

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Setelah dilakukan pengujian di laboratorium, hasil dan data yang diperoleh diolah dan dianalisis sedemikian rupa untuk didapatkan kesimpulan sesuai tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Hasil olah data disajikan secara singkat dan padat. Hasil pengolahan data pelengkap yang lebih detil akan dilampirkan di bagian akhir laporan ini.

Adapun parameter-parameter yang ingin diketahui dari rangkaian pengujian ini antara lain : kadar air tanah kaolin pada kondisi asli, properti indeks dari tanah kaolin (*Atterberg Limit*, berat spesifik (*G_s*), dan analisa hidrometer), kadar air dan berat isi sebelum dan setelah pencetakan sampel, nilai kohesi (*c*) dan sudut geser (ϕ) dari pengujian triaksial tekan terkonsolidasi-tak terdrainasi (*CU*) metode konvensional (*single stage*) dan *multistage*. Hasil yang diperoleh dari pengolahan data, terutama nilai parameter kekuatan geser tanah (*c* dan ϕ) akan dijadikan pembahasan mengenai perbandingan antara metode pengujian triaksial *CU single stage* dengan *multistage*. Selain itu juga beberapa catatan-catatan penting selama pengujian triaksial *CU multistage* juga akan dipaparkan pada pembahasan ini.

4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Sifat-Sifat Fisik Tanah (*Index Properties*)

Pada bagian ini akan dipaparkan mengenai properti indeks dari material tanah kaolin yang dijadikan bahan dasar pembuatan benda uji triaksial, dimana nilai-nilainya tersebut diperoleh dari masing-masing jenis pengujian properti indeks tersebut.

4.2.1 Kadar Air Asli

Berikut adalah hasil pengujian kadar air asli dari material kaolin yang dijadikan sebagai material dasar dalam pembuatan sampel untuk benda uji triaksial. Sampel ini diambil langsung dari karung yang digunakan untuk menyimpan material tersebut.

Tabel 4.1 Hasil pengujian kadar air asli pada kaolin.

No. can		#C1	#D	#2A	#D2
Berat can	(w_1)	8,76	9,1	8,64	8,72
Berat tanah basah + can	(w_2)	19,63	21,74	22,65	23,79
Berat tanah kering + can	(w_3)	19,5	21,58	22,46	23,58
Berat air	($w_4=w_2-w_3$)	0,13	0,16	0,19	0,21
Berat tanah kering	($w_5=w_3-w_1$)	10,74	12,48	13,82	14,86
Kadar air asli (w_o)	($w_4/w_5 \times 100\%$)	1,21%	1,28%	1,37%	1,41%
Kadar air asli rata-rata (w_o)		1,32%			

Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa material kaolin yang berada dalam karung tersebut dapat dikatakan relatif kering. Dengan demikian kadar air asli rata-rata sebesar 1,32% tersebut dapat dijadikan acuan dasar dalam proses pembuatan sampel untuk benda uji triaksial.

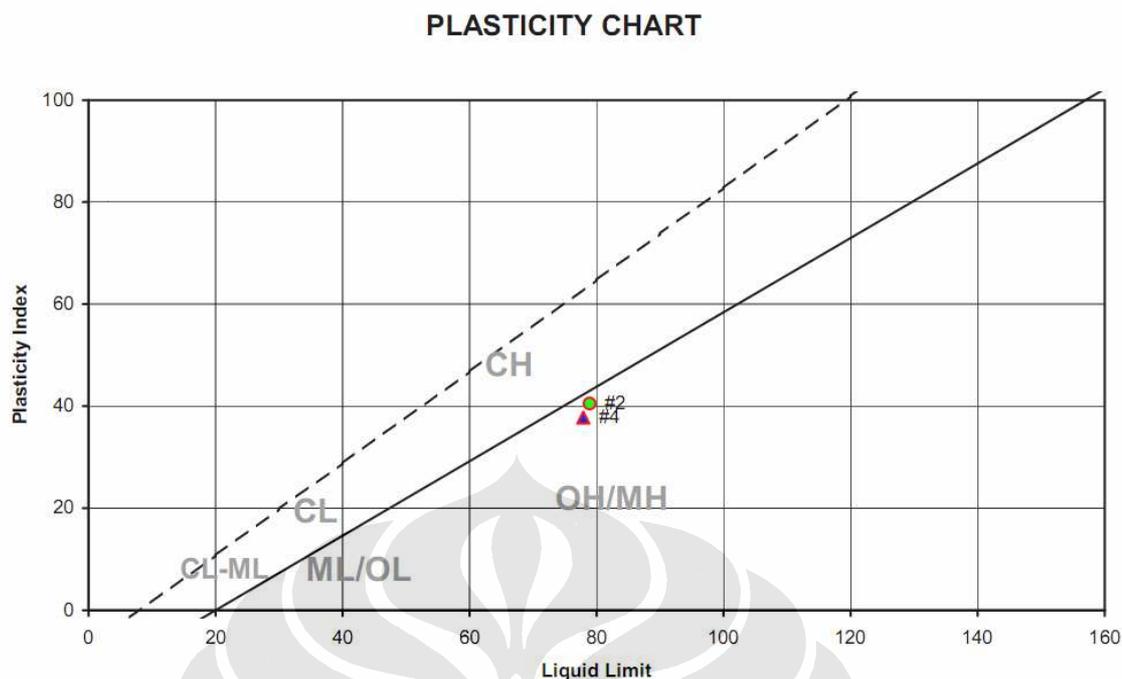
4.2.2 Atterberg Limit

Pada proses pengujian ini, material kaolin yang digunakan untuk pembuatan sampel akan dilihat nilai dari *property Atterberg Limit* yang meliputi Batas Cair (*Liquid Limit / LL*), Batas Plastis (*Plastic Limit / PL*), dan Indeks Plastisitas (PI). Dari pengujian yang telah dilakukan, nilai-nilai *property Atterberg Limit* yang diperoleh adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2 Ringkasan hasil pengujian *Atterberg Limit* pada kaolin.

	<i>LL</i>	<i>PL</i>	<i>PI</i>	Klasifikasi (<i>Unified system</i>)
Tes no.1	76,80	-	-	-
Tes no.2	78,90	38,40	40,50	MH/OH
Tes no.3	77,10	-	-	-
Tes no.4	77,90	40,17	37,73	MH/OH
Rata-rata	77,68	39,29	39,11	MH/OH

Adapun rentang nilai *Atterberg Limit* untuk lempung *kaolinite* yaitu *LL* antara 30 – 110 dan *PL* antara 25 – 40. Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa nilai *LL* dan *PL* yang diperoleh masih berada dalam rentang nilai tanah lempung kaolin, dan berdasarkan sistem klasifikasi *unified* tergolong jenis lanau elastis (MH) atau tanah lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi (OH). Untuk data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.1 Grafik Plasticity Chart hasil pengujian Atterberg Limit pada kaolin.

4.2.3 Specific Gravity (G_s)

Dalam pengujian ini, didapatkan bahwa material kaolin yang akan digunakan untuk pembuatan sampel benda uji triaksial memiliki nilai *Specific Gravity* (G_s) rata-rata sebesar 2,60. Nilai G_s ini berada dalam rentang 2,60 – 2,63 yang merupakan kisaran nilai G_s untuk tanah jenis lempung *kaolinite*. Hasil perhitungan nilai G_s ini untuk lengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

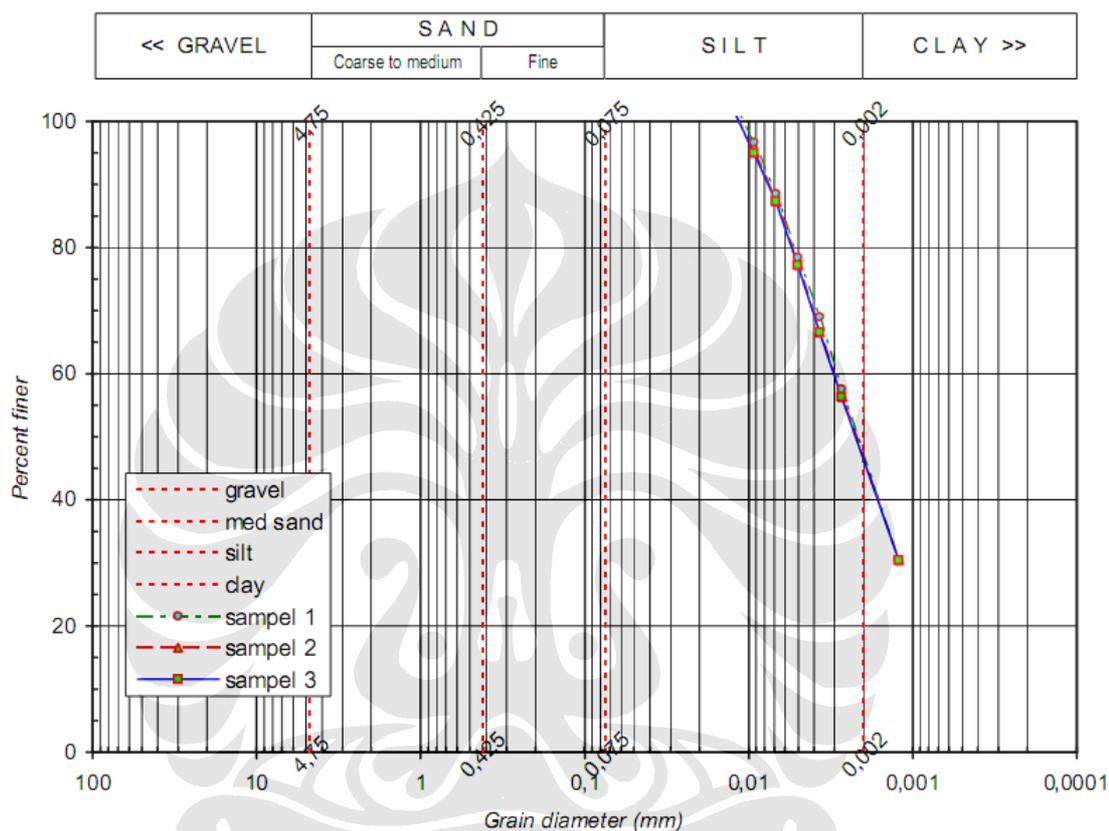
4.2.4 Analisa Hidrometer

Material kaolin yang digunakan untuk membuat sampel benda uji triaksial ini memiliki butiran yang keseluruhannya lolos dari saringan no.200 (0,075 mm), sehingga untuk menganalisa komposisi ukuran butiran material halus ini digunakan analisa hidrometer. Berikut ini adalah ringkasan hasil pengujian hidrometer yang telah dilakukan.

Tabel 4.3 Ringkasan hasil pengujian hidrometer pada kaolin.

Komposisi	Tes no.1	Tes no.2	Tes no.3	Rata-Rata
Pasir (<i>sand</i>)	0%	0%	0%	0%
Lanau (<i>silt</i>)	53%	52%	53%	52,7%
Lempung (<i>clay</i>)	47%	48%	47%	47,3%
Klasifikasi	<i>Silty clay</i>	<i>Silty clay</i>	<i>Silty clay</i>	<i>Silty clay</i>

Dari hasil analisa hidrometer ini dapat dilihat bahwa rata-rata kandungan dari material kaolin ini terdiri dari material ukuran butiran lanau (*silt*) sebesar 52,7% dan lempung (*clay*) sebesar 47,3%. Dengan demikian material kaolin ini tergolong tanah jenis lempung kelanauan (*silty clay*). Untuk data selengkapnya dari pengujian ini dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.2 Grafik *grain size distribution* pada kaolin.

4.3 Hasil dan Pembahasan Pembuatan Sampel Benda Uji Triaksial

Pada bagian ini akan disajikan mengenai parameter-parameter apa saja yang dicatat dalam proses pembuatan benda uji triaksial dari material kaolin. Adapun parameter-parameter tersebut antara lain yaitu :

- nilai kadar air awal dan berat unit awal pada saat pengadukan dan pencetakan ke dalam cetakan.
- grafik penurunan tinggi benda uji dalam cetakan dan kecepatan penurunan benda uji selama dalam proses pemadatan / pembebanan.

- nilai kadar air akhir dan berat unit akhir setelah mengalami proses pemadatan / pembebanan selama durasi waktu tertentu.

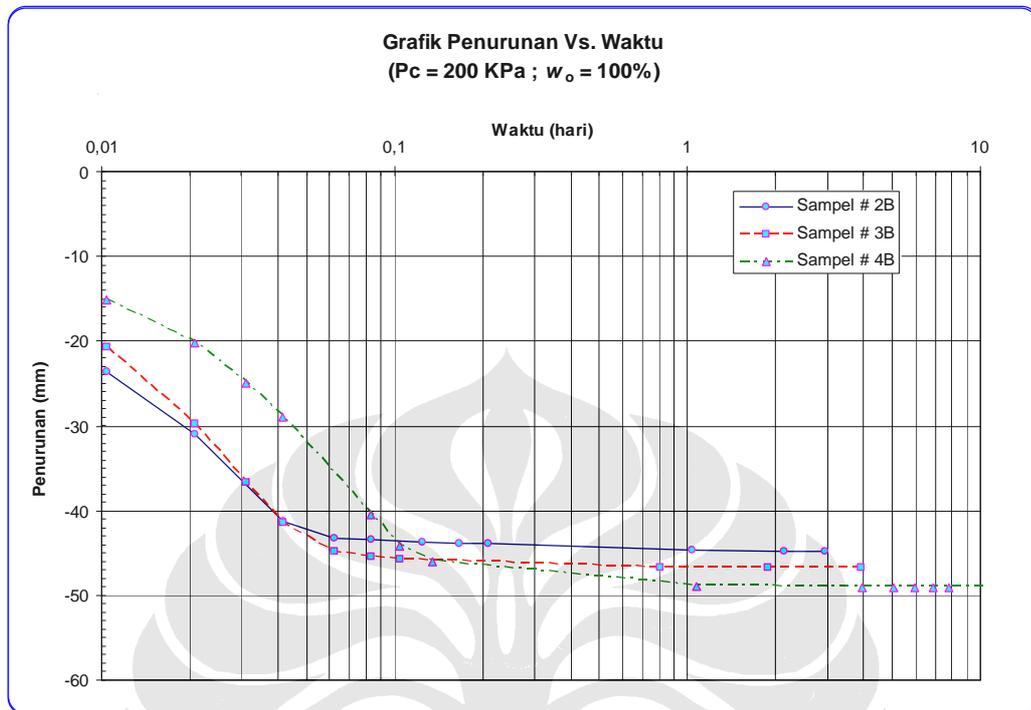
Keseluruhan benda uji yang dibuat dari cetakan ini diberikan beban prakonsolidasi sebesar 200 kPa selama durasi waktu tertentu untuk proses pemadatannya. Parameter-parameter seperti yang telah disebutkan di atas dapat dilihat pada tabel dan grafik berikut ini. Untuk data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 4.4 Ringkasan parameter-parameter yang dicatat pada proses pembuatan benda uji triaksial.

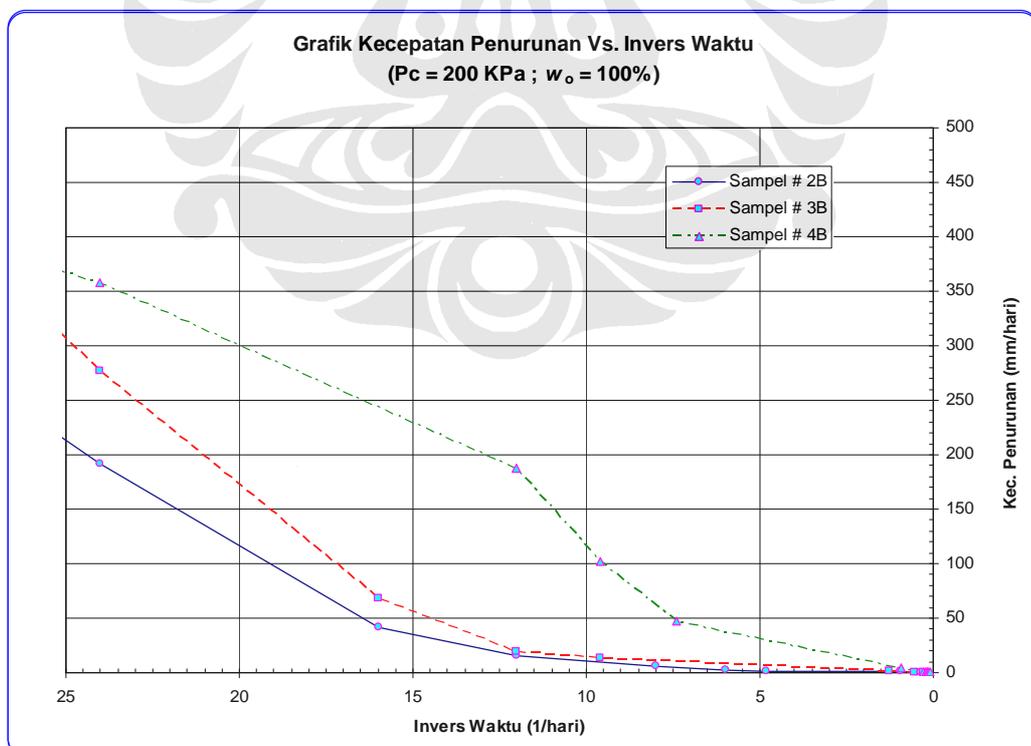
Kode sampel / cetakan	#2B	#3B	#4B
Tanggal pengadukan / pencetakan	23-Sep-08	6-Nov-08	13-Nov-08
Tanggal selesai pemadatan / pembebanan	26-Sep-08	10-Nov-08	24-Nov-08
Lamanya pemadatan / pembebanan	±3 hari	±4 hari	±10 hari
Kadar air awal (w_o)	95,71%	99,43%	99,70%
Kadar air akhir (w_c)	55,53%	56,38%	53,14%
Selisih kadar air (akhir-awal)	-40,18%	-43,05%	-46,56%
Berat unit awal (γ_{n-o})	1,43	1,46	1,45
Berat unit akhir (γ_{n-c})	1,65	1,67	1,64
Selisih berat unit (akhir-awal)	0,22	0,20	0,19

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa kadar air dan berat unit dari benda uji setelah mengalami proses pembebanan / pemadatan memiliki nilai yang tidak jauh berbeda antara yang satu dengan yang lainnya, walaupun tiap-tiap sampel mengalami proses pemadatan dengan durasi waktu yang berbeda-beda. Hal ini juga dapat terlihat dari grafik-grafik (gambar 4.3 dan 4.4) bahwa setelah 1 hari penurunan tinggi benda uji relatif datar atau bisa dikatakan tidak berubah. Demikian juga dengan kecepatan penurunan yang sangat-sangat kecil sekali dan bisa dikatakan hampir tidak bergerak. Hal ini kemungkinan mengindikasikan bahwa proses konsolidasi primer pada contoh tanah telah selesai dan jumlah air yang tersisa dalam sampel telah mencapai kondisi optimum untuk mencapai kepadatan yang maksimum dengan nilai pembebanan yang diberikan yaitu sebesar 200 kPa. Walaupun demikian secara fisik (sentuhan), masing-masing contoh tanah tersebut memiliki konsistensi yang berbeda-beda satu sama lainnya, dimana kecenderungannya sampel yang mengalami proses pembebanan dengan durasi waktu yang lebih cepat relatif lebih lunak, terutama pada bagian tengahnya, jika

dibandingkan dengan sampel yang mengalami proses pemadatan dengan durasi waktu yang lebih lama.



Gambar 4.3 Grafik penurunan vs. waktu yang dimonitor selama proses pembuatan benda uji triaksial.



Gambar 4.4 Grafik kecepatan penurunan vs. invers waktu yang dimonitor selama proses pembuatan benda uji triaksial.

4.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian Triaksial Tekan Tak Terkonsolidasi - Tak Terdrainasi (UU)

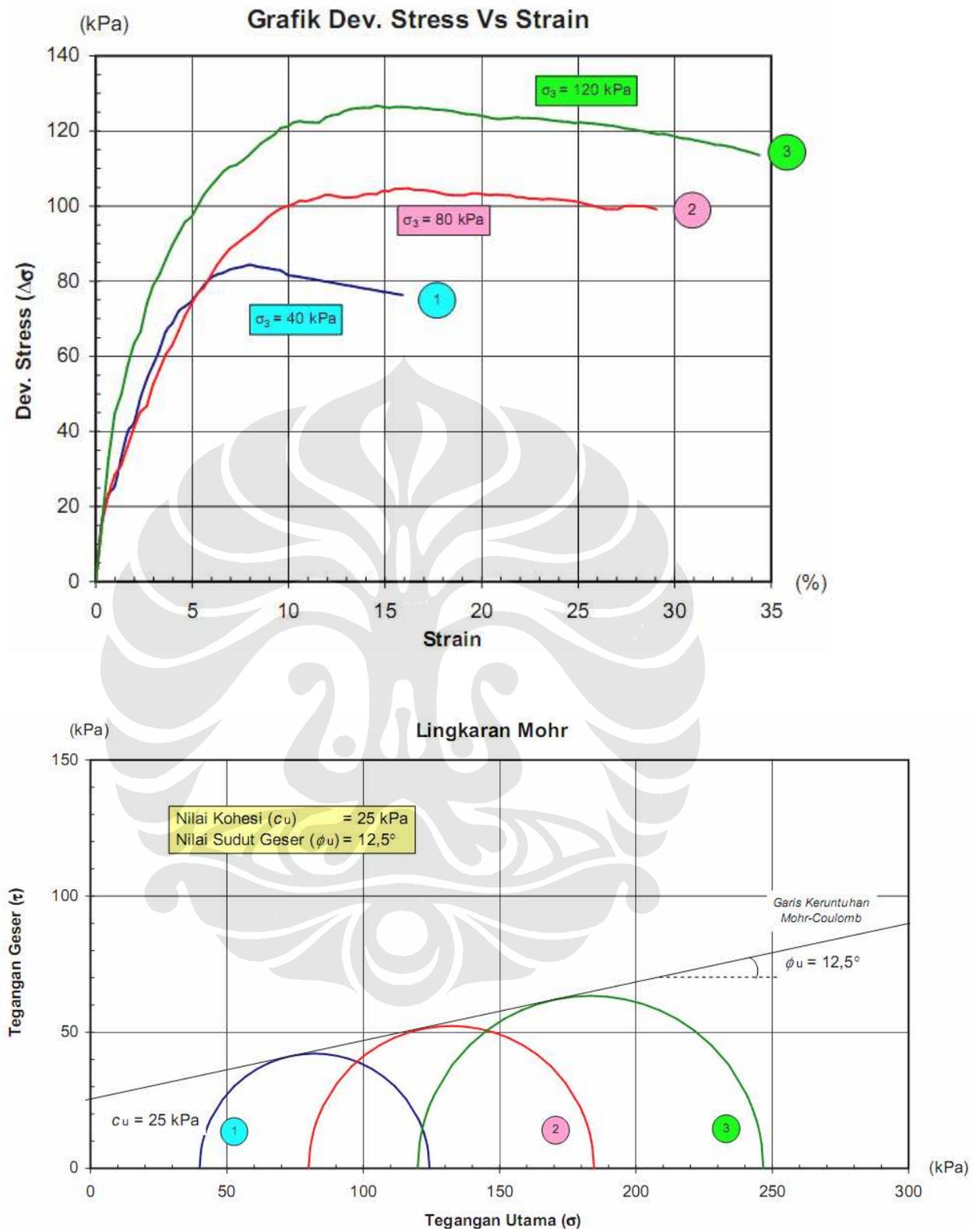
Sebagai tahapan awal dari kajian mengenai metode pengujian triaksial *multistage*, dalam laporan penelitian ini akan dilihat dan dibahas mengenai penerapan metode *multistage* ini pada jenis pengujian triaksial tekan tak terkonsolidasi – tak terdrainasi (*UU-test*). Pengujian triaksial *UU* dalam penelitian ini dilakukan dengan metode konvensional (*single stage*) dan *multistage*, yang untuk selanjutnya akan dibahas dan dibandingkan hasil dari kedua metode tersebut serta dijadikan referensi awal sebelum diterapkan pada pengujian triaksial tekan jenis *CU*. Keseluruhan benda uji triaksial yang digunakan diambil dari cetakan contoh tanah no.#3B yang sebelumnya telah dipadatkan dengan diberi beban prakonsolidasi sebesar 200 kPa selama ± 4 hari. Selain itu kecepatan regangan yang diberikan saat pengujian pada kedua metode pengujian triaksial tersebut juga sama yaitu sebesar ± 1 mm/menit.

4.4.1 Triaksial Tekan Tak Terkonsolidasi - Tak Terdrainase *Single Stage* (STX-UU)

Pada pengujian triaksial tekan *UU* dengan metode konvensional ini digunakan 1 seri sampel triaksial yang terdiri dari 3 buah benda uji. Keseluruhan benda uji triaksial ini diambil dari cetakan contoh tanah no.#3B. Tekanan sel yang diberikan pada masing-masing benda uji berturut-turut adalah 40 kPa, 80 kPa dan 120 kPa. Keseluruhan benda uji diberikan beban aksial / tegangan deviator sampai mencapai puncak keruntuhannya dan diteruskan hingga terlihat jelas bidang keruntuhan pada benda uji.

Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator terjadi pada regangan kisaran 8%, 16%, dan 14,5%, untuk benda uji 1, 2 dan 3. Disini tidak terlihat pola hubungan yang jelas antara besarnya pemberian tekanan sel dengan regangan saat puncak tegangan deviator terjadi. Kecuali pada benda uji no.1, secara umum puncak tegangan deviator terjadi pada regangan sekitar 15%.

Berdasarkan diagram Mohr-Coulomb diketahui nilai kohesi dan sudut geser *undrained* yang diperoleh dari pengujian *STX-UU* ini yaitu $c_u = 25$ kPa dan $\phi_u = 12,5^\circ$. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.5 dan data selengkapanya dapat dilihat pada lampiran.



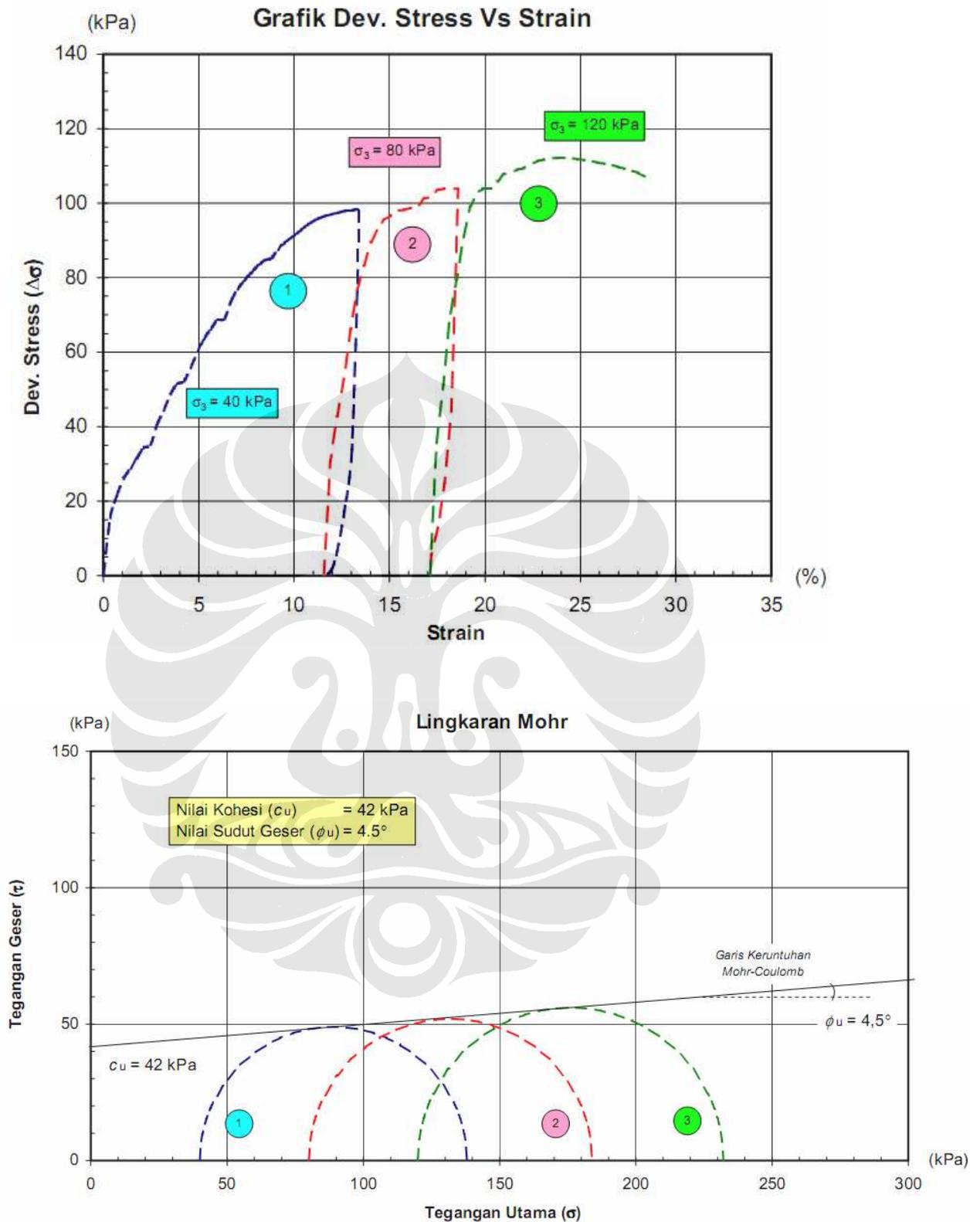
Gambar 4.5 Grafik Deviator stress vs. Regangan dan Lingkaran Mohr hasil pengujian triaksial tak terkonsolidasi - tak terdrainasi *single stage* pada sampel no.#3B.

4.4.2 Triaksial Tekan Tak Terkonsolidasi - Tak Terdrainase *Multistage* (*MTX-UU*)

Pada seri pengujian ini (*MTX-UU*), benda uji akan dilakukan 3 tahapan / *stage* pemberian tekanan sel dan beban aksial. Adapun tekanan sel yang diberikan pada benda uji untuk tiap-tiap *stage* berturut-turut adalah 40 kPa, 80 kPa dan 120 kPa. Adapun untuk kriteria “keruntuhan” yang digunakan untuk tahap awal dan antara (ke-1 dan ke-2) adalah ketika grafik tegangan deviator versus regangan sudah mencapai puncak yang ditandai dengan mulai datar / ratanya grafik tersebut. Atau jika dengan bacaan dial beban adalah selisih kenaikan beban / tegangan dari tiap-tiap interval bacaan sudah relatif sama atau mulai sedikit menurun. Pengambilan kriteria “keruntuhan” dengan cara ini didasarkan karena kriteria ini relatif lebih mudah untuk diaplikasikan dan umum digunakan. Untuk tahap akhir (ke-3) benda uji diberikan beban aksial / tegangan deviator sampai mencapai puncak keruntuhannya dan diteruskan hingga terlihat jelas bidang keruntuhan pada benda uji.

Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator terjadi pada regangan sekitar 13% untuk tahap 1, 18,2% untuk tahap 2, dan 24,5% untuk tahap 3. Dari data ini, kecuali tahap 1, dapat kita lihat bahwa selisih regangan yang diperlukan untuk mencapai “keruntuhan” dari setiap tahapan / *stage* cenderung semakin besar, dan nilai ini (selisih regangan) masih lebih kecil dari nilai pada tahap 1 (tahap awal).

Berdasarkan diagram Mohr-Coulomb diketahui nilai kohesi dan sudut geser *undrained* yang diperoleh dari pengujian *MTX-UU* ini yaitu $c_u = 42$ kPa dan $\phi_u = 4,5^\circ$. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.6 dan data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.6 Grafik Deviator stress vs. Regangan dan Lingkaran Mohr hasil pengujian triaksial tak terkonsolidasi - tak terdrainasi *multistage* pada sampel no.#3B.

4.4.3 Perbandingan Metode Pengujian *Single Stage (STX-UU)* dengan *Multistage (MTX-UU)*

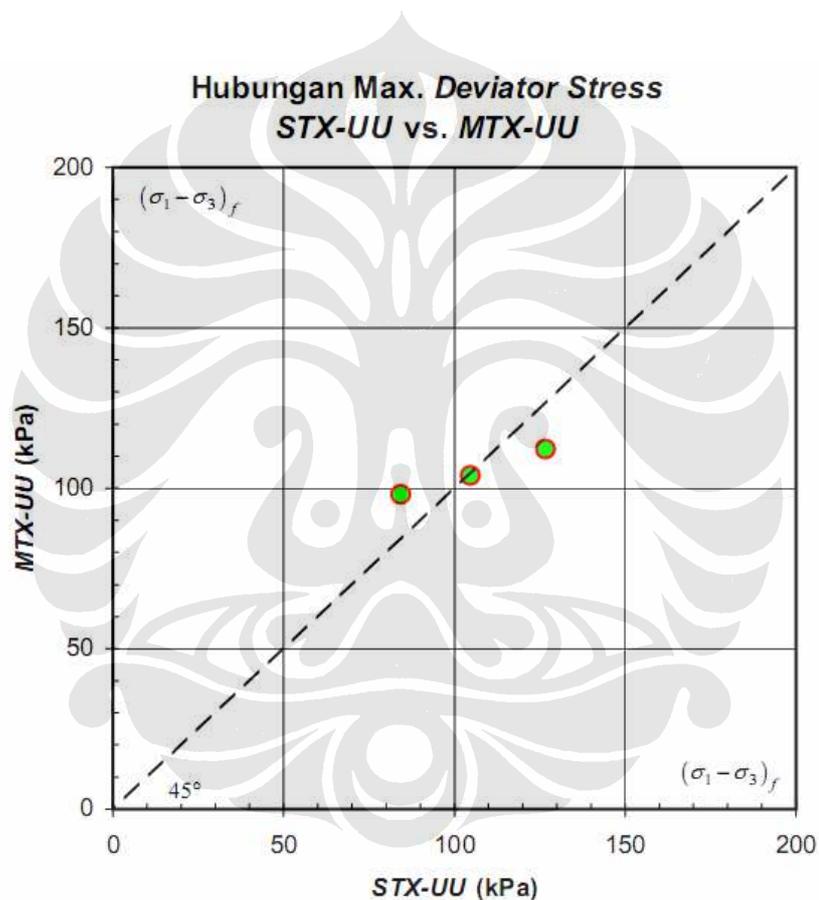
Pada bagian ini akan dibahas mengenai perbandingan metode pengujian triaksial *UU single stage* dengan *multistage*. Perbandingan ini didasarkan pada data dan grafik dari hasil pengujian yang telah dilakukan pada kedua metode tersebut seperti yang telah dipaparkan pada bagian 4.4.1 sampai 4.4.2. Selain itu bahasan ini kemungkinan tidak relevan untuk semua jenis tanah. Walaupun demikian, bahasan ini dapat dijadikan kajian mengenai penerapan metode triaksial *multistage* pada tanah-tanah yang memiliki kemiripan dengan benda uji yang digunakan pada penelitian ini. Adapun pembahasan tersebut adalah sebagai berikut :

a) Tegangan deviator vs. regangan.

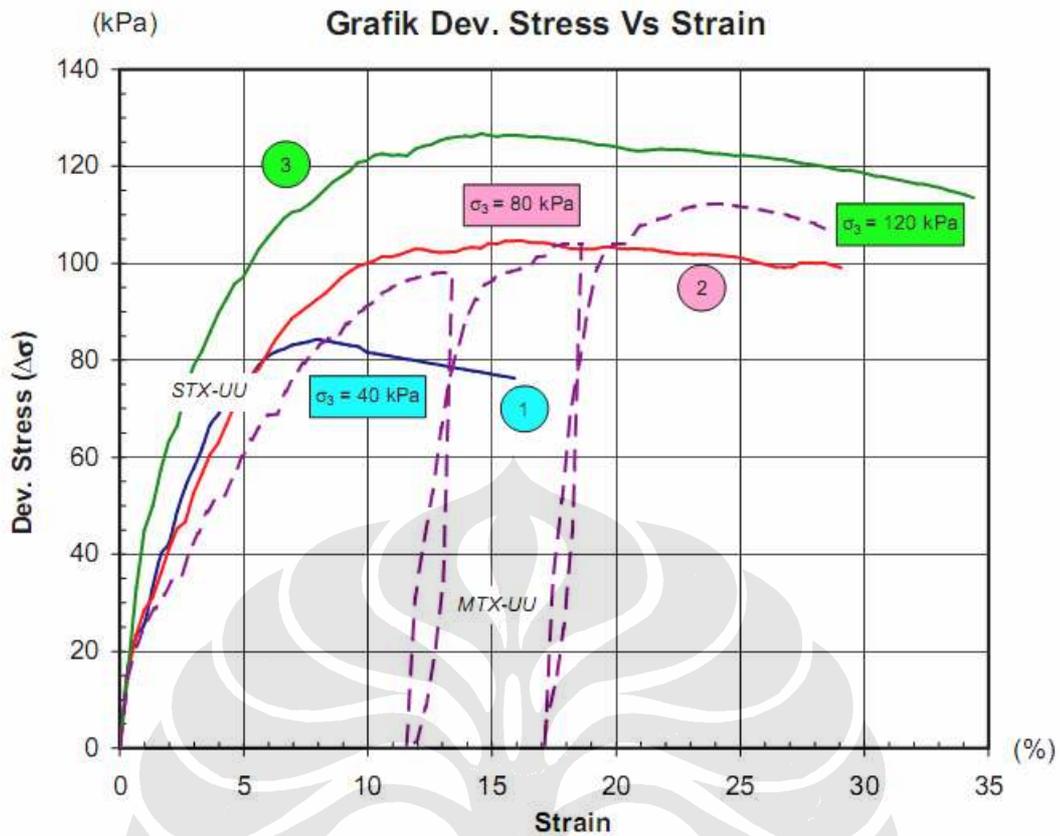
Seperti terlihat pada gambar 4.8, secara umum tanah yang digunakan sebagai benda uji ini, baik *single stage* maupun *multistage*, mencapai tegangan deviator maksimum pada regangan di atas dari 10%. Kecuali pada sampel no.#3B-(1) pada *STX-UU* yang diberikan tekanan sel 40 kPa, kondisi tersebut terjadi pada regangan kurang dari 10%. Pada metode *multistage*, keruntuhan pada benda uji di *stage 3* terjadi pada regangan di atas 20%. Pada regangan ini nilai tegangan yang didapat kemungkinan tidak tepat / dapat meragukan, karena adanya penyimpangan / distorsi dari benda uji, sesuai dengan kriteria yang telah di bahas pada sub bab 2.4.2. Walaupun demikian, pada tahapan selanjutnya dari metode *multistage* ini (tahap 2 dan 3), penambahan regangan yang diperlukan untuk mencapai “keruntuhan” lebih kecil jika dibandingkan *stage* awalnya. Fenomena ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengujian triaksial *multistage* untuk menentukan kriteria “keruntuhan” pada tiap-tiap tahapan / *stage*-nya. Adapun nilai tegangan deviator maksimum yang dapat dicapai dari tiap-tiap besarnya nilai tekanan sel yang bekerja pada benda uji, hanya pada tekanan sel 80 kPa yang memiliki perbandingan nilai yang tidak jauh berbeda antara kedua metode triaksial tersebut. Hubungan ini secara ringkas dapat dilihat pada gambar 4.7.

Tabel 4.5 Hubungan nilai tegangan sel dengan nilai tegangan deviator maksimum dari pengujian triaksial *STX-UU* dan *MTX-UU*.

Tegangan sel (kPa)	40	80	120
Tegangan deviator maksimum (kPa) :			
<i>STX-UU</i> Sampel #3B-(1)-(3)-(4)	84,3	104,7	126,7
<i>MTX-UU</i> Sampel #3B-(5)	98,1	104	112,2



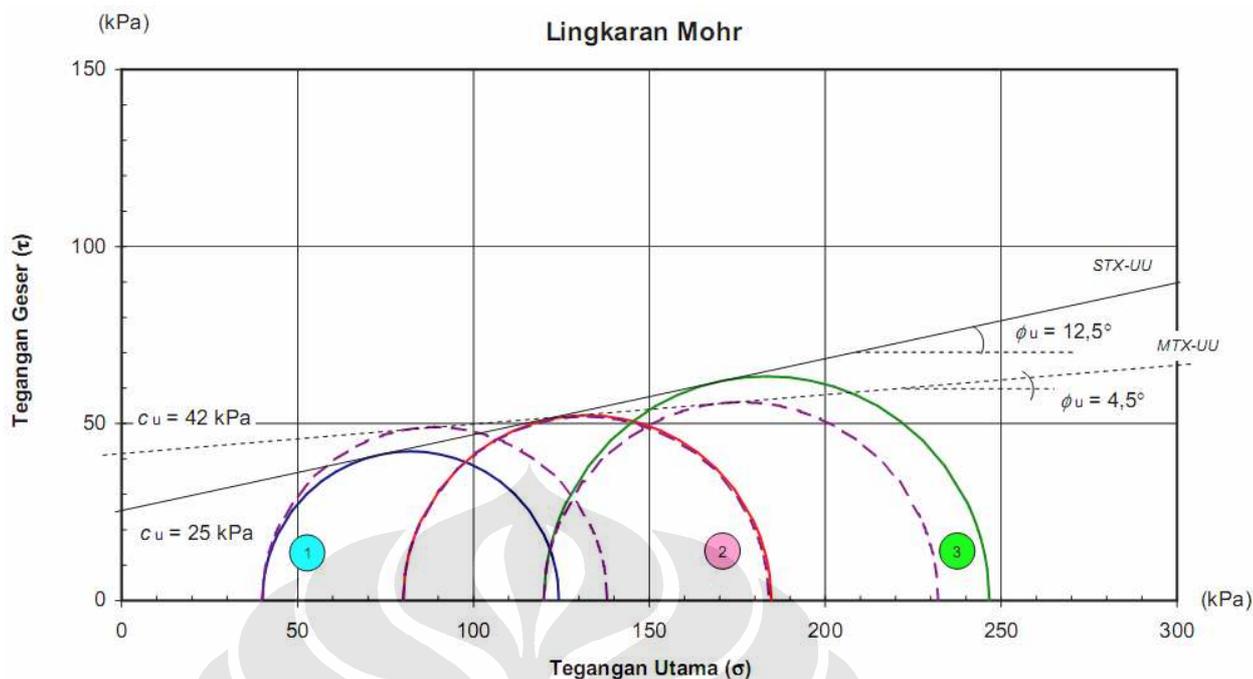
Gambar 4.7 Grafik perbandingan tegangan deviator maksimum hasil pengujian triaksial *STX-UU* dengan *MTX-UU* pada sampel no.#3B.



Gambar 4.8 Grafik deviator *stress* vs. regangan hasil pengujian triaksial *STX-UU* dengan *MTX-UU* pada sampel no.#3B.

b) Nilai kohesi dan sudut geser *undrained* (c_u dan ϕ_u)

Dari hasil analisa pengujian yang telah dilakukan, baik *STX-UU* maupun *MTX-UU*, nilai c_u yang diperoleh dari pengujian *MTX-UU* cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan metode triaksial konvensional, namun sebaliknya untuk nilai ϕ_u . Walaupun demikian dari gambar 4.9 dapat kita lihat besarnya grafik lingkaran Mohr untuk kedua metode pengujian tersebut secara rata-rata relatif sama.



Gambar 4.9 Grafik Lingkaran Mohr hasil pengujian triaksial *STX-UU* dengan *MTX-UU* pada sampel no.#3B.

4.5 Hasil dan Pembahasan Pengujian Triaksial Tekan Terkonsolidasi - Tak Terdrainasi (*CU*)

Pada bagian ini akan dibahas mengenai hasil pengujian triaksial tekan terkonsolidasi - tak terdrainasi (*CU-test*). Adapun metode yang digunakan adalah pengujian triaksial *CU* konvensional (*single stage*) dan *multistage* yang selanjutnya akan dibahas dan dibandingkan hasil dari kedua metode tersebut. Keseluruhan benda uji triaksial yang digunakan diambil dari cetakan contoh tanah no.#4B yang sebelumnya telah dipadatkan dengan diberi beban prakonsolidasi sebesar 200 kPa selama ± 10 hari. Selain itu kecepatan regangan yang diberikan saat pengujian pada kedua metode pengujian triaksial tersebut juga sama yaitu sebesar $\pm 0,063$ mm/menit.

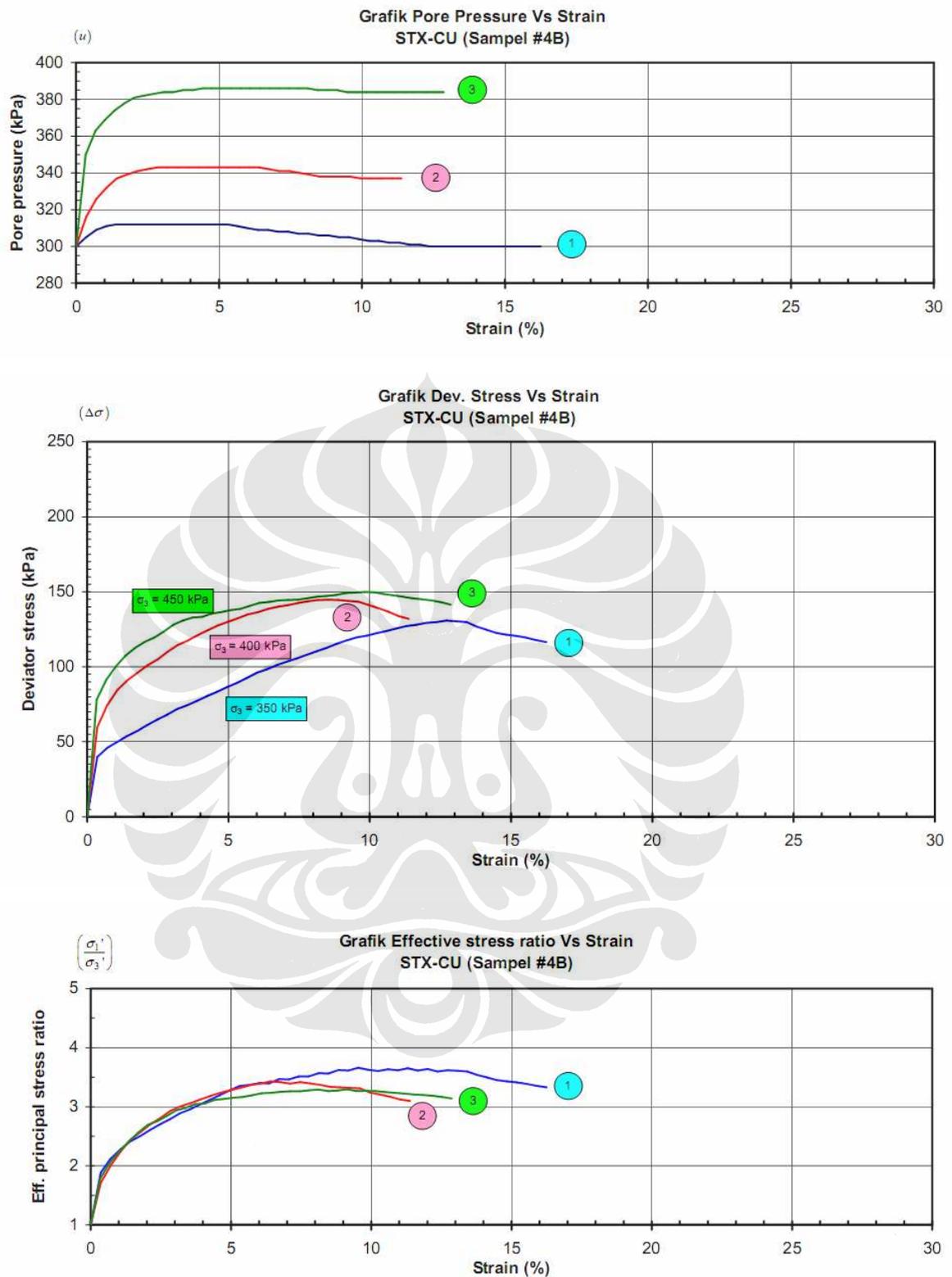
4.5.1 Triaksial Tekan Terkonsolidasi-Tak Terdrainase *Single Stage (STX-CU)*

Pada pengujian triaksial tekan *CU* dengan metode konvensional ini digunakan 1 seri sampel triaksial yang terdiri dari 3 buah benda uji. Keseluruhan benda uji triaksial ini diambil dari cetakan contoh tanah no.#4B. Adapun tekanan sel yang diberikan pada masing-masing benda uji berturut-turut dalam tegangan

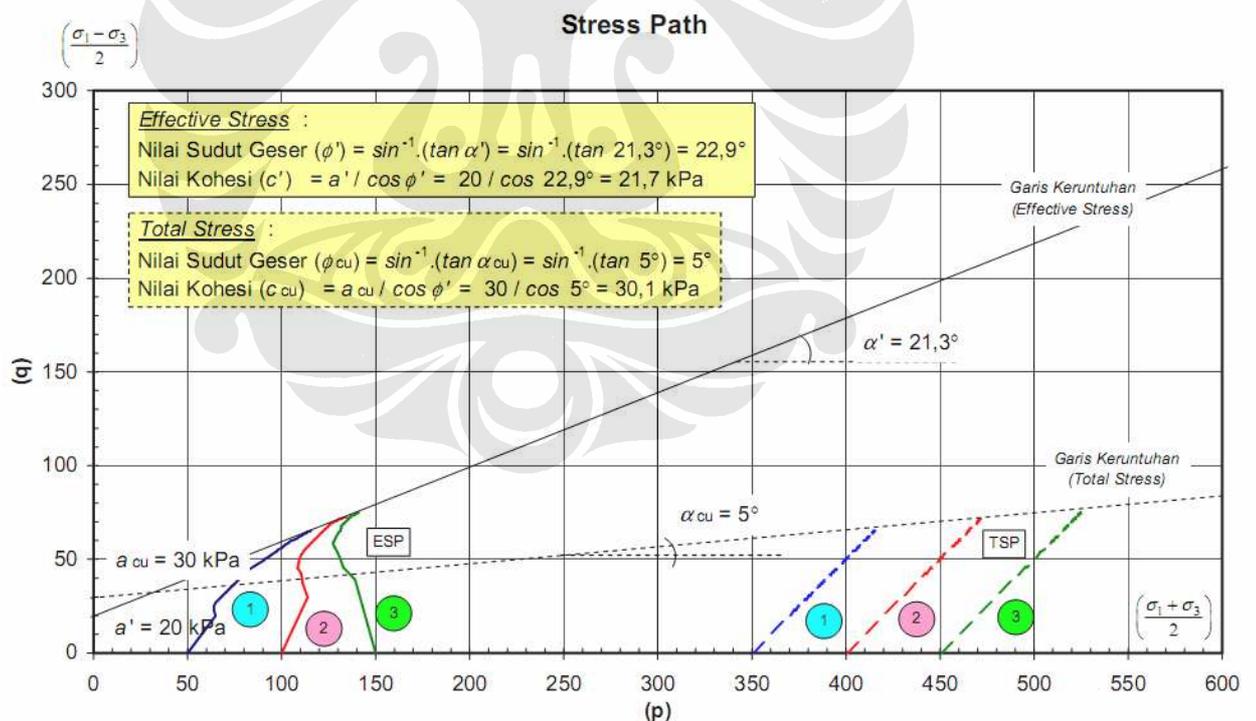
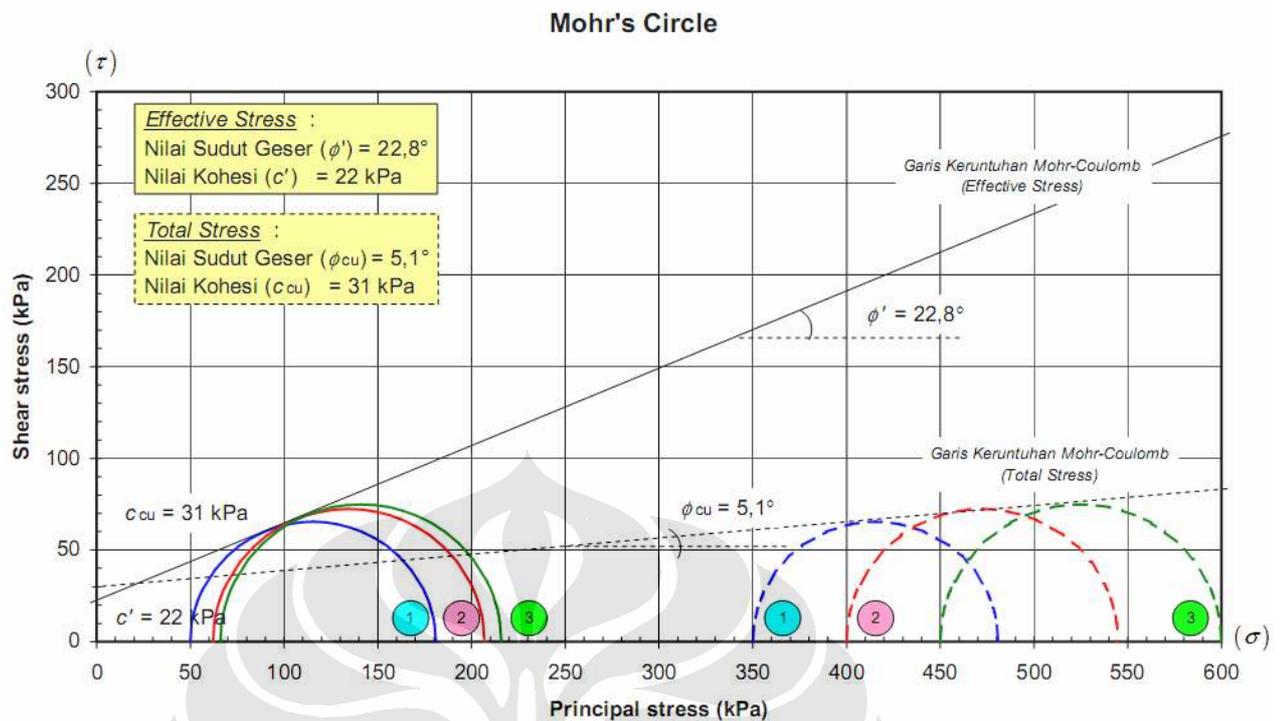
total adalah 350 kPa, 400 kPa dan 450 kPa, dengan tekanan balik (*back pressure*) saat proses konsolidasi sebesar 300 kPa. Atau dalam tegangan efektif adalah 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa. Keseluruhan benda uji diberikan beban aksial / tegangan deviator sampai mencapai puncak keruntuhannya dan diteruskan hingga terlihat jelas bidang keruntuhan pada benda uji.

Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator terjadi pada regangan kisaran 12,7%, 8,5%, dan 9,8%, untuk benda uji 1, 2 dan 3. Disini tidak terlihat pola hubungan yang jelas antara besarnya pemberian tekanan sel dengan regangan saat puncak tegangan deviator terjadi. Pada ketiga benda uji ini puncak tegangan deviator terjadi pada regangan sekitar 10%.

Berdasarkan diagram Mohr-Coulomb diketahui nilai kohesi dan sudut geser yang diperoleh dari pengujian *STX-CU* ini dalam keadaan tegangan total yaitu $c_{cu} = 31$ kPa dan $\phi_{cu} = 5,1^\circ$, dan dalam keadaan tegangan efektif yaitu $c' = 22$ kPa dan $\phi' = 22,8^\circ$. Alternatif lainnya dengan menggunakan diagram *stress path* untuk mencari nilai parameter kuat geser tanah pada pengujian ini, didapatkan nilai $c_{cu} = 30,1$ kPa dan $\phi_{cu} = 5^\circ$ untuk keadaan tegangan total, dan nilai $c' = 21,7$ kPa dan $\phi' = 22,9^\circ$ untuk keadaan tegangan efektif. Nilai-nilai ini tidak jauh berbeda dengan yang didapat dengan menggunakan diagram Mohr-Coulomb. Dari pola *stress path* yang didapat maka ketiga benda uji tersebut dalam keadaan *overconsolidated*. Hal ini sesuai dengan perkiraan awal karena benda uji sebelumnya telah mendapatkan beban prakonsolidasi yang lebih besar yaitu 200 kPa. Selain itu dapat dilihat pula bahwa seiring dengan diberikannya tegangan sel efektif yang makin mendekati dengan nilai tegangan prakonsolidasi, maka pola *stress path*-nya pun cenderung berubah dari *overconsolidated* menjadi *normally consolidated*. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.10 sampai dengan 4.11 dan data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.10 Grafik data hasil pengujian triaksial terkonsolidasi - tak terdrainasi *single stage* pada sampel no.#4B.



Gambar 4.11 Grafik lingkaran Mohr dan *stress path* dalam keadaan tegangan total dan efektif hasil pengujian triaksial terkonsolidasi-tak terdrainasi *single stage* pada sampel no.#4B.

4.5.2 Triaksial Tekan Terkonsolidasi-Tak Terdrainase *Multistage* (MTX-CU)

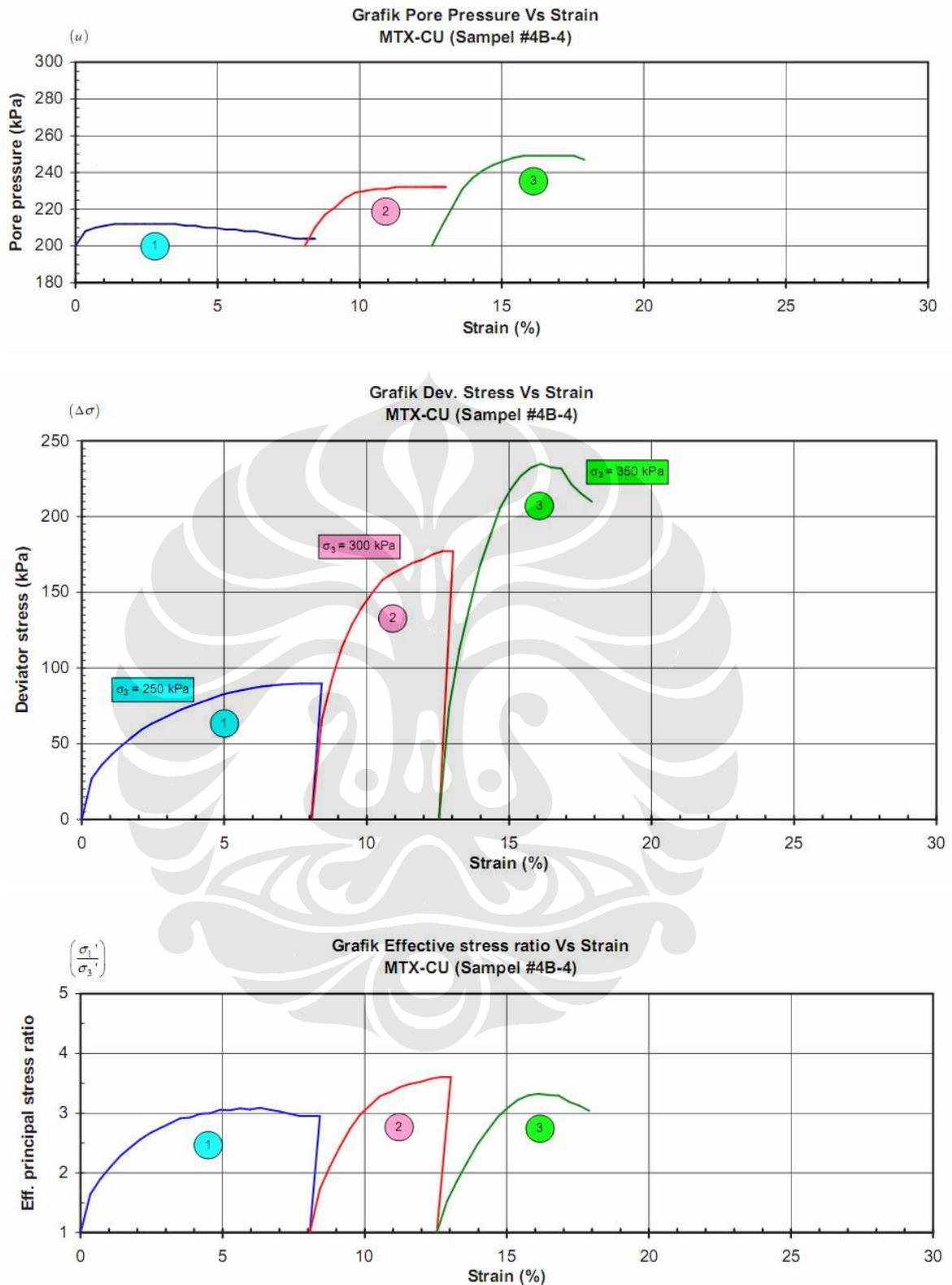
Pada pengujian triaksial *CU* metode *multistage* ini, akan dilakukan 2 seri pengujian terhadap 2 buah sampel yang diperoleh dari cetakan benda uji no.#4B yang sebelumnya telah dipadatkan dengan diberi beban prakonsolidasi sebesar 200 kPa selama ± 10 hari. Setiap seri pengujian *multistage* ini hanya menggunakan 1 buah benda uji triaksial.

Adapun untuk kriteria “keruntuhan” yang digunakan untuk tahap awal dan antara (ke-1 dan ke-2) adalah ketika grafik tegangan deviator versus regangan sudah mencapai puncak yang ditandai dengan mulai datar / ratanya grafik tersebut. Atau jika dengan bacaan dial beban adalah selisih kenaikan beban / tegangan dari tiap-tiap interval bacaan sudah relatif sama atau mulai sedikit menurun. Pengambilan kriteria “keruntuhan” dengan cara ini didasarkan pada pengujian *STX-CU* sebelumnya yang memperlihatkan bahwa bidang keruntuhan pada benda uji baru terlihat jelas setelah terjadinya puncak tegangan deviator, dan ada interval regangan yang cukup besar diantara kedua kondisi tersebut. Dengan demikian kecil kemungkinannya benda uji rusak akibat munculnya bidang keruntuhan sebelum mencapai puncak tegangan deviator. Selain itu kriteria “keruntuhan” ini relatif lebih mudah untuk diaplikasikan dan umum digunakan. Untuk tahap akhir (ke-3) benda uji diberikan beban aksial / tegangan deviator sampai mencapai puncak keruntuhannya dan diteruskan hingga terlihat jelas bidang keruntuhan pada benda uji.

4.5.2.1 Sampel No.#4B-(4)

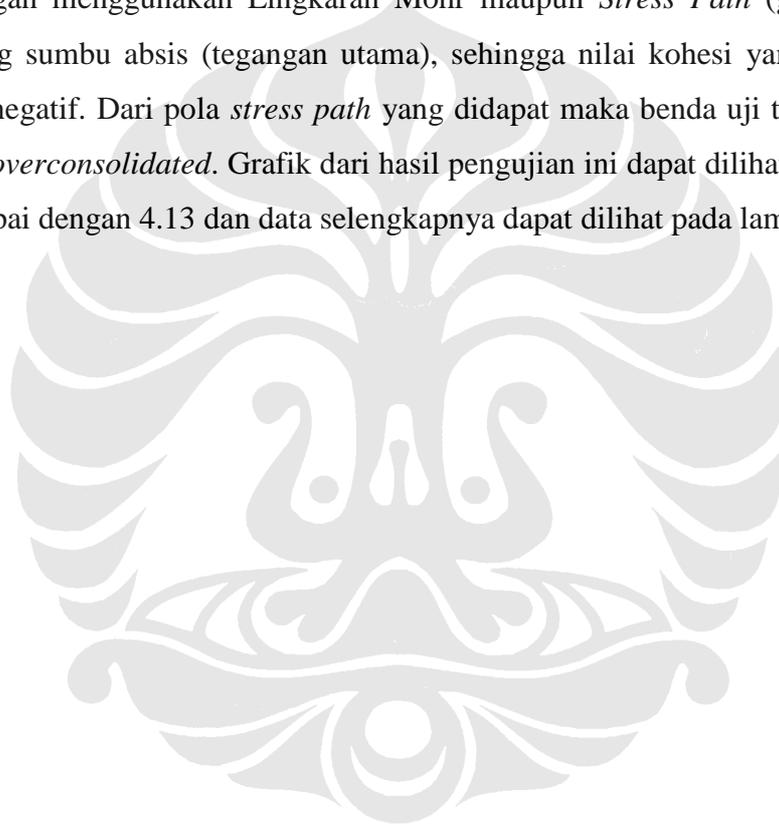
Pada seri pengujian ini (*MTX-CU*), benda uji akan dilakukan 3 tahapan / *stage* pemberian tekanan sel dan beban aksial. Adapun tekanan sel yang diberikan pada benda uji untuk tiap-tiap tahapan / *stage* berturut-turut dalam tegangan total adalah 250 kPa, 300 kPa dan 350 kPa, dengan tekanan balik saat proses konsolidasi di tiap tahapan sebesar 200 kPa. Atau dalam tegangan efektif adalah 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa.

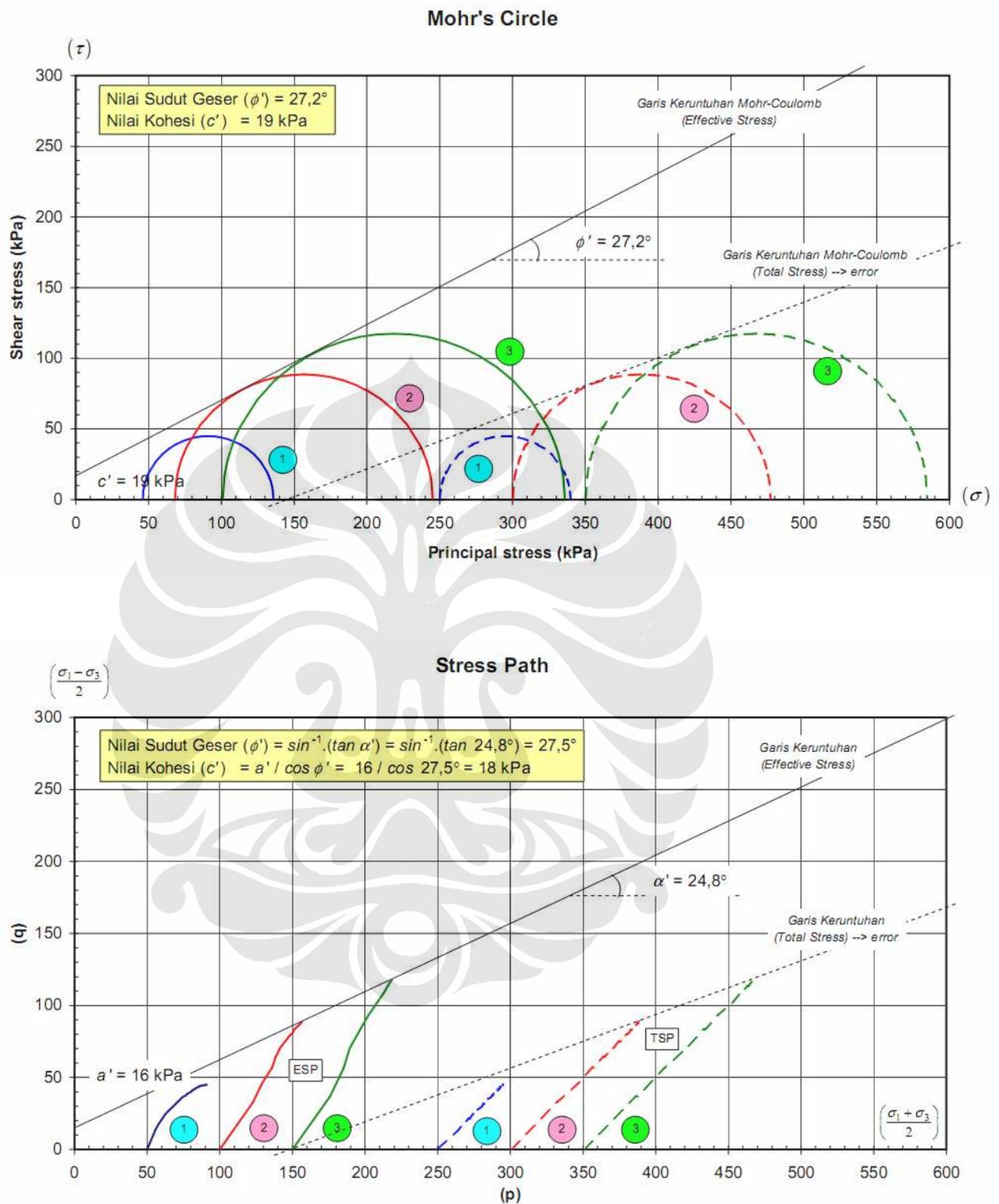
Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator terjadi pada regangan sekitar 8% untuk tahap 1, 12,5% untuk tahap 2, dan 16% untuk tahap 3. Dari data ini dapat kita lihat bahwa selisih regangan yang diperlukan untuk mencapai “keruntuhan” dari setiap tahapan / *stage* adalah semakin kecil.



Gambar 4.12 Grafik data hasil pengujian triaksial terkonsolidasi - tak terdrainasi *multistage* pada sampel no.#4B-(4).

Berdasarkan diagram Mohr-Coulomb diketahui nilai kohesi dan sudut geser dalam keadaan efektif yang diperoleh dari pengujian *MTX-CU* ini yaitu $c' = 19$ kPa dan $\phi' = 27,2^\circ$. Alternatif lainnya dengan menggunakan diagram *stress path* untuk mencari nilai c' dan ϕ' pada pengujian ini, didapatkan nilai $c' = 18$ kPa dan $\phi' = 27,5^\circ$. Nilai-nilai ini tidak jauh berbeda dengan yang didapat dengan menggunakan diagram Mohr-Coulomb. Dari pengujian triaksial dengan metode *multistage* ini tidak didapatkan nilai parameter kuat geser tanah dalam keadaan total (c_{cu} dan ϕ_{cu}) karena garis keruntuhan dalam keadaan tegangan total yang diperoleh dari grafik, baik dengan menggunakan Lingkaran Mohr maupun *Stress Path* (gambar 4.13), memotong sumbu absis (tegangan utama), sehingga nilai kohesi yang didapatkan menjadi negatif. Dari pola *stress path* yang didapat maka benda uji tersebut dalam keadaan *overconsolidated*. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.12 sampai dengan 4.13 dan data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.





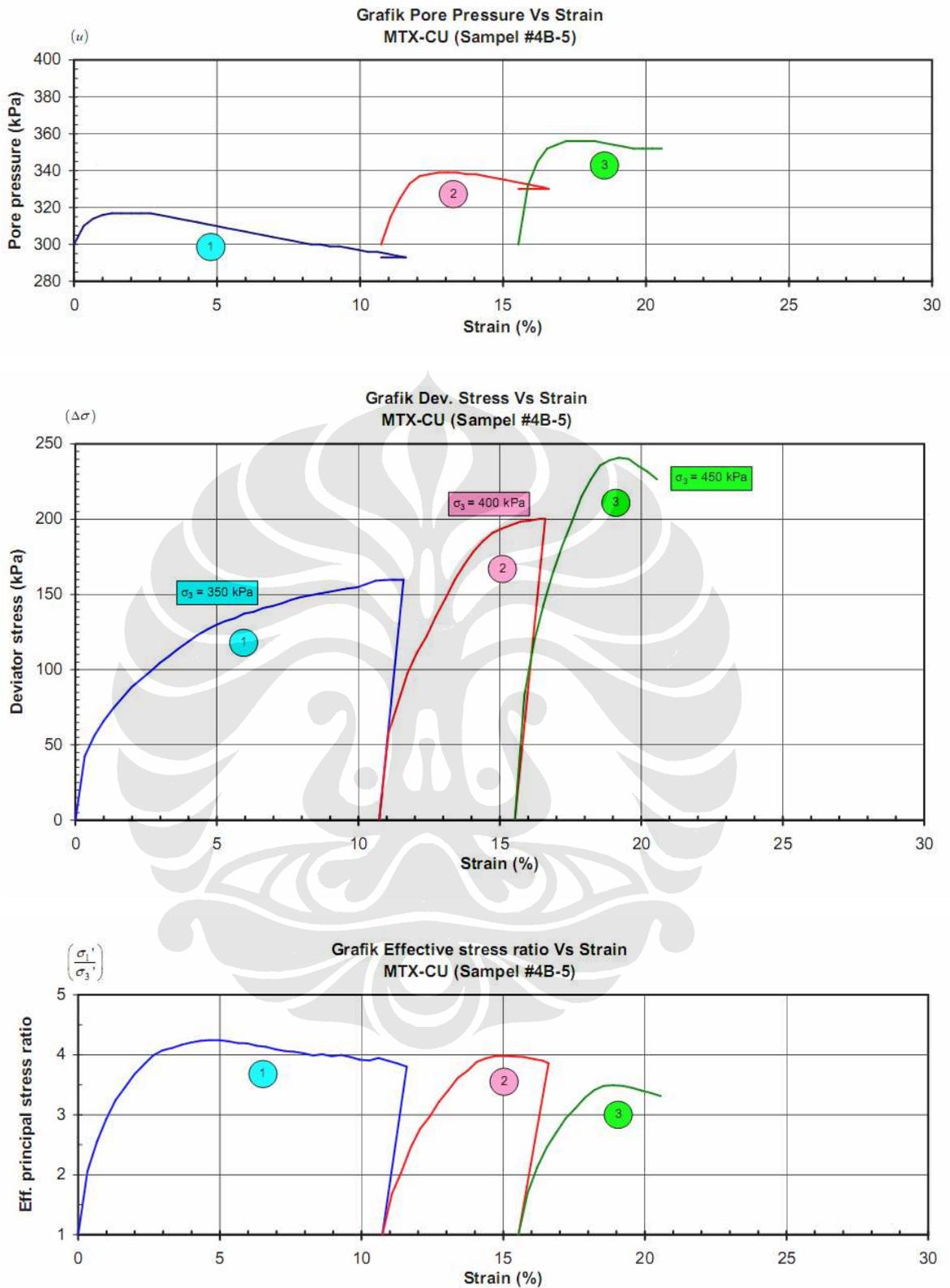
Gambar 4.13 Grafik lingkaran Mohr dan *stress path* dalam keadaan tegangan total dan efektif hasil pengujian triaksial terkonsolidasi-tak terdrainasi *multistage* pada sampel no.#4B-(4).

4.5.2.2 Sampel No.#4B-(5)

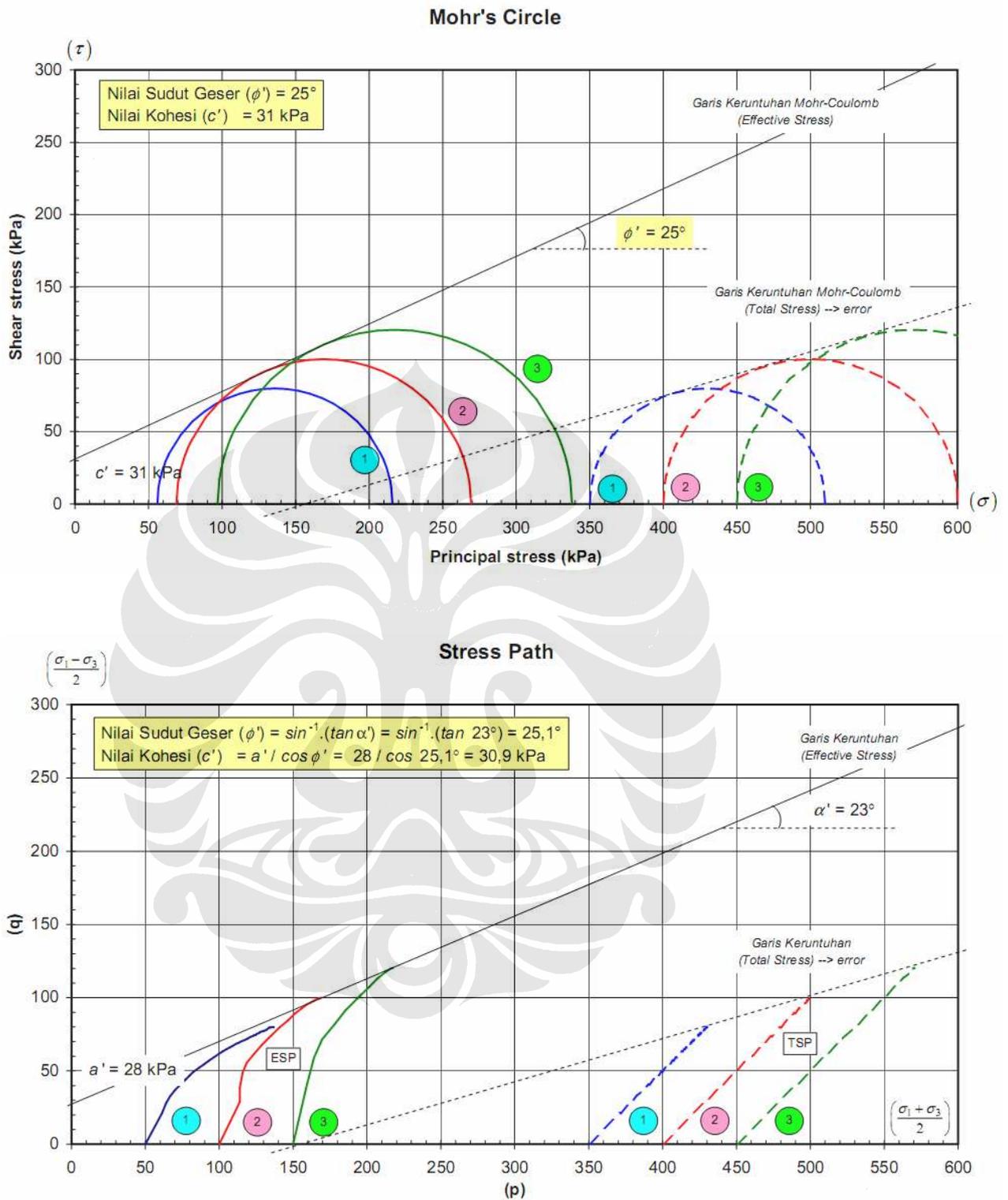
Pada seri pengujian ini (*MTX-CU*), benda uji akan dilakukan 3 tahapan / *stage* pemberian tekanan sel dan beban aksial. Adapun tekanan sel yang diberikan pada benda uji untuk masing-masing tahapan / *stage* berturut-turut dalam tegangan total adalah 350 kPa, 400 kPa dan 450 kPa, dengan tekanan balik saat proses konsolidasi di tiap tahapan sebesar 300 kPa. Atau dalam tegangan efektif adalah 50 kPa, 100 kPa, dan 150 kPa.

Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator terjadi pada regangan sekitar 11% untuk tahap 1, 16% untuk tahap 2, dan 19% untuk tahap 3. Sama dengan seri *MTX-CU* sebelumnya (sampel #4B-4), bahwa dari data ini dapat kita lihat selisih regangan yang diperlukan untuk mencapai “keruntuhan” dari setiap tahapan / *stage* adalah semakin kecil.

Berdasarkan diagram Mohr-Coulomb diketahui nilai kohesi dan sudut geser dalam keadaan efektif yang diperoleh dari pengujian *MTX-CU* ini yaitu $c' = 31$ kPa dan $\phi' = 25^\circ$. Alternatif lainnya dengan menggunakan diagram *stress path* untuk mencari nilai c' dan ϕ' pada pengujian ini, didapatkan nilai $c' = 30,9$ kPa dan $\phi' = 25,1^\circ$. Nilai-nilai ini tidak jauh berbeda dengan yang didapat dengan menggunakan diagram Mohr-Coulomb. Sama dengan pengujian sebelumnya (sampel #4B-4), dari pengujian triaksial dengan metode *multistage* ini juga tidak didapatkan nilai parameter kuat geser tanah dalam keadaan total (c_{cu} dan ϕ_{cu}) karena garis keruntuhan dalam keadaan tegangan total yang diperoleh dari grafik, baik dengan menggunakan Lingkaran Mohr maupun *Stress Path* (gambar 4.15), memotong sumbu absis (tegangan utama), sehingga nilai kohesi yang didapatkan menjadi negatif. Dari pola *stress path* yang didapat maka benda uji tersebut dalam keadaan *overconsolidated*. Grafik dari hasil pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.14 sampai dengan 4.15 dan data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.14 Grafik data hasil pengujian triaksial terkonsolidasi - tak terdrainasi *multistage* pada sampel no.#4B-(5).



Gambar 4.15 Grafik lingkaran Mohr dan *stress path* dalam keadaan tegangan total dan efektif hasil pengujian triaksial terkonsolidasi-tak terdrainasi *multistage* pada sampel no.#4B-(5).

4.5.3 Perbandingan Metode Pengujian *Single Stage (STX-CU)* dengan *Multistage (MTX-CU)*

Pada bagian ini akan dibahas mengenai perbandingan metode pengujian triaksial *CU single stage* dengan *multistage*. Perbandingan ini didasarkan pada data dan grafik dari hasil pengujian yang telah dilakukan pada kedua metode tersebut seperti yang telah dipaparkan pada sub bagian 4.5.1 sampai 4.5.2. Selain itu bahasan ini kemungkinan tidak relevan untuk semua jenis tanah. Walaupun demikian, bahasan ini dapat dijadikan kajian mengenai penerapan metode triaksial *multistage* pada tanah-tanah yang memiliki kemiripan dengan benda uji yang digunakan pada penelitian ini. Adapun pembahasan tersebut adalah sebagai berikut:

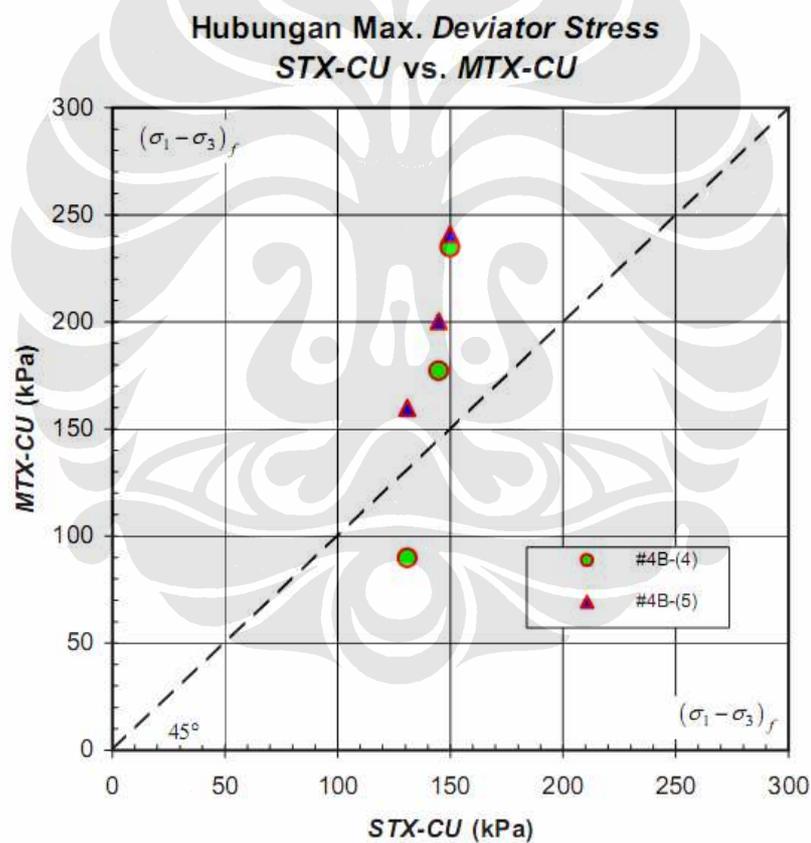
a) Tegangan deviator vs. regangan.

Secara umum, tanah yang digunakan sebagai benda uji ini, baik *single stage* maupun *multistage* mencapai tegangan deviator maksimum pada regangan kurang dari 15% dimana pada sampel *STX-CU* yang diberikan tekanan sel efektif di atas 50 kPa, kondisi tersebut terjadi pada regangan kurang dari 10%. Pada pengujian ini, walaupun benda uji diberikan tekanan efektif sel yang sama, metode *multistage* terutama tahap 2 dan 3, mencapai tegangan deviator yang relatif lebih besar jika dibandingkan dengan yang dicapai pada metode konvensional. Hal ini mungkin karena adanya perbedaan proses konsolidasinya sampel pada tahap konsolidasi, dimana pada metode *multistage*, sebuah benda uji mengalami proses konsolidasi lebih dari 1 kali sesuai dengan jumlah tahapannya. Hubungan tegangan deviator saat “runtuh” antara kedua metode pengujian ini dapat dilihat pada tabel 4.6 dan gambar 4.16. Selain itu pada metode *multistage* walaupun tekanan sel efektif awal yang diberikan sama, sampel yang diberikan tekanan sel total awal yang lebih kecil mencapai “keruntuhan” pada regangan yang lebih kecil (<10%) dan nilai tegangan deviator yang lebih kecil jika dibandingkan dengan sampel yang diberikan tekanan sel total yang lebih besar. Walaupun demikian, pada tahapan selanjutnya dari metode *multistage* ini (tahap 2 dan 3), penambahan regangan yang diperlukan untuk mencapai “keruntuhan” relatif tidak jauh berbeda dan cenderung semakin mengecil jika dibandingkan dengan tahap

sebelumnya. Fenomena ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengujian triaksial *multistage* untuk menentukan kriteria “keruntuhan” pada tiap-tiap tahapan / *stage*-nya.

Tabel 4.6 Hubungan nilai tegangan efektif sel awal dengan nilai tegangan deviator maksimum dari pengujian triaksial *STX-CU* dan *MTX-CU*.

Tegangan efektif sel awal (kPa)	50	100	150
Tegangan deviator maksimum (kPa) :			
<i>STX-CU</i> Sampel #4B-(1)-(2)-(3)	130,9	144,8	149,8
<i>MTX-CU</i> Sampel #4B-(4)	89,8	177,2	234,9
<i>MTX-CU</i> Sampel #4B-(5)	159,9	200,3	240,9



Gambar 4.16 Grafik perbandingan tegangan deviator maksimum hasil pengujian triaksial *STX-CU* dengan *MTX-CU* pada sampel no.#4B.

b) Rasio tegangan efektif vs. regangan.

Pada pengujian *STX-CU*, pola dari nilai maksimum rasio tegangan efektif terhadap tekanan sel yang diberikan terhadap benda uji tidak terlihat

jelas dan cenderung sama antar benda uji. Sama halnya dengan pada pengujian *STX-CU*, pada pengujian *MTX-CU* pola ini juga tidak terlihat jelas. Akan tetapi nilai ini cenderung menurun setelah mencapai puncaknya. Dalam pengujian ini nilai maksimum rasio tegangan efektif ini, baik metode *single stage* maupun *multistage* terjadi sebelum “puncak” dari tegangan deviator. Fenomena penurunan nilai rasio tegangan efektif ini dapat dijadikan acuan atau sebagai tanda bahwa sampel akan mendekati “keruntuhan” atau “puncak” dari tegangan deviator. Hal ini dapat diterapkan pada pengujian triaksial baik metode konvensional maupun *multistage*.

c) Tekanan pori vs. regangan.

Dari pengujian yang telah dilakukan, baik *STX-CU* maupun *MTX-CU*, dapat dilihat bahwa semakin besar tekanan sel yang diberikan maka semakin besar pula nilai maksimum kelebihan tekanan pori (*excess pore pressure*) yang timbul pada saat proses pemberian beban aksial. Walaupun demikian, secara umum pada pengujian metode *multistage*, terutama tahap 2 dan 3, pada nilai tekanan sel efektif yang sama dengan metode konvensional, nilai maksimum kelebihan tekanan pori yang terjadi ini cenderung lebih kecil. Nilai ini terjadi sebelum “puncak” tegangan deviator tercapai. Secara umum dalam pengujian ini “puncak” tegangan deviator terjadi setelah gradien perubahan nilai kelebihan tekanan pori telah datar atau sudah menurun. Fenomena penurunan atau stabilnya perubahan nilai kelebihan tekanan pori ini dapat dijadikan acuan atau sebagai tanda bahwa sampel akan mendekati “keruntuhan” atau “puncak” dari tegangan deviator. Hal ini dapat diterapkan pada pengujian triaksial baik metode konvensional maupun *multistage*.

c) Nilai kohesi dan sudut geser dalam keadaan tegangan efektif (c' dan ϕ') dan total (c_{cu} dan ϕ_{cu}).

Dari hasil analisa pengujian yang telah dilakukan, baik *STX-CU* maupun *MTX-CU*, nilai parameter-parameter kuat geser tanah dalam keadaan tegangan efektif (c' dan ϕ'), kecuali nilai c' yang diperoleh dari pengujian *MTX-CU* sampel no.#4B-(4), nilai yang diperoleh dari metode *multistage* cenderung sedikit lebih besar jika dibandingkan dengan metode

triaksial konvensional. Walaupun demikian nilai-nilai c' dan ϕ' yang diperoleh dari kedua metode itu dapat dikatakan relatif tidak jauh berbeda. Lain halnya dengan nilai parameter-parameter kuat geser tanah dalam keadaan tegangan totalnya (c_{cu} dan ϕ_{cu}) yang hanya dapat diperoleh dengan metode konvensional, sehingga perbandingan nilai parameter-parameter ini yang diperoleh dari kedua metode tersebut (konvensional vs. *multistage*) tidak dapat dilakukan. Akan tetapi jika dibandingkan dengan nilai parameter kuat geser *undrained* (c_u dan ϕ_u) yang diperoleh dari pengujian triaksial *UU* sebelumnya, khususnya *MTX-UU*, nilai c_{cu} dan ϕ_{cu} yang diperoleh ini relatif tidak jauh berbeda. Walaupun demikian nilai c' dan ϕ' yang diperoleh dari penerapan metode triaksial *multistage* cukup relevan untuk digunakan sebagai data untuk analisa desain lebih lanjut pada tanah yang digunakan sebagai benda uji tersebut. Selain itu penggunaan *stress path* dalam penggambaran grafik-grafik hubungan antar tegangan pada kedua metode pengujian triaksial tersebut, selain lebih mudah dan ringkas, juga dapat memberikan informasi tambahan, terutama mengenai perilaku dari tanah yang digunakan sebagai benda uji selama proses pengujian berlangsung. Berikut ini, pada tabel 4.7 dirangkumkan nilai-nilai parameter kuat geser tanah baik dalam keadaan tegangan total maupun efektif, yang diperoleh dari rangkaian pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian .

Tabel 4.7 Ringkasan nilai parameter kuat geser tanah kaolin yang diperoleh dari berbagai variasi metode pengujian triaksial tekan.

Jenis dan Metode Pengujian Triaksial	Parameter Kuat Geser Tanah			
	Koheesi (c)		Sudut Geser (ϕ)	
	Total	Efektif	Total	Efektif
Triaksial Tekan <i>UU</i>	(c_u)	-	(ϕ_u)	-
<i>STX-UU</i> (sampel #3B-1.3.4)	25 kPa	-	12,5°	-
<i>MTX-UU</i> (sampel #3B-5)	42 kPa	-	4,5°	-
Triaksial Tekan <i>CU</i>	(c_{cu})	(c')	(ϕ_{cu})	(ϕ')
<i>STX-CU</i> (sampel #4B-1.2.3)	31 kPa	22 kPa	5,1°	22,8°
<i>MTX-CU</i> (sampel #4B-4)	N/A	19 kPa	N/A	27,2°
<i>MTX-CU</i> (sampel #4B-5)	N/A	31 kPa	N/A	25°