

PERILAKU LINTASAN TEGANGAN HASIL UJI TRIAKSIAL PADA TANAH LEMPUNG KARAWANG

Puspa Ningrum¹ Hasbullah Nawir²

¹ Teknik Sipil Universitas Abdurrah
Jl. Riau Ujung No. 73, Pekanbaru Indonesia
email : puspa.ningrum@univrab.ac.id

² Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Bandung Indonesia

ABSTRACT

Generally, laboratory testing to determine the value of soil shear strength and stress path is triaxial test, especially for clay soil. In this research, the clay used for digital triaxial testing on axial compression (AC) stress path is Karawang clay soil, West Java, which have high plasticity (CH) in USCS classification. On pre-saturation process, a combination of vacuum and back pressure is used to speed up the saturation of the sample and to provide a high degree of saturation. Furthermore, the obtained soil parameters are used as inputs on finite element modeling which Mohr Coloumb and Hardening Soil model were used as the soil constitutive models. The results show that parameter optimization using hardening soil modeling has a behavior that is closer to the shape of the stress strain curve from laboratory tests.

Keywords: Clay soil, Axial compression, Stress Path, Triaxial Test

ABSTRAK

Pengujian laboratorium yang sering dilakukan untuk mengetahui nilai kuat geser tanah dan lintasan tegangan adalah dengan uji triaksial terutama untuk tanah lempung. Pada penelitian ini dilakukan pengujian triaksial dengan alat digital untuk kondisi axial compression (AC) menggunakan tanah lempung Karawang, Jawa Barat, dengan klasifikasi USCS adalah berplastisitas tinggi (CH). Ketika proses pra penjenuhan, digunakan kombinasi vacuum dan back pressure dengan tujuan mempercepat penjenuhan pada sampel dan memberikan tingkat kejenuhan yang tinggi. Selanjutnya parameter tanah yang diperoleh dijadikan input pada pemodelan elemen hingga, dimana model konstitutif tanah yang digunakan adalah Mohr Coloumb dan Hardening Soil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi parameter menggunakan pemodelan hardening soil memiliki perilaku yang lebih mendekati bentuk dari kurva stress strain yang dihasilkan dari tes laboratorium.

Kata Kunci: Tanah lempung, Axial compression, Lintasan tegangan, Uji Triaksial

1. Pendahuluan

Perilaku tentang tanah tidak hanya dapat diketahui dari kondisi awal dan akhir pembebanan, tetapi juga dari riwayat pembebanan. Fenomena tersebut dapat digambarkan dengan metode lintasan tegangan [1]. Pengujian laboratorium yang sering dilakukan untuk mengetahui nilai kuat geser tanah dan lintasan tegangan adalah dengan alat uji triaksial terutama untuk tanah lempung.

Dalam dunia *engineering* berdasarkan pembebanan yang ada, kondisi lapangan dapat dimodelkan di laboratorium dengan lintasan tegangan (*stress path*) meliputi *axial compression* (AC), *axial extension* (AE), *lateral extension* (LE), dan *lateral compression* (LC). Namun di Indonesia pada umumnya hanya menggunakan uji triaksial AC, dimana tanah mengalami pembebanan tekan arah aksial seperti yang terjadi pada kasus pembebanan pondasi dikarenakan kebanyakan masih menggunakan alat uji triaksial konvensional.

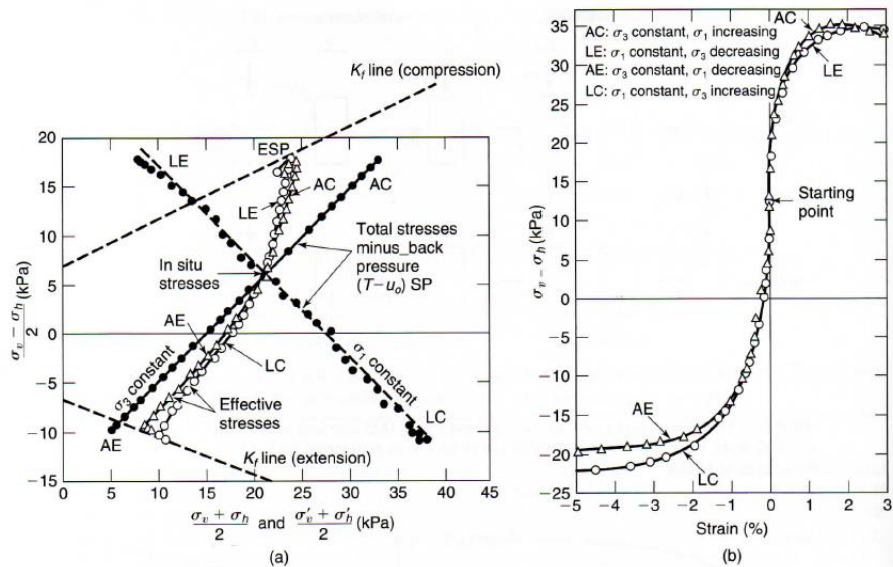
Penelitian menggunakan alat uji triaksial digital buatan Indonesia yang mencari perbandingan nilai kuat geser tanah dan lintasan tegangan untuk kondisi AC dan LE pada tanah *remolded* telah dilakukan Basarah [2]. Menghasilkan kesimpulan bahwa terdapat perbedaan perilaku pada lintasan tegangan yang berbeda, sehingga tidak memungkinkan hanya menggunakan satu jenis parameter kuat geser dalam perencanaan untuk berbagai kasus pembebanan di lapangan.

Berdasarkan penelitian yang ada sebelumnya, maka dilakukan penelitian mengenai parameter kuat geser untuk lintasan tegangan-regangan kondisi *axial compression* (AC) pada tanah lempung di daerah kawasan industri Karawang. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui perilaku lintasan tegangan (*stress path*) pada tanah lempung Karawang, sehingga parameter yang diperoleh dari hasil uji triaksial digital di laboratorium dapat merepresentasikan nilai parameter tanah *real* di lapangan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Lintasan Tegangan

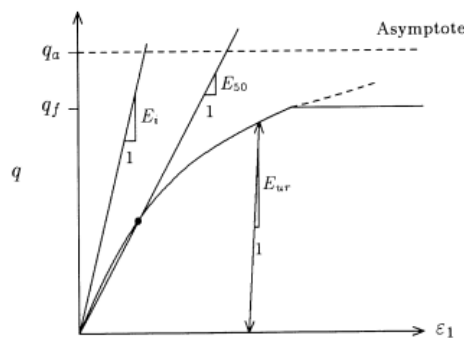
Bishop dan Wesley tahun 1975 [3] melakukan pengujian untuk tanah *Normally Consolidated* untuk melihat hasil *stress path* yang terjadi dengan variasi kemungkinan pembebanan pada kondisi lapangan untuk lintasan tegangan *Axial Compression* (AC), *Lateral Extension* (LE), *Axial Extension* (AE), dan *Lateral Compression* (LC). Hasilnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 1. (a) *Stress path* kondisi total dan efektif, (b) Grafik tegangan-regangan triaksial CU untuk tanah NC [3]

2.2 Modulus Tanah

Modulus pada tanah pada dasarnya adalah perbandingan antara *stress increment* dan *strain increment* (atau kemiringan) dari sebuah hubungan tegangan – regangan dari sebuah material. Berbagai macam jenis modulus dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. *Stress Point* dan *Stress Path* [3]

2.3 Model Konstitutif Tanah

Perilaku tanah dimodelkan dengan tingkat keakuratan yang bervariasi. Untuk pemodelan tanah yang sederhana seperti Hukum Hooke yang melibatkan dua parameter yaitu modulus Young (E) dan *poisson's ratio* (ν). Sedangkan untuk pemodelan tanah yang lebih kompleks melibatkan lebih dari dua parameter tanah seperti *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil*, dan *Soft Soil*.

Model konstitutif *Mohr-Coulomb* merupakan model konstitutif tanah yang paling sederhana. Kondisi perubahan tegangan-regangan pada model ini diasumsikan elastic-perfectly plastic. Sebagai parameter elastik, model ini menggunakan Modulus Young (E) dan *poisson's ratio* (ν), sedangkan untuk parameter yang mendefinisikan kriteria keruntuhan yaitu kohesi (c) dan sudut geser (φ).

Menurut Schanz (1998) [4] model *hardening soil* merupakan model tingkat lanjut untuk mensimulasikan perilaku tipe tanah yang berbeda, dari tanah lunak hingga tanah keras. Ketika menerima beban deviator utama, tanah umumnya menunjukkan penurunan kekakuan dan secara simultan terbentuk regangan plastis yang tidak dapat kembali seperti semula. Konsep dasar dari *hardening soil* adalah hubungan hiperbolik antara regangan vertikal kekakuan dan regangan plastis terbentuk secara simultan. Model *hardening soil* telah menggunakan teori plastisitas dan bukan lagi teori elastisitas. Selain itu model ini telah mengikutsertakan dilatansi dari tanah.

3. Metode Penelitian

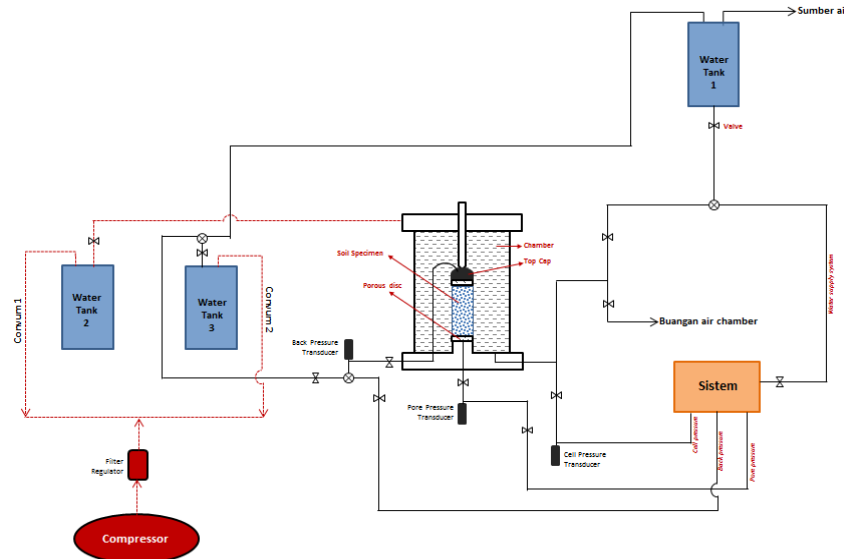
Penelitian yang akan dilakukan mencakup uji laboratorium dan analisis numerik dengan bantuan *software* PLAXIS. Pengujian terhadap sampel dilakukan di laboratorium yang terdiri dari pengujian karakteristik fisis yang meliputi analisa saringan, kadar air, konsistensi tanah, dan berat jenis. Selanjutnya dilakukan pengujian sifat mekanis tanah untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah menggunakan alat uji triaksial digital.

Tabel 1. Jenis pengujian dan jumlah sampel

Pengujian	Pedoman	Jumlah sampel		Total
		Kedalaman 1,5 - 2 m	Kedalaman 3,5 - 4 m	
Analisa saringan (<i>sieve analysis</i>)	ASTM D 422 - 63(2007)E2	1	1	2
Analisa Hidrometer (<i>hydrometer analysis</i>)		1	1	2
Kadar air (<i>water content</i>)	ASTM D 2216 - 10	3	3	6
Berat Jenis (<i>specific gravity</i>)	ASTM D 854 - 10	3	3	6
Batas cair (<i>Liquid Limit</i>)	ASTM D 4318 - 10	4	4	8
Batas plastis (<i>Plastic Limit</i>)		2	2	4
Uji triaksial CU (<i>CU triaxial test</i>)	ASTM D 4767 - 11	3	3	6

Agar diperoleh hasil penelitian yang memuaskan maka perlu menentukan ketepatan metode dalam pelaksanaan penelitian. Adapun metode pelaksanaan untuk tahapan uji triaksial digital dimulai dari proses pembuatan sampel, lalu dilanjutkan proses pra penjenjuran dengan menggunakan *vacuum*, pembacaan B value, proses konsolidasi, hingga proses *shearing*.

Berikut ini ilustrasi skema kerja alat triaksial digital yang telah ditambahkan komponen tekanan negatif.

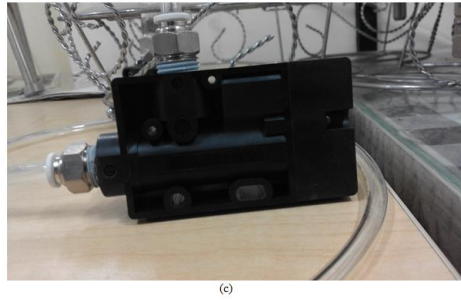


Gambar 3. Ilustrasi skema kerja alat triaksial digital

Merujuk pada penelitian yang dilakukan Tatsuoka *et al* [5] yang menyebutkan bahwa untuk membuat tanah lempung kondisi jenuh, pemilihan metode persiapan *dry setting method* (DSM) maupun metode konvensional *wet setting method* (WSM) bergantung pada tujuan dilakukannya penelitian, apabila ingin mendapatkan tingkat kejenuhan dengan nilai yang tinggi namun dengan waktu relatif tidak lama, jelas bahwa DSM sangat direkomendasikan. Oleh karena itu dalam penelitian ini menggunakan kombinasi *vaccum* dan *back pressure* untuk menghasilkan tingkat kejenuhan yang tinggi ketika proses pra penjenuhan, dengan tujuan mempercepat mengeluarkan udara yang terperangkap pada selang aliran air dari pori menuju spesimen.

Selain itu juga diperlukan penambahan alat berupa tabung *Water Tank* yang terhubung dengan sumber tekanan negatif (*convum*) melalui selang berdiameter 6 mm. Tabung *Water Tank* ini berfungsi sebagai wadah penampungan air yang keluar dari selang aliran *back pressure* dan *cell pressure* akibat *flushing*. Agar tekanan yang dihasilkan oleh *Convum* tetap stabil, perlu dipasang *filter regulator* yang terhubung dari alat kompressor sebagai sumber penghasil tekanan.





Gambar 4. Komponen tambahan pada alat triaksial (a) *Water tank*, (b) *Filter regulator*, (c) *Convum*

Pada pengujian ini menggunakan alat triaksial digital yang memiliki spesifikasi proses penggeseran untuk lintasan tegangan AC, menggunakan *strain rate* yang konstan terhadap waktu. Untuk proses *shearing* uji triaksial dengan lintasan tegangan AC, digunakan kecepatan *strain rate* 0,05 mm/menit.

4. Hasil Percobaan

4.1 Hasil pengujian indeks properti tanah

Data-data yang diperoleh dari penelitian ini berasal dari serangkaian pengujian yang dilaksanakan di laboratorium menggunakan tanah lempung yang berasal dari wilayah Karawang, Jawa Barat.

Tabel 2. Hasil uji indeks properti tanah

Parameter	Simbol	Kedalaman (m)		Satuan
		1,5 - 2	3,5 - 4	
USCS Chart		CH	CH	-
Berat jenis	Gs	2,68	2,56	-
Berat isi tanah basah	γ_{wet}	17,8	17,5	kN/m ³
Berat isi tanah kering	γ_{dry}	11,6	11,2	kN/m ³
Kadar air	w	56,05	54,08	%
Batas cair	LL	80,47	93,67	%
Batas plastis	PL	28,39	32,52	%
Indeks plastisitas	PI	52,08	61,15	%
Lolos saringan no.200		99,29	100	%
Tekanan pra konsolidasi	Pc'	60	85	kN/m ²

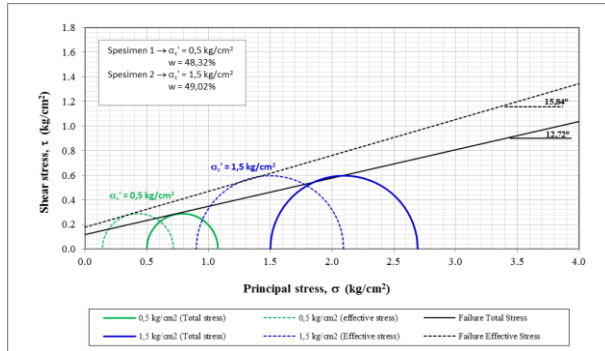
4.1 Hasil pengujian triaksial

Pada pengujian ini menggunakan alat triaksial digital yang memiliki spesifikasi proses penggeseran untuk lintasan tegangan AC, menggunakan *strain rate* yang konstan terhadap waktu. Pengujian triaksial dilakukan pada kondisi konsolidasi tak terdrainase (*consolidated undrained*). Parameter kuat geser yang dihasilkan dari uji triaksial adalah nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) yang diperoleh dari lingkaran mohr, sedangkan untuk parameter modulus kekakuan tanah (E_{50}) diperoleh dari grafik hubungan tegangan regangan.

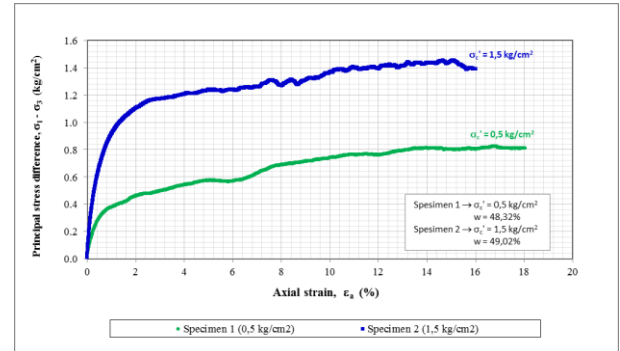
Pada uji triaksial dengan lintasan tegangan AC, digunakan kecepatan *strain rate* 0,05 mm/menit dengan nilai tekanan *confining* sebesar 0,5 kg/cm², 1 kg/cm², dan 1,5 kg/cm² agar memperoleh lingkaran mohr berbeda dengan garis keruntuhan yang sama. Pengujian

Perilaku Lintasan Tegangan Hasil Uji Triaksial pada Tanah Lempung Karawang dilakukan pada 2 kedalaman tanah berbeda, yaitu 1,5 – 2m dan 3,5 – 4m. Berikut ini grafik yang dihasilkan dari uji triaksial lintasan tegangan *axial compression* (AC).

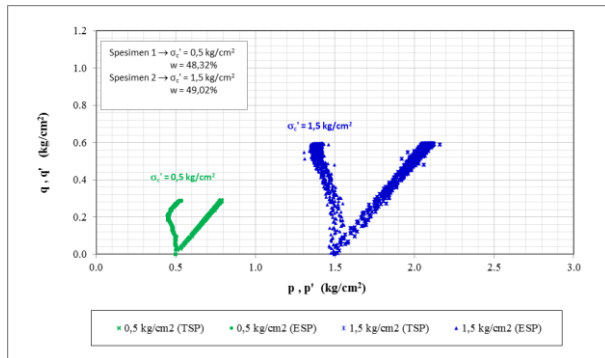
1. Kedalaman 1,5 – 2m



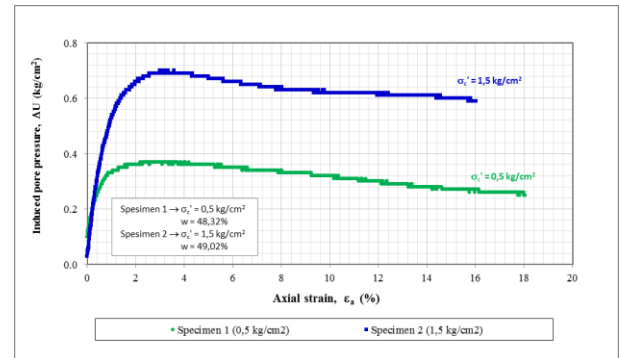
Gambar 5. Lingkaran mohr lintasan tegangan AC



Gambar 7. Grafik hubungan tegangan regangan



Gambar 6. Grafik lintasan tegangan *axial compression* (AC)

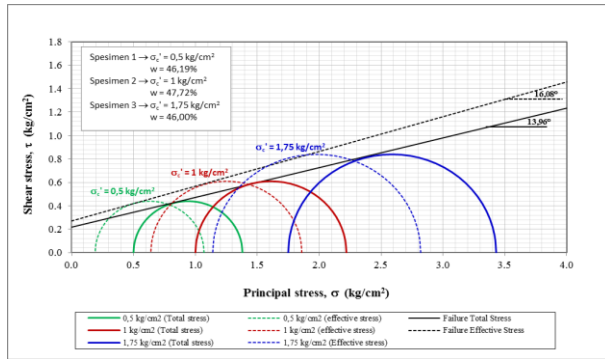


Gambar 8. Grafik perubahan tekanan pori terhadap regangan

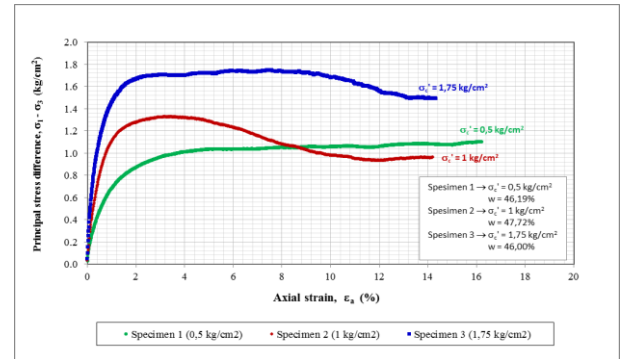
Tabel 3. Parameter kuat geser hasil uji triaksial lintasan tegangan AC

	$\Delta\sigma_{maks}$ (kg/cm ²)	σ_3 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	σ_3' (kg/cm ²)	σ_1' (kg/cm ²)	Sudut Geser (°)		Koehsi (kg/cm ²)		B Value	w (%)
						ϕ	ϕ'	c	c'		
Spesimen 1	0,58	0,5	1,08	0,14	0,72	12,72	15,84	0,118	0,178	0,9	48,32
Spesimen 2	1,19	1,5	2,69	0,90	2,09						

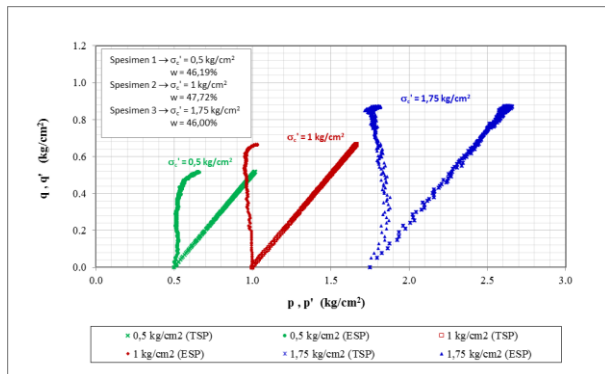
2. Kedalaman 3,5 – 4m



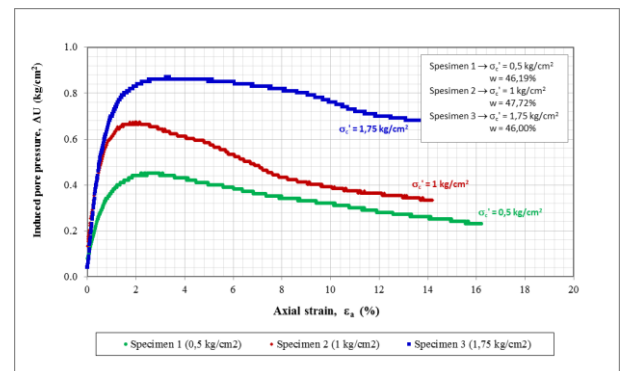
Gambar 9. Lingkaran mohr lintasan tegangan AC



Gambar 11. Grafik hubungan tegangan regangan



Gambar 10. Grafik lintasan tegangan axial compression (AC)



Gambar 12. Grafik perubahan tekanan pori terhadap regangan

Tabel 4. Parameter kuat geser hasil uji triaksial lintasan tegangan AC

	$\Delta\sigma_{maks}$ (kg/cm ²)	σ_3 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	σ_3' (kg/cm ²)	σ_1' (kg/cm ²)	Sudut Geser (°)		Kohesi (kg/cm ²)		B Value	w (%)
						ϕ	ϕ'	c	c'		
Spesimen 1	0,88	0,50	1,38	0,19	1,07	13,96	16,08	0,218	0,271	0,83	46,19
Spesimen 2	1,22	1,00	2,22	0,64	1,86					0,88	47,72
Spesimen 3	1,68	1,75	3,43	1,14	2,82					0,89	46,00

4.3 Hasil modulus kekakuan (E_{50})

Sesuai literatur pada buku *Triaxial Testing of Soils* [6] adapun rumus regangan yang digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan grafik hubungan tegangan-regangan, yaitu sebagai berikut:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \text{ dimana aksial strain bernilai positif} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \text{ dimana radial strain bernilai negatif} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (3)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *radial strain* ($\varepsilon_r\%$) lebih kecil dibandingkan

Perilaku Lintasan Tegangan Hasil Uji Triaksial pada Tanah Lempung Karawang nilai *axial strain* ($\epsilon_a\%$) dan *shear strain* ($\gamma\%$). Untuk pengujian *undrained* pada tanah jenuh, dengan nilai *volumetric strain* = 0, maka nilai *shear strain* ($\gamma\%$) mendekati *axial strain* ($\epsilon_a\%$).

Untuk penentuan nilai kekakuan tanah (E_{50}), dapat diperoleh dari grafik hubungan tegangan-regangan, dimana nilai untuk regangan menggunakan nilai *axial strain* ($\epsilon_a\%$), *radial strain* ($\epsilon_r\%$), dan *shear strain* ($\gamma\%$).

Tabel 5. Resume nilai E_{50} hasil uji laboratorium dari berbagai tipe regangan

Kedalaman (m)	Jenis Lintasan Tegangan	σ_c' (kg/cm ²)	B Value	Nilai E_{50} (kPa)		
				Axial Strain (ϵ_a) %	Radial Strain (ϵ_r) %	Shear Strain (γ) %
1,5 - 2	Axial Compression (AC)	0.50	0.90	6338	12673	6337
		1.50	0.90	15132	30284	15135
3,5 - 4	Axial Compression (AC)	0.50	0.83	8773	17596	8781
		1.00	0.88	17740	35515	17746
		1.75	0.89	28269	57639	28504

Dalam penelitian ini, untuk lintasan tegangan AC menggunakan nilai E_{50} yang dihasilkan dari grafik tegangan-regangan menggunakan nilai *axial strain* ($\epsilon_a\%$) sesuai dengan kasus pertambahan beban, yang nantinya nilai E_{50} tersebut akan dioptimasi menggunakan plaxis 2D.

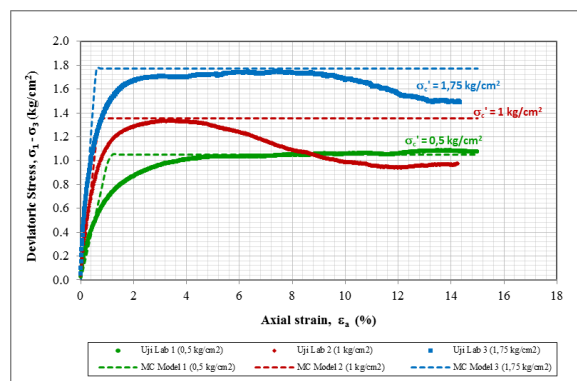
Selanjutnya nilai modulus kekakuan tanah (E_{50}) yang digunakan pada lintasan tegangan untuk setiap kedalaman, nilainya diambil berdasarkan interpolasi dari tegangan pra konsolidasi pada masing-masing kedalaman tanah. Untuk kedalaman 1,5 - 2m menggunakan nilai $P_c' = 0,6 \text{ kg/cm}^2$ dan untuk kedalaman 3,5 - 4m menggunakan nilai $P_c' = 0,85 \text{ kg/cm}^2$.

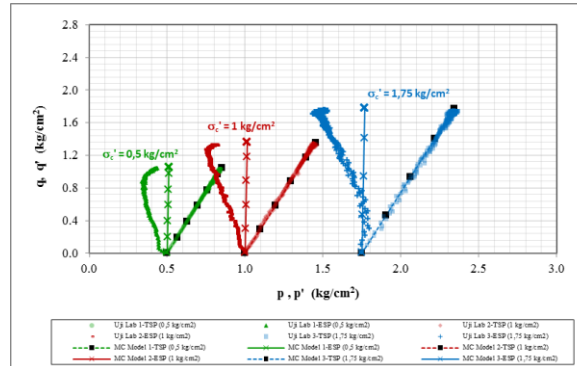
Tabel 6. Nilai E₅₀ hasil uji laboratorium yang digunakan

Kedalaman (m)	Jenis Lintasan Tegangan	σ_c' (kg/cm ²)	B Value	Nilai E ₅₀ (kPa) Axial Strain (ϵ_a) %
1,5 - 2	Axial Compression (AC)	0.50	0.90	6338
		1.50	0.90	15132
		0.60	-	7217
3,5 - 4	Axial Compression (AC)	0.50	0.83	8773
		1.00	0.88	17740
		1.75	0.89	28269
		0.85	-	14650

4.4 Pemodelan tanah menggunakan *Mohr Coloumb*

Parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan ini diambil dari parameter yang diperoleh dari uji laboratorium. Analisis numerik dilakukan dengan metode tegangan efektif, parameter kuat geser efektif didapatkan dari hasil uji triaxial CU di Laboratorium. Pada pemodelan *Mohr Coulomb*, pemodelan dilakukan secara sederhana dengan menggambarkan kondisi *stress strain* yang terjadi adalah elastik – plastik sempurna, dimana membutuhkan total lima buah parameter yaitu E (modulus young), c' (kohesi), ϕ' (sudut geser), ν (angka poisson), dan ψ (sudut dilatansi). Parameter E yang digunakan adalah modulus sekan pada 50% kekuatan (E₅₀). Untuk lempung menggunakan nilai ν berkisar 0,3-0,45, sedangkan $\psi=0$ karena tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatansi sama sekali.

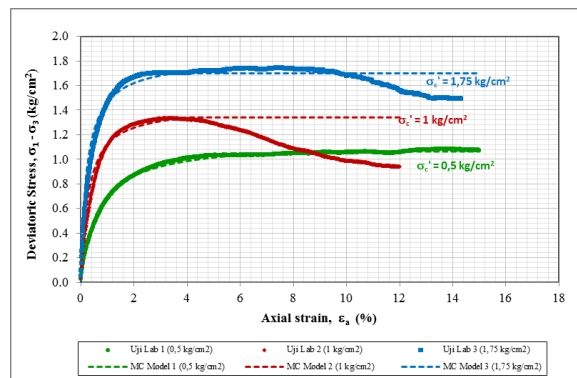


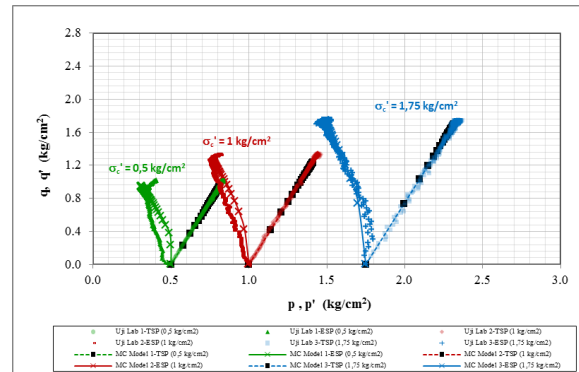


Gambar 13. Grafik hasil optimasi parameter AC menggunakan *Mohr Coloumb model*

4.5 Pemodelan tanah menggunakan *Hardening Soil*

Model *Hardening Soil* menggunakan tiga (3) nilai parameter deformasi, yaitu E_{50} , E_{oed} , dan E_{ur} . Penentuan nilai E_{50} pada *hardening soil* sama dengan E_{50} pada model *Mohr Coloumb*. Sedangkan untuk E_{oed} memiliki korelasi sama dengan E_{50} ($E_{oed} = E_{50}$) dan E_{ur} memiliki korelasi tiga kali nilai E_{50} ($E_{ur} = 3 \times E_{50}$). Pada pemodelan dengan menggunakan *Hardening Soil*, perilaku tegangan-regangan yang dimodelkan memiliki perilaku yang lebih mendekati bentuk dari kurva *stress strain* yang dihasilkan dari tes laboratorium.





Gambar 14. Grafik hasil optimasi parameter AC menggunakan *Hardening Soil model*

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan mengenai perilaku lintasan tegangan pada uji triaksial digital, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan lintasan tegangan *axial compression* (AC), diperoleh nilai parameter kuat geser efektif (c', ϕ') lebih besar daripada parameter kuat geser total (c, ϕ).
2. Optimasi parameter menggunakan pemodelan *hardening soil* memiliki perilaku yang lebih mendekati bentuk dari kurva *stress strain* yang dihasilkan dari tes laboratorium.

Saran untuk penelitian selanjutnya, dalam analisis galian disarankan menggunakan parameter tanah yang sesuai dengan lintasan tegangan yang terjadi, yaitu *lateral extension* (LE) untuk area sisi dinding galian. Parameter tanah untuk lintasan tegangan LE dapat diperoleh langsung dari uji triaksial LE maupun dari hasil korelasi terhadap parameter tanah hasil lintasan tegangan AC. Sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan studi mengenai perilaku lintasan tegangan yang diperoleh dalam penelitian ini, menggunakan tanah lempung Karawang, apakah relevan untuk perilaku tanah uji lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] Fachrurrozi, Wildan., Hardiyatmo, H Christady., Suryolelono, Kabul B. 2003. *Perilaku Lintasan Tegangan (Stress Path) pada Tanah Gambut Rawaseragi Lampung*. Jurnal Teknosains.
- [2] Basarah, Ghodzalfan F. 2016. *Studi Pengujian Perbandingan Nilai Kuat Geser Tanah dan Stress Path Antara Axial Compression dan Lateral Extension*

- Menggunakan Triaxial Digital*. Tesis Program Magister Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [3] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C. 2011. *An Introduction To Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- [4] Plaxis 2D – Versi 8 Panduan Manual. 2007. Technical University of Delft, Belanda.
- [5] Tatsuoka, Fumio., Ampadu. 1993. *Effect of Setting Method on the Behavior of Clays in Triaxial Compression from Saturation to Undrained Shear*. Journal of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Lade, Poul V. 2016. *Triaxial Testing of Soils*. Wiley Blackwell, United Kingdo