-49
- 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 Huvaj-Sarihan, N. (2012). Residual Shear Strength Measured by Laboratory Tests and Mobilized in Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 5, May 1, 2012.
- 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.

- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behaviour 3rd edition*: John Wiley & Sons, Inc.
- Moffat, R. and Rivera, D. (2013). Back-analysis & in-situ shear testing studies to estimate shear strength parameters on an actual slope. *Geo-Congress 2013 © ASCE 2013*.
- Muawia, D. and Al.-Shamrani, M. (2014). Geocharacteristics of Tabuk Expansive Shale and its Links to Structural Damage 882 *Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234 © ASCE 2014*.
- Muntaha, M. (2012). Karakteristik Statik Dan Dinamik Tanah Residual Tidak Terganggu (*Undisturbed Residual Soils*) Akibat Pengaruh Siklus Pembasahan-Pengeringan, Jurusan Teknik Sipil-FTSP, Insitut Teknologi Sepuluh November, Suarabaya.
- Nam, S. (2011). Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology 122 (2011) 272–280*.
- Nandi, A., Liutkus, C. M. and Whitelaw, M. J. (2008). Geotechnical Characterization of Sevier and Rome Shale, East Tennessee. *ARMA Technical Program Committee, the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in Asheville, NC June 28th – July 1*.
- Nandi, A. and Shakoor, A. (2008). Application of logistic regression model for slope instability prediction in Cuyahoga River Watershed, Ohio, USA. *Georisk. 2 (1), 16-27*.
- Olsen, H. W., Krosley, L., Nelson, K., Chabrilat, S., Goetz, A. F. H. and David, C. N. (2000). Mineralogy-Swelling Potential Relationships For Expansive Shales
- Panjaitan, and Sumitro. (2000). Pengaruh Perubahan Siklus Pengeringan dan Pembasahan Terhadap Kuat Tekan Tanah Mengembang dengan Kondisi Awal Slurry dan Pemadatan Statik Optimum, Fakultas Pasca Sarjana ITS, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya, Surabaya.
- Patton, F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. *Proceeding 1st Congress ISRM (Lisbon), Vol. 1, pp. 509-513*.
- Petrosol, PT. (2012). Laporan Akhir Pekerjaan Penyelidikan Tanah Untuk Pembangunan Jalan Tol Semarang-Solo Tahap I. In *Technical Report PT. Adhi Karya*,.
- 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).
- Plaxis (2004). Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. edited by Reference M.PLAXIS-2D Version 8, Edited by Brinkgreve, et al., DUT, the Netherlands. www.plaxis.nl.
- 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.
- Rafael, V. L. and Ghazanfari, E. (2014). Geomechanical Characterization of Shale Formations for Sustainable Production. *Shale Energy Engineering 2014* ©ASCE 2014.
- 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.
- Robert, W. D. (1992). Swell Versus Saturation for Compacted Clay *J. Geotech. Engineering* 1992, 118(8): 1272-1278
- Robert, W. D. (1994). Swell-Shrink Behaviour of Compacted Clay *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 3, March, 1994.
- 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.
- Sander, H., Mark, D. Z. and Christopher, J. S, (2013). Role of Adsorption in The Creep Behavior of Coal and Shale *Poromechanics V © ASCE 2013.*
- Sarman, R. and Shakoor, A. (1994). A Multiple Regression Approach To Predict Swelling in Mudrocks. *Bulein of The Association of Engineering Geologists, Vol. XXXI No.1, pp. 107-121.*
- Scuhanics, B. and Debreczeni, A. (2013). Development of Automatic Control of Multi Stage Triaxial Test at The University of Miskolc. *Geosciences and Engineering, Vol. 2, No. 3 (2013), pp. 37-43.*
- Shakoor, A. and Brock, D. (1987). Relationship Between Fissility, Composition, and Engineering Properties of Selected Shales From Northeast Ohio. *Buletin of The Association of Engineering Geologists , Vol XXIV, No.3, pp. 363-379.*
- Shakoor, A. Gautam, T. P. (2015). Influence of Geologic and Index Properties on Disintegration Behavior of Clay-Bearing Rocks. *Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XXI, No. 3, August 2015, pp. 197-209.*
- Shakoor, A. and Tej, P. G. (2011). Assessing The Slaking Behaviour of Clay- Bearing Rock. *10th Annual Tecnical Forum Geohazards Impacting Transportation In The Appalachian Region, Columbus Ohio USA.*

- Singh, K. (2012). Back Analysis studies of the quarry heights road landslide. Dicipline of Geological Science University of Kwazulu-Natal, Durban, South Africa.
- Sireesh, S., Sunil, K. S., Anand, J. P. and Richard, W. (2008). Performance of Expanded Clay Shale (ECS) as an Embankment Backfill. *GeoCongress 2008*.
- Skempton, A. W. (1977). *Slope Stability of Cuttings in Brown Clay*. Tokyo.
- Soufi, N. (2009). Shale Pressure Measurements Methods. In *NTNU , Autumn 2009*.
- Stefano, U. (2004). Evolution of Natural Slopes Subject to Weathering : An Analytical and Numerical Study Dottorato in Ingegneria Sismica, Geotecnica e dell'Interazione Ambiente-Struttura del Politecnico di Milano, Milano.
- Suparman (2013). Pengeboran Tambahan Jalan Tol Semarang - Solo Paket V Ruas Ungaran - Bawen. In *Soil Investigation Report: Politeknik Negeri Semarang*.
- Thanden, R.E., Sumadirdja, H., Richard, P.W., Sutisna, K. and Amin, T.C, (1996). Lembar Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Sheets, Jawa. Bandung: Puslitbang Geologi Bandung.
- 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*.
- Tien, H. W., Brian, W. R. and Chiung, S. H. (1993). Stability of Shale Embankment. *Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 1, January, 1993*.
- Timothy, D. S. and Manzoor, H. (2010). Shear Strength in Preexisting Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 7, July 1, 2010*.
- 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. and Manzoor, H. (2009). Drained Residual Strength For Landslides. In *University of Illinois, 205 N. Mathews Ave., Urbana*.
- 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. (1998). Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 124 (11), 1049-1060.
- 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.*
- Timothy, D.S. and Hisham, T. E. (1993). Modified bromhead ring shear test apparatus. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 1, March 1993, pp. 100-107.*
- Timothy, D.S. and Hisham, T. E. (1997). Slope Stability Analyses in Stiff Fissured Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No.4, April, 1997.*
- Torres, M. C. and Olarte, J. M. (2011). Geotechnical Behavior of Shales in the Colombian Andes. *Geotechnical Special Publication No. 220 © ASCE 2011.*
- Tugrul, A. (2004). The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology 75 (2004) 215-227.*
- UNDIP, Lab. Mektan (2013). Penyelidikan Tanah Bor Dalam Disekitar SUTET STA 19+250, Rencana Jalan Toll Semarang-Solo. In *Soil Investigation Report: Laboratorium Mekenika Tanah UNDIP, Semarang.*
- Van Bemmelen, R. W. (1970). *The Geology of Indonesia Vol. IA, General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelago, (2nd ed.).* . Netherland.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement and Processes*. Edited by S. R. Landslide : Analysis and Control, Transportation Research Board. Washington D.C: National Academy of Science.
- Walter, G. K. and Luis, E. V. (2010). Failure Analysis of an Instrumented Stiff Clay Slope. *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (GSP 199) © 2010 ASCE.*
- Wang, Z.W., Huang, and Speck, R. C. (1994). Swelling Behavior os Shales in Cold Regions. *Journal of Cold Region Engineering, Vol. 8, No. 1, March, 1994..*
- Wikipedia (2015). Jalan Tol Trans Jawa https://id.wikipedia.org/wiki/Jalan_Tol_Trans_Jawa.

- Wilson, H. T., Timothy, D. S. and Mauricio, A. (1999). Reability in Back Analysis of Slopes Failure. *Soil, and Foundation* , Vol 39 No.5 Oct 1999, Japanes *Geotechnical Society*.
- Yang, X. X., Kulatilake, P. H. S. W., Chen, X., Jing, H. W. and Yang, S. Q. (2016). Particle Flow Modeling of Rock Blocks with Nonpersistent Open Joints under Uniaxial Compression *Int. J. Geomech.*, .
- 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.
- Zhang, J., Wilson, H. T. H. and Zhang, L. M. (2010). Efficient Probabilistic Back-Analysis of Slope Stability Model Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 1, January 1, 2010.
- 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).