

Hubungan Antara *Liquid Limit* dan Sudut Geser *Fully Softened* dan *Residual* pada *High Plasticity Stiff Overconsolidated Clay*

The Relationship Between Liquid Limit and the Fully Softened and Residual Friction Angles in High-Plasticity Stiff Overconsolidated Clays

Muhammad Nafi' Mulyono¹ Kresno Wikan Sadono² Sri Prabadiyani Retno Wardani²

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Surabaya. Email: nafimulyono@its.ac.id

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto S. H., Semarang.

Abstrak

Longsoran pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* sering terjadi meskipun analisis berbasis *undrained shear strength* menghasilkan faktor keamanan tinggi. Hal ini disebabkan karena parameter analisis yang digunakan kurang merepresentasikan kondisi lereng akibat deformasi berulang dan pelapukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai *fully softened* dan *residual shear strength*, mengkaji hubungannya dengan *liquid limit* (LL) pada jenis tanah tersebut, dan mengetahui kesesuaian grafik hubungan tersebut dengan yang sudah dikembangkan oleh Stark & Hussain. Nilai *fully softened* dan *residual shear strength* diperoleh melalui uji *direct shear slow reversal*. Sampel yang digunakan merupakan sampel *remoulded* dengan metode *slurry* yang dikonsolidasi secara normal. Sampel diambil dari tiga lokasi longsor di Kota Semarang. Hasil pengujian menunjukkan nilai LL sangat tinggi (94-105%) dengan *clay fraction* >50% untuk ketiga lokasi sampel. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan kekonsistensian dengan batas regresi hubungan LL dengan sudut geser *fully softened* dan *residual* yang sudah dikembangkan oleh Stark & Hussain. Korelasi tersebut menunjukkan kesesuaian yang baik dan dapat diaplikasikan dengan tanah *clayshale* lokal.

Kata Kunci: *direct shear; fully softened shear strength; high plasticity; longsoran; residual shear strength*

Abstract

Landslide in high plasticity stiff overconsolidated clays frequently occur despite high safety factors obtained from analyses based on undrained shear strength. This is because the parameters used in such analyses do not adequately represent slope conditions subjected to repeated deformation and weathering. This study aims to identify the fully softened and residual shear strength parameters, to examine their relationship with the liquid limit (LL) for this soil type, and to find out the suitability of the relationship graph with that developed by Stark & Hussain. Fully softened and residual shear strengths were obtained from direct shear slow reversal test. Remoulded specimens prepared using the slurry method and consolidated under normally consolidated conditions were used. Soil samples were collected from three landslide sites in Semarang. The test results indicate very high LL values (94-105%) with clay fractions exceeding 50% at all sampling locations. Overall, the results show consistency with the regression bounds relating LL to fully softened and residual friction angles developed by Stark & Hussain. The correlation demonstrates good agreement and is applicable to local clayshales.

Keywords: *direct shear; fully softened shear strength; high plasticity; landslide; residual shear strength*

PENDAHULUAN

Longsoran lereng merupakan peristiwa geoteknik yang sering terjadi dan dapat mengakibatkan kerusakan serius pada infrastruktur dan lingkungan. Salah satu jenis tanah yang rentan terhadap longsoran adalah *high plasticity stiff overconsolidated clay*. *Marine shale* umumnya disebut juga sebagai *clayshale* maupun *stiff*

overconsolidated clay (Andriansyah et al., 2025). Hunt (2006) menyebutkan bahwa *Marine shale*, terutama pada periode *tertiary*, *cretaceous*, dan *permian*, biasanya mengandung *montmorillonite*. *Marine shale* adalah *shale* yang paling bermasalah dari sudut pandang *engineering* karena kecenderungannya membentuk lereng yang tidak stabil dalam penggalian (Hunt, 2006). *Clayshale* kadang-kadang dianggap sebagai batu yang sangat

keras ketika berada di dalam tanah namun dapat terurai dengan cepat apabila terkena udara dan air (Andriansyah et al., 2025; Adisurya & Makarim, 2022; Walkinshaw & Santi, 1996). Pelapukan yang terjadi pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* atau *clayshale* menyebabkan ikatan antarpartikel melemah sehingga mengalami penurunan kekuatan. Kuat geser tanah tersebut akan berkurang secara signifikan hingga mencapai kondisi *fully softened* apabila mengalami pembasahan dan pengeringan serta dalam kondisi terekspos (Adisurya & Makarim, 2022; Alatas et al., 2015; Stark & Duncan, 1991). Pernyataan tersebut didukung oleh Rogers & Wright (1986) dalam Wright (2005) dengan melakukan pengujian pada *high plasticity* yang mengalami siklus pembasahan dan pengeringan berulang. Hasilnya menunjukkan bahwa siklus pembasahan dan pengeringan menyebabkan hilangnya kekuatan geser signifikan khususnya pada nilai kohesi efektif (c'). Hal ini juga sesuai dengan pernyataan Hunt (2006) yang menyebutkan formasi *Marine shale* secara karakteristik telah ditekan sebelumnya oleh tekanan lapisan penutup yang tinggi (*overburden pressures*). Ketika terjadi *uplift* dan erosi, *stress release* dan regangan yang dihasilkan menyebabkan rekahan intens. Air memasuki rekahan dan mineral tanah lempung *montmorillonite* mengembang memecah massa menjadi banyak fragmen kecil sehingga mengakibatkan rentan terhadap pelapukan dan reduksi tanah (Hunt, 2006).

Beberapa formasi bermasalah yang terkenal adalah Formasi *Cucaracha*, *Culebra* dan *LaBoca* sebagai penyebab longsor selama masa pembangunan hingga masa operasional Terusan Panama (Lutton, 1975). Terusan Panama adalah jalur air buatan di Panama yang menghubungkan Laut Karibia dengan Samudra Pasifik. Formasi-formasi tersebut mengandung mineral lempung *montmorillonite* dan *kaolinitic* dengan proporsi sekitar 55% dan 22% serta mengandung tanah lempung *smectite* yang mengalami *strength loss* yang signifikan saat digeser (Rogers, 2014). Berdasarkan Rogers (2014), hilangnya kekuatan geser ini bersamaan dengan meningkatnya gerakan. Ahli geoteknik menyebut hilangnya kekuatan ini sebagai *residual strength loss*.

Kekuatan geser tanah adalah kekuatan tanah untuk menahan beban atau gaya yang dapat menyebabkan kelongsoran, keruntuhan, gelincir, dan pergeseran tanah. Kuat geser tanah terdiri dari dua parameter yaitu kohesi tanah (c) dan sudut geser tanah (ϕ). Kedua parameter tersebut dapat dicari dengan melakukan pengujian geser langsung, triaksial, dan pengujian lainnya (Das & Sobhan, 2016). Skempton (1964) menyatakan bahwa pada

kasus longsor *high plasticity stiff overconsolidated clay*, penggunaan kohesi tanah (c) dan sudut geser tanah (ϕ) pada *peak strength* dinilai terlampaui optimis. Penyelidikan tanah pada jenis tanah tersebut baik dengan sondir maupun *standard penetration test* (SPT) menghasilkan angka keamanan yang tinggi karena termasuk lempung kaku/keras utamanya jika q_c dan NSPT dikorelasikan dengan *undrained strength* untuk perhitungan stabilitas lereng. Kenyataannya jenis tanah tersebut seringkali ditemukan kasus longsor. Salah satu upaya yang dapat dilakukan dalam mencegah kelongsoran pada tanah *high plasticity stiff overconsolidated clay* adalah dengan mengidentifikasi nilai kekuatan geser *fully softened* dan *residual*.

Residual shear strength merupakan kekuatan geser tanah setelah mencapai puncaknya. *Slow drained test* berhenti setelah kekuatan puncak diperoleh dan disebut dengan “kekuatan geser tanah” tanpa kualifikasi lebih lanjut, namun apabila pengujian tersebut dilanjutkan, maka akan tercapai kekuatan yang stabil yang disebut dengan *residual shear strength* (Skempton, 1964). Kekuatan geser di banyak lereng lebih rendah dari kekuatan puncak, namun lebih tinggi dari kekuatan *residual*. Kekuatan yang terletak di antara kekuatan geser puncak dan *residual* inilah yang disebut dengan *fully softened shear strength* (Wright, 2005; Wright et al., 2007). Menurut Mesri & Shahien (2003), *fully softened strength* sering didefinisikan untuk tanah lempung dan *shale* yang kaku dengan kekuatan puncak spesimen yang dikonsolidasikan secara normal.

Skempton (1970) dalam Wright et al. (2007) merekomendasikan *fully softened shear strength* sebagai kekuatan yang dapat diterapkan untuk longsor pertama kali pada penggalan *homogenous stiff fissured clays*. Namun, Mesri & Shahien (2003) menyatakan bahwa sebagian permukaan gelincir mungkin berada pada kondisi *residual strength* bahkan untuk kelongsoran pertama pada penggalan *stiff clays* dan *shales*. Parameter *fully softened* dan *residual shear strength* dapat diperoleh dengan melakukan pengujian *direct shear slow reversal* (Head, 1994).

Stark & Eid (1994) dalam penelitiannya mencetuskan korelasi antara *liquid limit* (LL) terhadap sudut geser *residual* dari 32 tanah lempung alami. Penelitian selanjutnya, Stark & Eid (1997) membuat grafik hubungan antara LL terhadap sudut geser *fully softened*. Kedua korelasi tersebut dikembangkan oleh Stark et al. (2005) dengan menambahkan beberapa jenis tanah kemudian disempurnakan oleh Stark & Hussain (2013) dengan menambah jumlah titik data, memperluas korelasi kekuatan *residual* hingga mencakup tegangan normal efektif 50 kPa dan menyajikan persamaan

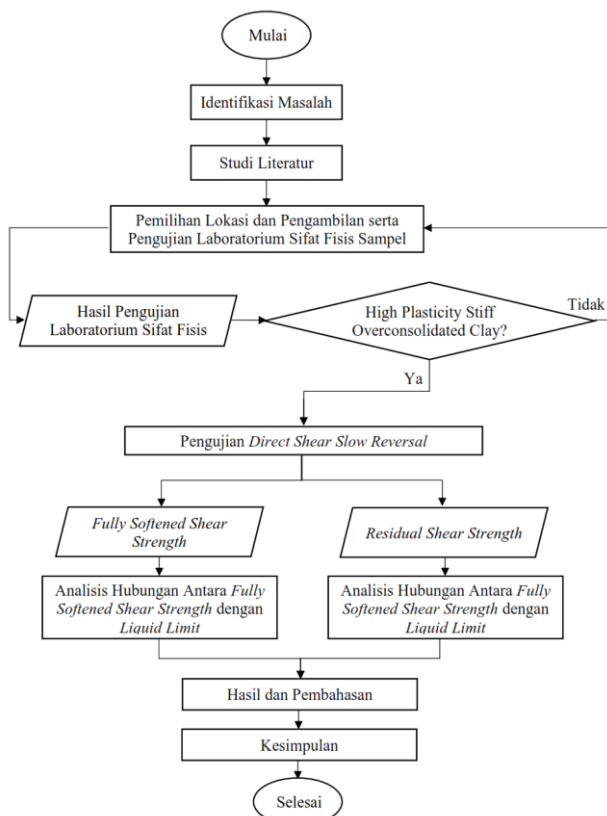
empiris untuk menyatakan korelasi empiris berdasarkan nilai LL dan fraksi ukuran tanah lempung.

Kebutuhan praktis memunculkan pendekatan korelasi empiris tersebut. Namun, korelasi tersebut dibangun dari basis data tanah di luar Indonesia, sehingga verifikasi pada tanah *clayshale* lokal dengan LL menjadi sangat penting untuk mengetahui apakah korelasi tersebut relevan dengan kondisi tanah lokal. Beberapa formasi *clayshale* di Indonesia, termasuk di Kota Semarang, telah dilaporkan mengalami degradasi kuat geser akibat pelapukan dan siklus lingkungan. Kondisi ini memperkuat urgensi untuk memperoleh parameter yang lebih representatif untuk analisis stabilitas lereng jangka panjang pada tanah lokal.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, perlu dilakukan penelitian untuk mencari hubungan antara sudut geser *fully softened* dan *residual* dengan batas cair (*liquid limit*) pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* dan mengevaluasi kesesuaian hasil pengujian dengan grafik korelasi yang sudah dikembangkan.

METODE

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pemilihan Lokasi dan Pengambilan Sampel

Pemilihan lokasi pada penelitian ini berdasarkan lokasi-lokasi yang mengalami longsor. Sampel tanah diambil dari tiga lokasi yang mengalami longsor di Kota Semarang, yaitu Jalan Gombel Lama, Jalan Tembus Jangli-Undip dan Jalan Kalialang Lama. Sampel dipilih dengan ciri khas *clayshale* dan dilakukan pengujian sifat fisis untuk memastikan klasifikasi plastisitas tinggi dan fraksi lempung signifikan.

Persiapan Sampel Uji

Sampel disiapkan dengan metode yang dikenal sebagai *slurry* dapat diterapkan dalam uji geser langsung untuk mengukur kekuatan geser tanah. Metode ini dipilih karena literatur menunjukkan bahwa sampel yang dipreparasi dengan metode *slurry* dengan sampel yang mengalami proses pembasahan dan pengeringan menghasilkan *mohr failure envelope* yang serupa (Kayyal & Wright 1991). Pelaksanaan konsolidasi dilakukan menggunakan alat *apparatus consolidation* yang terdiri dari beberapa bagian seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rakitan Tabung Konsolidasi dan Spesimen Konsolidasi

Sampel tanah dibiarkan mengendap sendiri sebelum kemudian diberi beban pada piston secara bertahap hingga tekanan konsolidasi efektif akhir yang ditargetkan tercapai. Spesimen membutuhkan waktu sekitar 25 hingga 30 hari untuk terkonsolidasi dalam tabung konsolidasi dan tekanan konsolidasi akhir sebesar 2 psi atau sekitar 6 kg (Wright et al., 2007).

Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

Parameter sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) diperoleh melalui uji *direct shear slow reversal* dengan *sample preparation* metode *slurry*. Pengujian dilakukan pada kondisi jenuh dan *drained* sehingga laju geser ditentukan berdasarkan hasil konsolidasi agar tidak memicu kenaikan tekanan air pori yang signifikan selama penggeseran. Perbandingan kuat geser *peak*, *fully softened*, dan *residual* dapat dilihat pada Gambar 3.

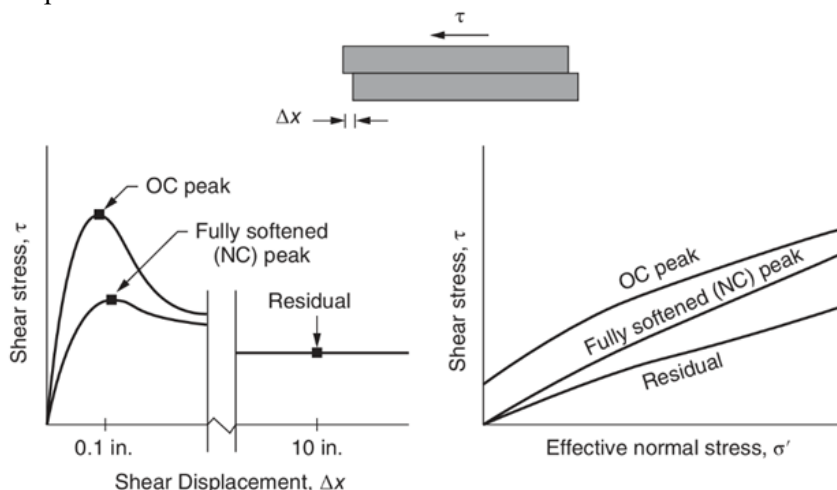
$$t_f = 50t_{50} \dots \dots \dots [2]$$

$$t_f = 11,6t_{90} \dots \dots \dots [3]$$

di mana:

t_{50} = waktu yang diperlukan sampel untuk mencapai konsolidasi 50% (menit)

t_{90} = waktu yang diperlukan sampel untuk mencapai konsolidasi 90% (menit)



Gambar 3. Perbandingan Antara Tegangan Geser Puncak, *Fully Softened* dan *Residual* (Duncan et al., 2014)

Berdasarkan Gambar 3, kekuatan *fully softened* merupakan nilai puncak dari spesimen yang dikonsolidasikan secara normal. Pada pengujian *direct shear* dengan *shear box*, kekuatan *residual* dapat dicapai dengan mengembalikan *shear box* ke posisi awalnya setelah mencapai pergeseran puncak (*reversal*) dan melakukan penggeseran kembali. Proses ini dapat diulangi beberapa kali untuk mendapatkan nilai kuat geser yang stabil atau *residual* (Head, 1994). Proses inilah yang disebut dengan *direct shear slow reversal test*.

Penentuan kecepatan penggeseran ditentukan setelah melalui pengujian konsolidasi dengan pembebanan tertentu. Berdasarkan ASTM D3080/D3080M-11, kecepatan penggeseran (R_d) dapat dihitung dengan dengan Persamaan 1.

$$R_d = \frac{d_f}{t_f} \dots \dots \dots [1]$$

Perkiraan perpindahan lateral relatif pada saat keruntuhan (d_f) menggunakan asumsi 10 mm jika material adalah *normally consolidated-fine grained soils* dan 5 mm untuk jenis tanah lainnya. Perkiraan total waktu sampai keruntuhan (t_f) dihitung menggunakan Persamaan 2 atau Persamaan 3.

Persamaan 2 digunakan pada kondisi konsolidasi maksimum menghasilkan deformasi normal yang terdefinisi dengan baik pada kurva *log-time* yang diperpanjang hingga kompresi sekunder. Persamaan 3 digunakan apabila kurva *log-time* tidak memenuhi persyaratan tetapi terdefinisi dengan baik pada kurva akar waktu.

Analisis Hubungan antara *Fully Softened* dan *Residual Shear Strength* dengan *Liquid Limit (LL)*

Analisis hubungan antara *fully softened* dan *residual shear strength* dengan LL bertujuan untuk mengetahui pengaruh LL terhadap sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) serta pengaruh gaya normal terhadap kekuatan geser. Nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r yang diperoleh melalui pengujian *direct shear slow reversal* akan disandingkan dengan grafuk hubungan antara ϕ'_{fs} dan ϕ'_r dengan LL yang telah ada. Selain itu, grafik yang hubungan antara kekuatan geser dan tegangan normal akan dilakukan analisis perbandingan dengan grafik yang telah ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Titik koordinat sampel tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Titik Koordinat Sampel Tanah

Lokasi	Latitude	Longitude
Jalan Gombel Lama	7° 2'28.50"S	110°25'11.38"E
Jalan Tembus Jangli-Undip	7° 2'26.89"S	110°26'17.28"E
Jalan Kalialang Lama	7° 1'32.97"S	110°22'46.51"E

Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah

Tabel 2 merupakan hasil pengujian sifat fisis tanah.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah

No	Pengujian	Satuan	Lokasi		
			Gombel Lama	Jangli	Kalialang Lama
1	Kadar Air	%	33,29	34,63	29,09
2	Specific Gravity (Gs)	-	2,677	2,671	2,650
3	Tanah Basah Berat Isi (γ_b)	gr/cm ³	1,683	1,742	1,764
4	Liquid Limit (LL)	%	93,59	102,49	105,36
5	Plastic Limit (PL)	%	34,73	32,45	31,57
6	Platicity Index (PI)	%	58,86	70,04	73,79
7	Clay Fraction	%	54,22	64,33	51,87
8	Free Swell	%	160	355	300

Berdasarkan Tabel 2, nilai LL pada ketiga lokasi sampel sangat tinggi, yaitu antara 93,59% hingga 105,36% sehingga ketiga lokasi tersebut termasuk ke dalam kategori *high plasticity* menurut sistem klasifikasi USCS (Das & Sobhan, 2016). Sampel tanah pada ketiga lokasi juga memiliki nilai *clay fraction* lebih dari 50%.

Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

Kecepatan penggeseran pengujian *direct shear slow reversal* diperoleh dari fase konsolidasi. Masing-masing lokasi memiliki kecepatan penggeseran yang berbeda sesuai dengan hasil

konsolidasi. Kecepatan penggeseran untuk masing-masing lokasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kecepatan Penggeseran (Vg) Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

Lokasi	Beban (kg)	Vg (mm/menit)
Jangli	10,4	0,00059
	15,4	0,00089
	20,4	0,00093
Gombel Lama	10,4	0,00326
	15,4	0,00405
	20,4	0,00696
Kalialang	10,4	0,00072
	15,4	0,00094
	20,4	0,00079

Berdasarkan kecepatan penggeseran yang diperoleh, lama pengujian pada siklus pertama setiap penggeseran berkisar antara empat sampai dengan delapan hari untuk satu siklus. Setelah siklus pertama, dilakukan proses reversal. Siklus kedua dan seterusnya menggunakan kecepatan 0,024 mm per menit karena kecepatan penggeseran tidak memberikan pengaruh terhadap nilai *residual shear strength*. Hal ini dilakukan untuk menghemat waktu pengujian sehingga lama pengujian bisa dipercepat menjadi sekitar empat sampai enam jam untuk satu siklus.

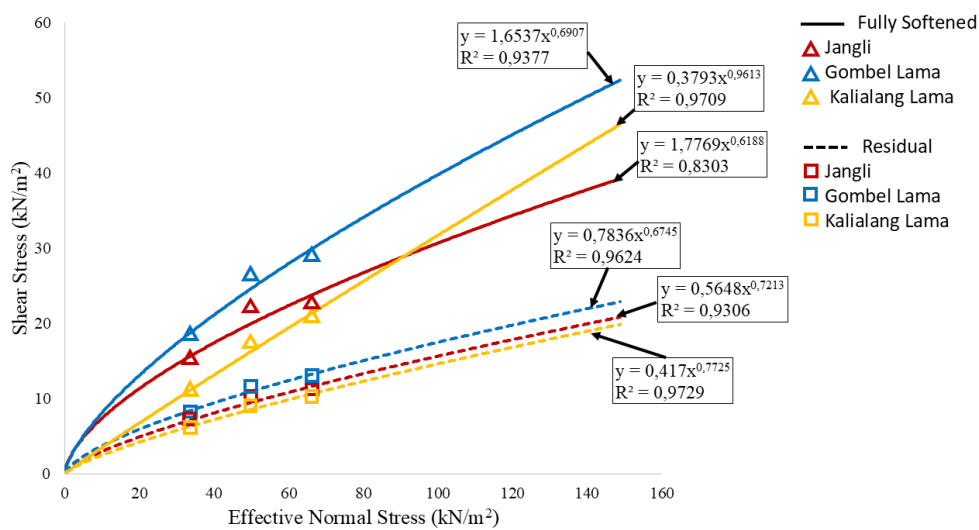
Hasil pengujian *direct shear slow reversal* untuk masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa setiap meningkatnya tegangan normal, maka nilai kuat geser akan meningkat. Nilai *fully softened shear strength* diperoleh dari nilai puncak kuat geser pada siklus pertama. Nilai *residual shear strength* mulai terlihat setelah siklus ketiga dan mulai stabil pada siklus kelima dan keenam. Nilai yang stabil tersebut yang disebut dengan nilai *residual shear strength*.

Hubungan antara nilai tegangan normal dengan kuat geser *fully softened* dan *residual* pada Gambar 4 disajikan dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan grafik dan persamaan Gambar 5 yang telah diekstrapolasi dan interpolasi untuk berbagai nilai tegangan normal diperoleh nilai tegangan geser dan sudut geser *fully softened* dan *residual* pada tegangan normal 50kN/m² dan 100 kN/m², hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 4. Hasil Pengujian Direct Shear Slow Reversal



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Effective Normal Stress dengan Kuat Geser Fully Softened dan Residual

Tabel 4. Sudut Geser Fully Softened dan Residual pada Tegangan Normal 50 dan 100 kN/m²

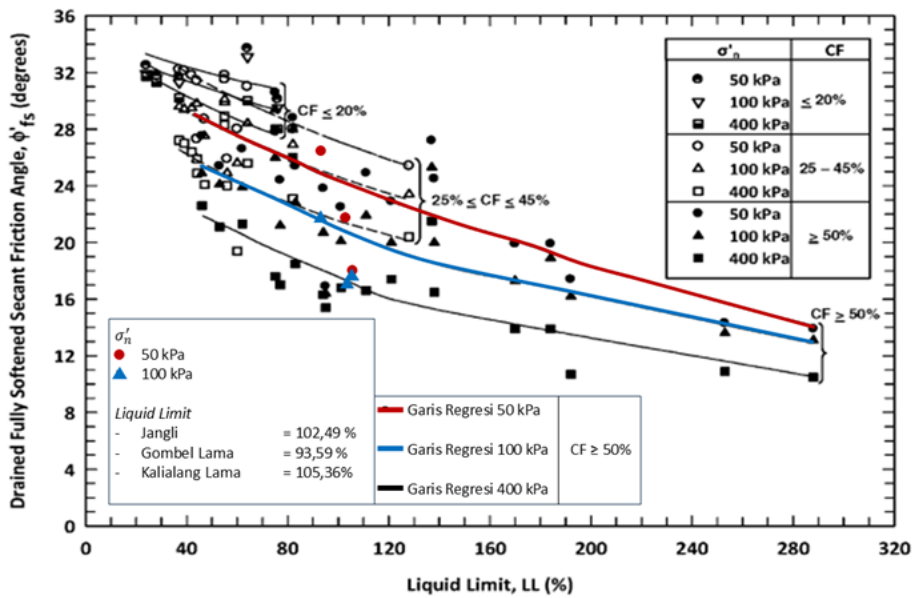
Lokasi	Tegangan Normal (σ') kN/m ²	Fully Softened		Residual	
		Tegangan Geser (τ) kN/m ²	Sudut Geser Fully Softened (ϕ'_s) Deg	Tegangan Geser (τ) kN/m ²	Sudut Geser Residual (ϕ'_r) Deg
Jangli, Semarang	50	19,998	21,799	9,492	10,749
	100	30,709	17,071	15,649	8,894
Gombel Lama, Semarang	50	24,657	26,249	10,966	12,370
	100	39,798	21,701	17,502	9,928
Kialialang Lama, Semarang	50	16,301	18,057	8,562	9,717
	100	31,738	17,609	14,626	8,321

Hasil Analisis Hubungan antara Fully Softened dan Residual Shear Strength dengan Liquid Limit

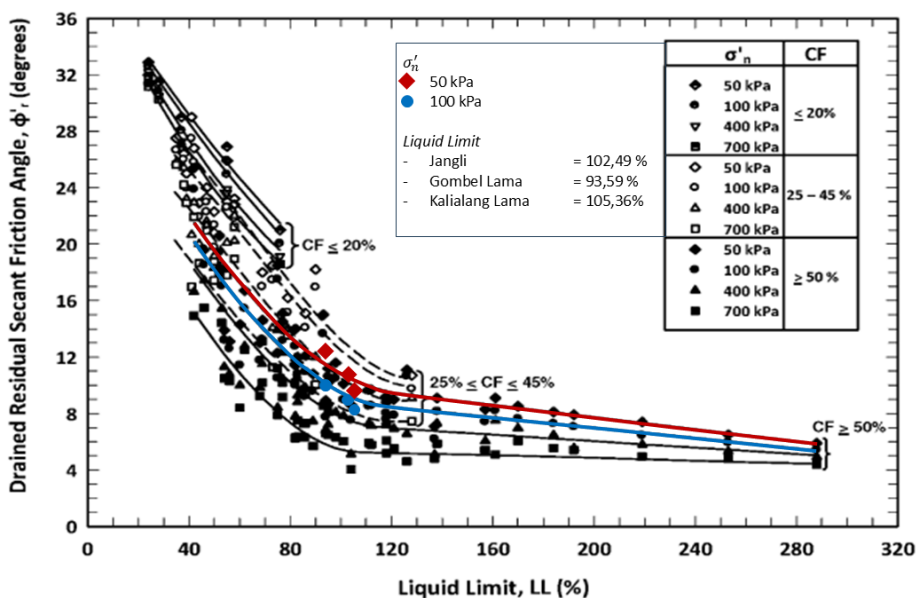
Nilai sudut geser yang diperoleh dari pengujian *direct shear slow reversal* dibandingkan dengan grafik hubungan antara *liquid limit* dengan sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) yang telah ada. Hasilnya disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Gambar 6 menunjukkan plot nilai ϕ'_{fs} yang diperoleh dari pengujian *direct shear slow reversal* pada tegangan normal 50 kPa (ditandai dengan lingkaran merah) dan tegangan normal 100 kPa

(ditandai dengan segitiga biru), berada di atas dan di bawah garis tren yang telah dibuat oleh Stark & Hussain (2013) namun masih berada dalam batas garis regresi. Hal ini ditunjukkan dengan posisi data hasil pengujian masih mengikuti sebaran data dan tren garis regresi yang ada, yaitu merah untuk tegangan normal 50 kPa dan garis biru untuk tegangan normal 100 kPa. Dengan demikian, hasil pengujian ini mendukung model empiris yang telah ada dan menunjukkan bahwa hubungan antara LL dan ϕ'_{fs} tetap konsisten dengan prediksi regresi yang telah dibuat.



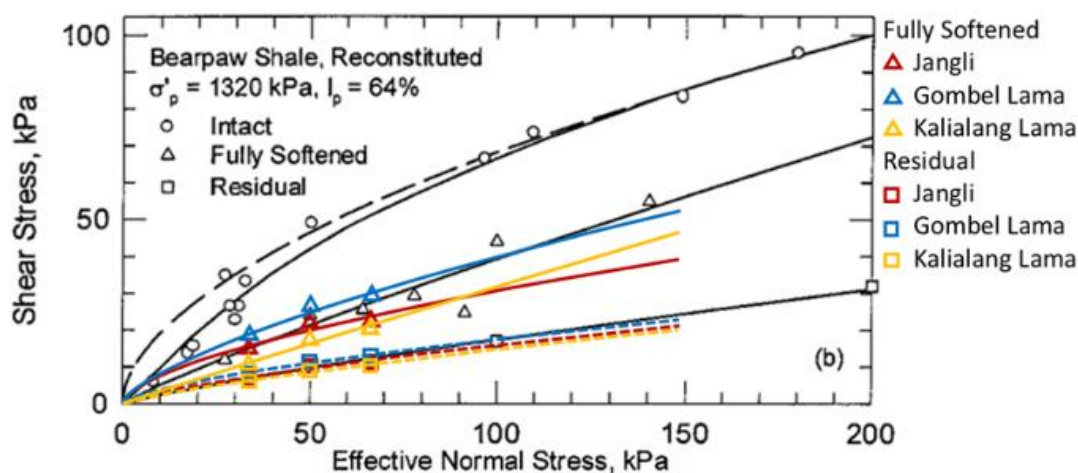
Gambar 6. Plot Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal* pada Grafik Hubungan Antara *Drained Fully Softened Secant Friction Angle* dengan LL, CF, Dan σ'_n untuk 73 Tanah Alami (Stark & Hussain, 2013)



Gambar 7. Plot Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal* pada Grafik Hubungan Antara *Drained Residual Secant Friction Angle* dengan LL, CF, Dan σ'_n untuk 73 Tanah Alami (Stark & Hussain, 2013)

Gambar 7 menunjukkan nilai ϕ'_r untuk tegangan normal 50 kPa (ditandai dengan belah ketupat merah) dan tegangan normal 100 kPa (ditandai dengan lingkaran biru) pada grafik hubungan antara LL dengan ϕ'_r yang telah ada. Nilai ϕ'_r yang diperoleh masih berada dalam batas garis regresi yang ada. Garis merah merepresentasikan tegangan normal 50 kPa dan garis biru untuk tegangan normal 100 kPa. Hal ini mengindikasikan bahwa hubungan LL dengan ϕ'_r masih mengikuti pola yang telah dikembangkan sehingga mendukung keakuratan model regresi yang digunakan.

Gambar 5 yang telah diekstrapolasi dan interpolasi untuk berbagai nilai tegangan normal dibandingkan dengan grafik hubungan antara kekuatan geser dan tegangan normal efektif pada *Bearpaw shale*. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Plot Gambar 4.3 Pada Grafik Hubungan Antara Kekuatan Geser dan Tegangan Normal Efektif pada *Bearpaw Shale*

Hasil yang ditampilkan pada Gambar 8 menunjukkan bahwa seluruh lokasi memiliki pola kurva tegangan geser yang meningkat seiring dengan kenaikan tegangan normal, memiliki bentuk dan tren kurva yang serupa dengan tanah *Bearpaw shale* yaitu non-linier dengan kecenderungan mendekati garis lurus pada tegangan normal yang lebih tinggi sehingga bisa dikatakan bahwa secara umum perilaku geser tanah antar lokasi memiliki kemiripan pola dengan tanah *Bearpaw shale* meskipun nilai kekuatannya berbeda.

KESIMPULAN

Hasil pengujian *direct shear slow* menunjukkan nilai hubungan antara LL dengan ϕ'_{fs} masih cukup menyebar namun nilai-nilai tersebut masih dianggap mengikuti sebaran/*scatter* data yang sudah ada. Nilai hubungan antara LL dengan ϕ'_r cenderung lebih dekat dengan garis regresi yang

telah ada pada *effective normal stress* 50 kPa dan 100 kPa dengan *clay fraction* $\geq 50\%$. Berdasarkan hasil plot dan analisis, nilai-nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r tersebut masih dalam batas garis regresi dan masih mengikuti sebaran data dari grafik yang ada, sehingga secara keseluruhan hubungan antara *liquid limit* terhadap sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) adalah semakin tinggi nilai *liquid limit* maka semakin rendah atau kecil nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r sesuai dengan tren garis yang sudah ada.

Kesesuaian hasil pengujian *direct shear slow reversal* dengan korelasi Stark & Hussain diperoleh dalam ruang lingkup penelitian ini, namun generalisasi hasil masih terbatas karena jumlah sampel yang relatif sedikit. Jumlah sampel yang terbatas menyebabkan hasil ini masih bersifat awal dan memerlukan verifikasi lebih lanjut dengan jumlah data yang lebih banyak

REFERENSI

- Adisurya, H. & Makarim, C. A. 2022. "Perilaku kegagalan konstruksi jalan raya yang bertumpu pada fondasi tiang di tanah *clay shale*," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 55–70.
- Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A., Nazir, R., Irsyam, M. & Himawan, A. 2015. "Shear strength degradation of Semarang–Bawen clay shale due to weathering process," *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 11, pp. 109–118.
- Andriansyah, A., Mulyono, M. N. & Aulia, M. R. 2025. "Slope stability in Gombel Lama: A Comparative Analysis of Peak, Fully Softened, and Residual Conditions", *Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 161–170.

- sDas, B. M. & Sobhan, K. 2016. “*Principles of Geotechnical Engineering*”, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. 2014. “*Soil Strength and Slope Stability*”, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Head, K. H. 1994. “*Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*”, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hunt, R. E. 2006. “*Characteristics of Geologic Materials and Formations: A Field Guide for Geotechnical Engineers*”, Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Kayyal, M. K. & Wright, S. G. 1991. “Investigation of long-term strength properties of Paris and Beaumont clays in earth embankments,” *Research Rep. 1195-2F*, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Lutton, R. J. 1975. “*Study of Clay Shale Slopes along the Panama Canal, Report 2: History, Geology, and Mechanics of Development of Slides in Gaillard Cut, Vol. I: Text*”, Soils and Pavements Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Mesri, G. & Shahien, M. 2003. “Residual shear strength mobilized in first-time slope failures,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, no. 1, pp. 12–30.
- Rogers, J. D. 2014. “The American engineers that built the Panama Canal,” in *Proc. Sessions Honoring the 100th Anniversary of the Panama Canal at the ASCE Global Engineering Conference*, Panama City, Panama, Oct. 7–11, 2014, pp. 112–349.
- Skempton, A. W. 1964. “Long-term stability of clay slopes,” *Géotechnique*, vol. 14, no. 2, pp. 77–102.
- Stark, T. D., Choi, H. & McCone, S. 2005. “Drained shear strength parameters for analysis of landslides,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 5, pp. 575–588.
- Stark, T. D. & Duncan, J. M. 1991. “Mechanisms of Strength Loss in Stiff Clays,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, pp. 139–154.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. 1997. “Slope stability analyses in stiff fissured clays,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 335–343.
- Stark, T. D. & Hussain, M. 2013. “Empirical correlations: Drained shear strength for slope stability analyses,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 6, pp. 853–862.
- Walkinshaw, J. L. & Santi, P. M. 1996. “Shales and Other Degradable Materials”, *Special Report—National Research Council, Transportation Research Board*, no. 247, pp. 555–576.
- Wright, S. G. 2005. “Evaluation of Soil Shear Strengths for Slope and Retaining Wall Stability Analyses with Emphasis on High Plasticity Clays”, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Wright, S. G., Zornberg, J. G. & Aguetant, J. E. 2007. “The fully softened shear strength of high plasticity clays,” Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.