

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Penelitian

##### 1. Uji triaksial UU

Hasil pengujian triaksial berupa hubungan tegangan deviator dengan regangan aksial diberikan pada Gambar 4.1 sampai 4.3. Secara umum, tegangan deviator ( $\Delta\sigma$ ) meningkat seiring dengan peningkatan tegangan sel ( $\sigma_3$ ) untuk tekanan sel 49,05 kPa, 61,31 kPa, dan 73,58 kPa seperti disajikan pada Tabel 4.1. Tegangan deviator terbesar terjadi pada 1D, dan terus mengalami penurunan sampai ke 3D. Penurunan tegangan deviatorik yang terjadi sebesar  $\pm 6\%$  untuk masing-masing tekanan sel yang diberikan tiap diameternya.

Tabel 4. 1 Hasil uji triaksial kondisi UU

Diameter	$\Delta\sigma_{d,f}$ (kPa) pada tekanan sel:			$\phi$ (°)	c kg/cm <sup>2</sup>	Modulus Elastisitas, E50 (kPa)		
	49,05	61,31	73,58			49,05	61,31	73,58
1D	71,94	83,49	115,14	16,01	0	1525,78	1478,44	13855,33
2D	63,92	78,16	93,8	5,66	1,76	294,66	623,98	1555,75
3D	60,6	79,54	97,89	11,92	0	1283,19	4557,09	1105,20

Keterangan:  $\Delta\sigma_{d,f}$  = tegangan deviator saat runtuh;  $\phi$  = sudut gesek internal; c = kohesi

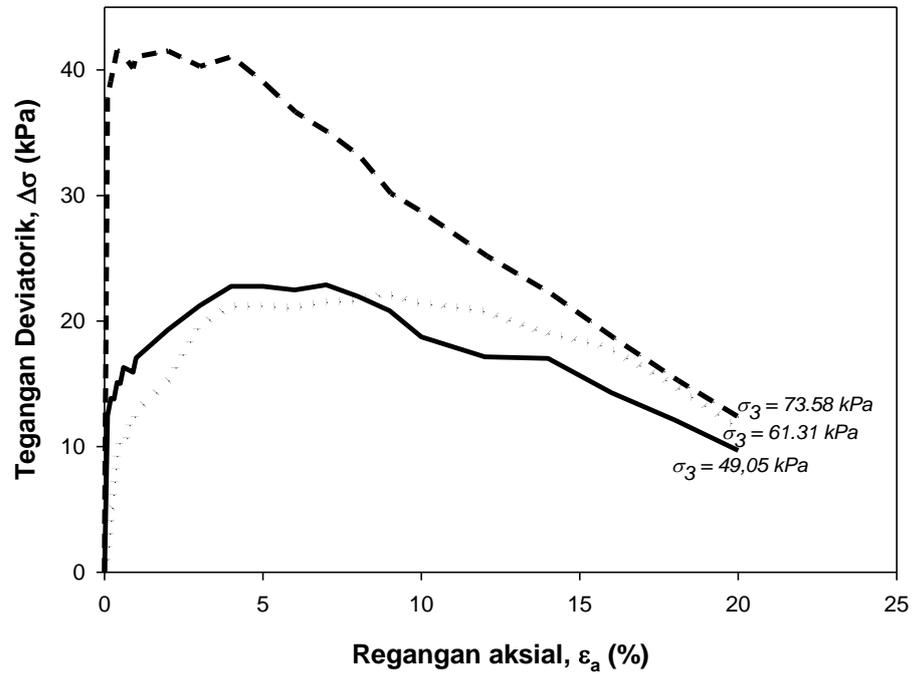
Parameter kuat geser yang dihasilkan yaitu sudut gesek internal dan kohesi. Nilai sudut gesek internal ( $\phi$ ) berkisar antara  $5,66^\circ$  sampai  $16,01^\circ$ , sedangkan nilai kohesi (c) berkisar antara  $0 \text{ kg/cm}^2$  sampai  $1,76 \text{ kg/cm}^2$ . Banyak faktor yang mempengaruhi besarnya kuat geser tanah yang diuji di laboratorium, salah satunya adalah angka pori dan kadar air. Tabel 4. 2 menyajikan hasil perhitungan dari kadar air, angka pori, dan derajat kejenuhan tanah.

Tabel 4. 2 Hasil perhitungan kadar air, angka pori, dan derajat kejenuhan tanah

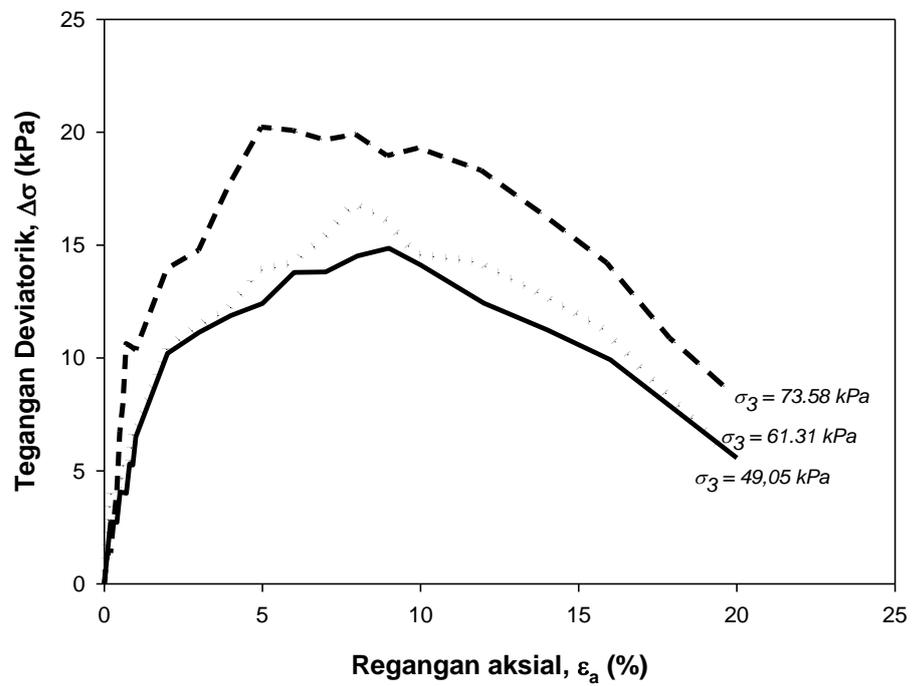
<b>Benda uji</b>	<b>Kadar air (%)</b>	<b>Angka pori</b>	<b>Derajat kejenuhan (%)</b>
1Da	48,34	1,39	91,62
1Db	49,94	1,53	85,81
1Dc	48,68	1,35	95,17
2Da	54,62	1,59	90,27
2Db	54,03	1,55	91,43
2Dc	56,24	1,63	90,85
3Da	51,63	1,4	97,31
3Db	51,98	1,47	93,16
3Dc	52,98	1,47	94,97

Rata-rata nilai angka pori pada titik 1D sebesar 1,42 dengan derajat kejenuhan sebesar 90,9%, untuk 2D sebesar 1,59 dengan derajat kejenuhan sebesar 90,9%, sedangkan untuk 3D sebesar 1,45 dengan derajat kejenuhan sebesar 95,1%.

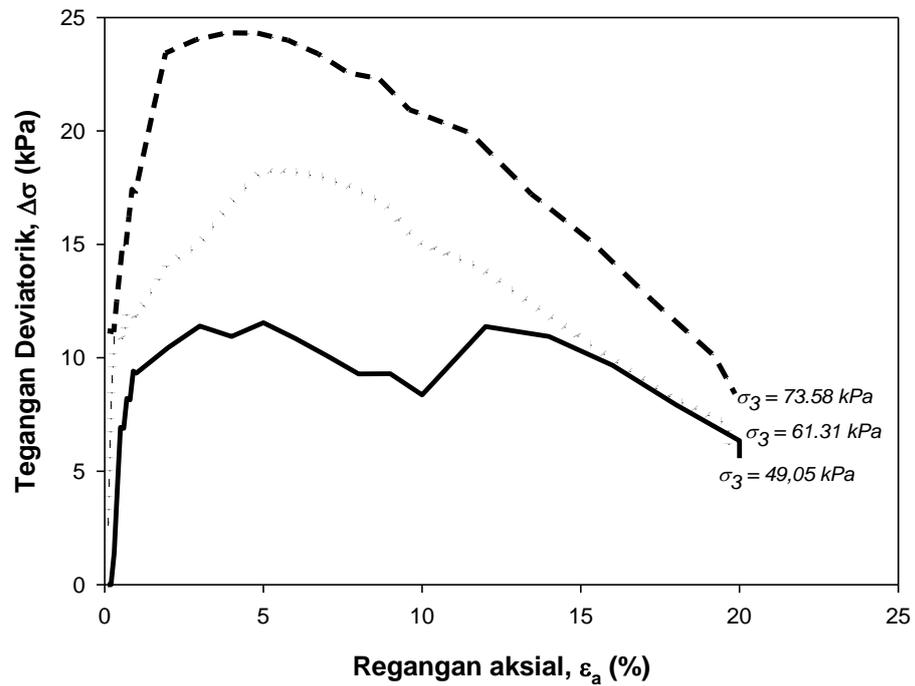
Parameter lainnya yang dapat diperoleh dari kurva hubungan tegangan deviator dengan regangan aksial adalah modulus elastisitas ( $E_{50}$ ). Sebagaimana telah dijelaskan pada tinjauan pustaka dimana nilai  $E_{50}$  didapat dari perbandingan tegangan deviator 50% dengan regangan pada saat tegangan deviatorik sebesar 50%. Modulus elastisitas terbesar terjadi pada 1D, dan terus mengalami penurunan sampai 3D. Tegangan deviator dan tegangan geser juga dapat dinyatakan dalam hubungan lintasan keruntuhan sebagai kurva  $p - q$  seperti pada Gambar 4.4.



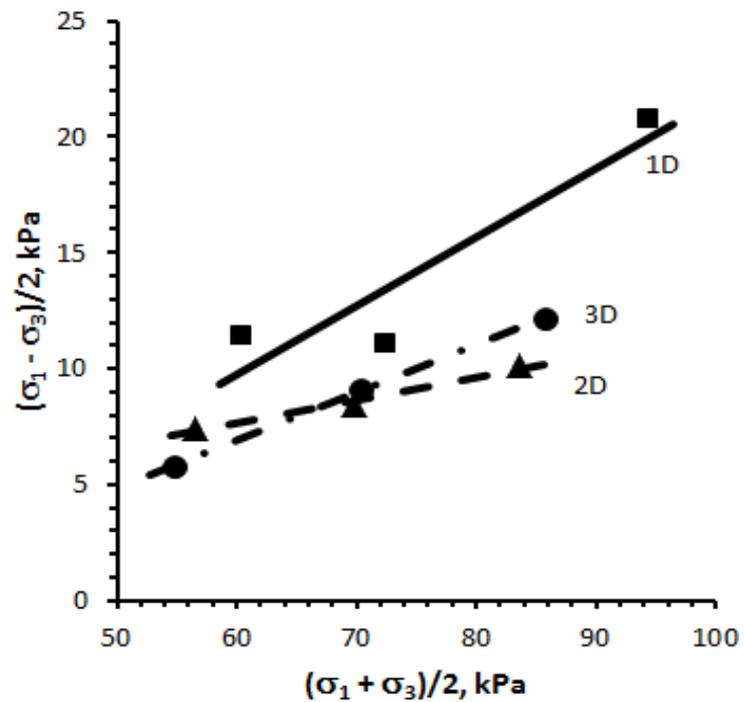
Gambar 4. 1 Kurva hubungan tegangan deviator dan regangan aksial 1D



Gambar 4. 2 Kurva hubungan tegangan deviator dan regangan aksial 2D



Gambar 4. 3 Kurva hubungan tegangan deviator dan regangan aksial 3D



Gambar 4. 4 Selubung keruntuhan pada uji triaksial UU

## 2. Uji triaksial CU

Hasil pengujian triaksial berupa hubungan tegangan deviator dengan regangan aksial diberikan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Secara umum, tegangan deviator ( $\Delta\sigma$ ) meningkat seiring dengan peningkatan tegangan sel ( $\sigma_3$ ) untuk tekanan sel 98,1 kPa, 196,2 kPa, dan 294,3 kPa pada masing-masing kondisi tanah tanpa stabilisasi kolom dan menggunakan stabilisasi kolom seperti disajikan pada Tabel 4.4.

Seperti yang sudah diuraikan pada tinjauan pustaka bahwa untuk uji triaksial CU, tekanan air pori yang berada pada benda uji tersebut bisa dihitung langsung saat pengujian berlangsung. Nilai angka pori berbanding lurus dengan tekanan sel yang diberikan, semakin besar tekanan sel yang diberikan maka semakin besar juga nilai angka pori pada benda uji tersebut (lihat Tabel 4.4). Pada kondisi tanpa stabilisasi kolom, tekanan air pori lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi menggunakan stabilisasi kolom. Setelah dilakukan stabilisasi menggunakan kolom, tekanan air pori berkurang sebesar  $\pm 12\%$ . Tekanan air pori pada pengujian CU dapat dinyatakan dengan parameter tekan air pori yaitu  $\bar{A}$  sebagaimana yang sudah dijelaskan pada tinjauan pustaka (lihat Tabel 4.3).

Tabel 4. 3 Hasil perhitungan parameter tekanan air pori

Variasi	Diameter	$u_d$	$\Delta\sigma_d$	$\bar{A}$
Tanpa stabilisasi kolom	3D	2,783	103,465	0,027
Menggunakan stabilisasi kolom	3D	2,810	116,861	0,024

Keterangan:  $u_d$  = air pori (dalam butiran tanah);  $\Delta\sigma_d$  = tegangan deviator saat runtuh;  $\bar{A}$  = parameter tekan air pori

Parameter kuat geser yaitu sudut gesek internal dan kohesi pada uji triaksial CU terdapat perbedaan dengan uji triaksial UU. Karena pada uji triaksial CU nilai angka pori pada benda uji diperhitungkan, maka terdapat nilai sudut gesek internal efektif dan kohesi efektif yang dihasilkan. Untuk tanah

dalam keadaan jenuh, tegangan akan ditahan oleh butiran tanah, oleh karena itu kuat geser tanah ditentukan oleh tegangan efektif. Nilai sudut gesek internal meningkat dan nilai kohesi menurun setelah dilakukannya stabilisasi menggunakan kolom SiCC dalam kondisi total maupun efektif seperti yang disajikan dalam Tabel 4.5. Sudut gesek internal meningkat sebesar 27,4% pada kondisi total dan 26,8% pada kondisi efektif, sedangkan nilai kohesi menurun sebesar 100% % pada kondisi total dan 43,6% pada kondisi efektif.

Parameter lainnya yang dapat diperoleh dari kurva hubungan tegangan deviator dengan regangan aksial adalah modulus elastisitas (E50). Secara umum, modulus elastisitas tanah yang sudah distabilisasi menggunakan kolom lebih besar daripada tanah tanpa stabilisasi kolom, yaitu sebesar 48,9%. Tegangan deviator dan tegangan geser juga dapat dinyatakan dalam hubungan lintasan keruntuhan sebagai kurva p – q seperti pada Gambar 4.7.

Tabel 4. 4 Hasil uji triaksial CU saat runtuh

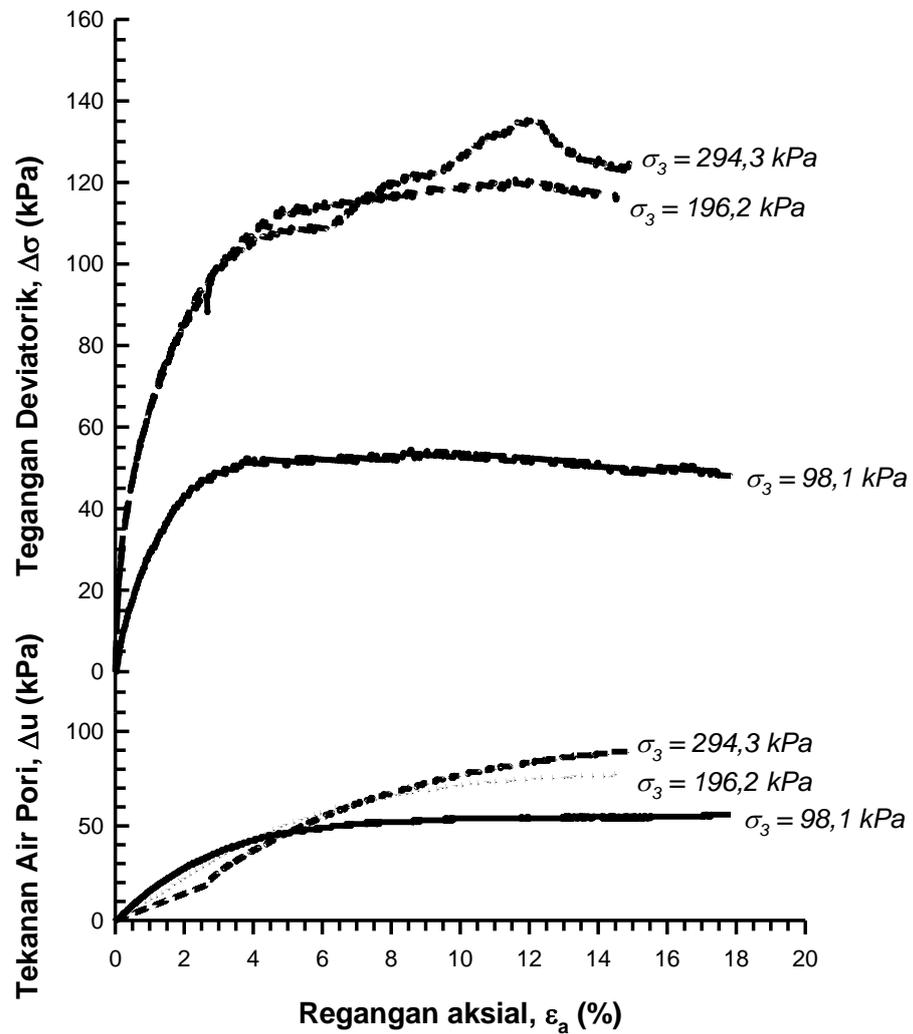
Variasi	Diameter	$\Delta\sigma_{d,f}$ (kPa) pada tekanan sel:			$\Delta u$ (kPa) pada tekanan sel:		
		98,1	196,2	294,3	98,1	196,2	294,3
Tanpa stabilisasi kolom	3D	54,39	120,78	135,22	51,99	74,56	83,39
Menggunakan stabilisasi kolom	3D	60,23	108,16	182,19	49,05	62,78	71,61

Keterangan:  $\Delta\sigma_{d,f}$  = tegangan deviator saat runtuh;  $\Delta u$  = tekanan air pori saat runtuh

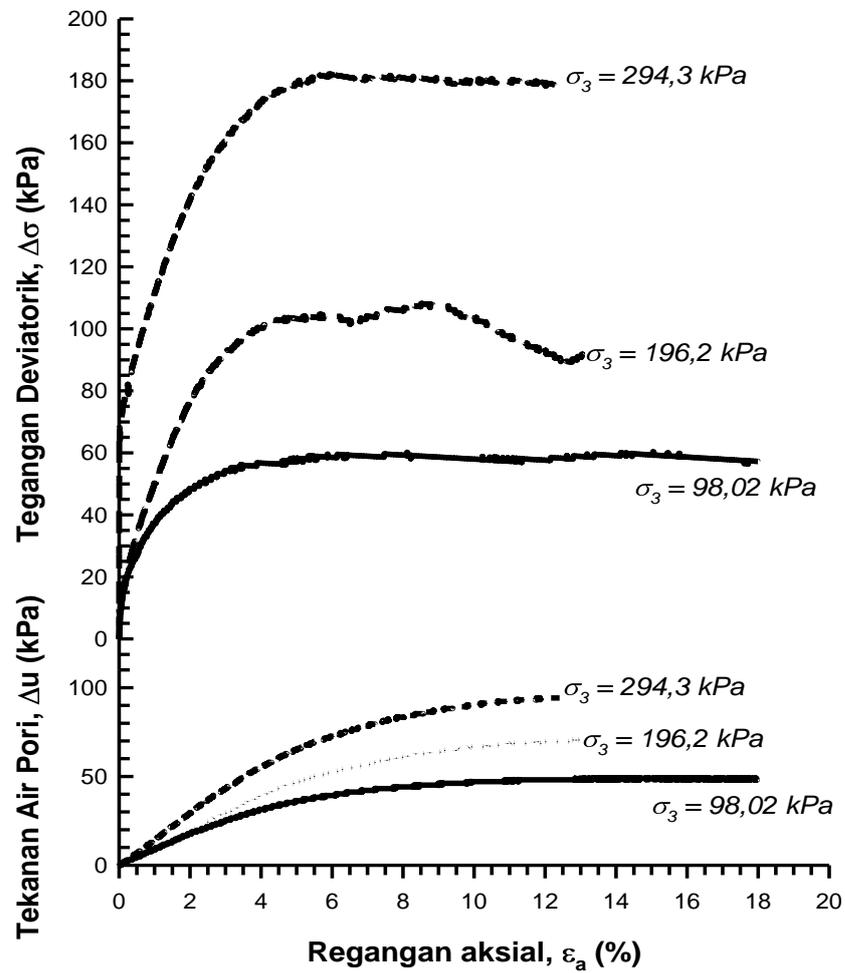
Tabel 4. 5 Hasil uji triaksial CU untuk parameter-parameter kuat geser

Variasi	Diameter	$\phi$ (°)	c kg/cm <sup>2</sup>	$\phi'$ (°)	c' kg/cm <sup>2</sup>	Modulus Elastisitas, E50 (kPa)		
						98,1	196,2	294,3
Tanpa stabilisasi kolom	3D	9,98	8,8	11,45	15,64	3021,64	6710,24	5634,27
Menggunakan stabilisasi kolom	3D	13,75	0	15,65	8,82	5019,04	4807,07	20243,88

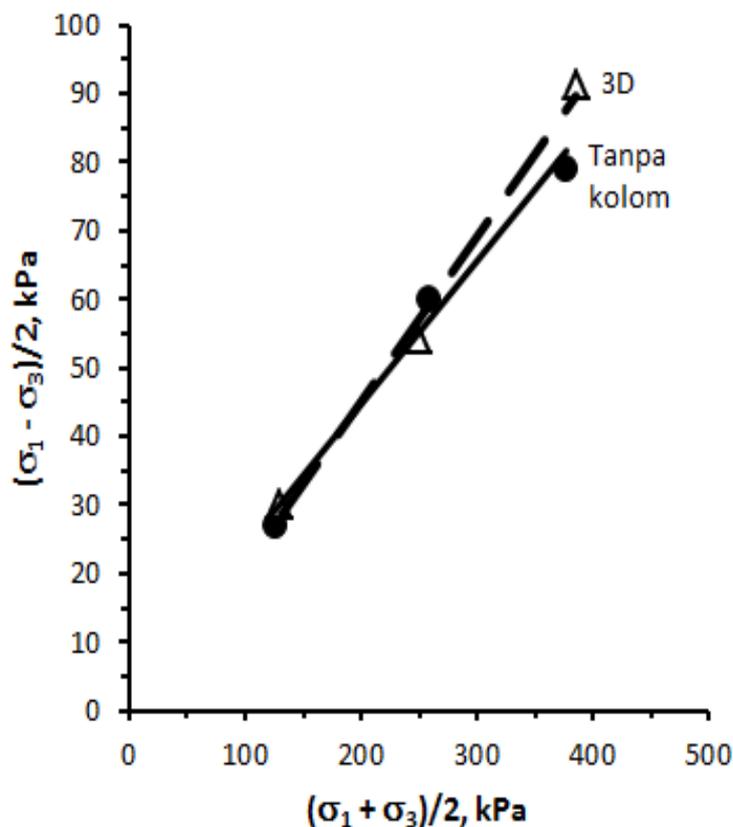
Keterangan:  $\phi$  = sudut gesek internal total; c = kohesi total;  $\phi'$  = sudut gesek internal efektif; c' = kohesi efektif



Gambar 4. 5 Kurva hubungan tegangan deviatorik dan regangan untuk benda uji tanah tanpa stabilisasi kolom



Gambar 4. 6 Kurva hubungan tegangan deviatorik dan regangan untuk benda uji tanah menggunakan stabilisasi kolom



Gambar 4. 7 Selubung keruntuhan tegangan total hasil uji triaksial CU

## B. Pembahasan

### 1. Parameter kuat geser terhadap jarak dari kolom

Kuat geser merupakan gaya atau tegangan dalam tanah yang diperlukan untuk menahan atau memberikan perlawanan geser akibat beban atau tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Kuat geser menurut Mohr dan Coulomb disumbangkan oleh dua parameter penting yaitu sudut gesek internal dan kohesi. Dari hasil pengujian, didapatkan nilai sudut gesek dan kohesi yang bervariasi untuk masing-masing diameter untuk uji triaksial UU maupun CU. Pada uji triaksial UU, nilai sudut gesek internal dan kohesi yang dihasilkan yaitu fluktuatif. Pada titik 1D nilai sudut gesek internal sebesar  $16,01^\circ$ , selanjutnya pada titik 2D sudut gesek internal mengalami penurunan, kemudian pada titik 3D sudut gesek internal mengalami kenaikan. Banyak faktor yang mempengaruhi besarnya kuat geser tanah yang diuji di laboratorium, salah

satunya adalah angka pori dan kadar air. Pada uji triaksial UU tanah diasumsikan berada pada kondisi jenuh air dengan koefisien tekanan air pori  $B = 1$ . Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah tersebut tidak berada pada kondisi jenuh air. Tabel 4. 2 menjelaskan bahwa derajat kejenuhan tanah tersebut  $\neq 1$ . Jika di rata-rata, dapat diurutkan nilai angka pori dari tertinggi ke terendah berada pada titik 2D dengan kadar air sebesar 55%, 3D dengan kadar air sebesar 52,2%, dan 1D dengan kadar air sebesar 49%. Semakin tinggi kadar air maka semakin tinggi juga angka pori dan derajat kejenuhannya, semakin tinggi angka pori maka kuat geser semakin rendah. Dalam penelitiannya Wambes (2015) juga menjelaskan bahwa semakin tinggi angka pori maka semakin rendah nilai kuat geser tanah dan sebaliknya. Sedangkan untuk hasil uji triaksial CU yang disajikan pada Tabel 4.5 menjelaskan bahwa nilai sudut geser internal cenderung meningkat seiring dengan dilakukannya stabilisasi menggunakan kolom SiCC. Hal tersebut berbanding terbalik terhadap kohesinya, nilai kohesi cenderung menurun dengan dilakukannya stabilisasi menggunakan kolom SiCC. Salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya kuat geser tanah pada uji triaksial CU yang diuji di laboratorium adalah nilai koefisien tekanan air pori. Seperti yang sudah dicantumkan pada Tabel 4.3 bahwa koefisien tekanan air pori pada kondisi tanpa stabilisasi kolom lebih besar daripada kondisi menggunakan stabilisasi kolom. Semakin tinggi koefisien tekanan air pori maka kuat geser semakin rendah dan sebaliknya semakin rendah koefisien tekanan air pori maka kuat geser semakin tinggi.

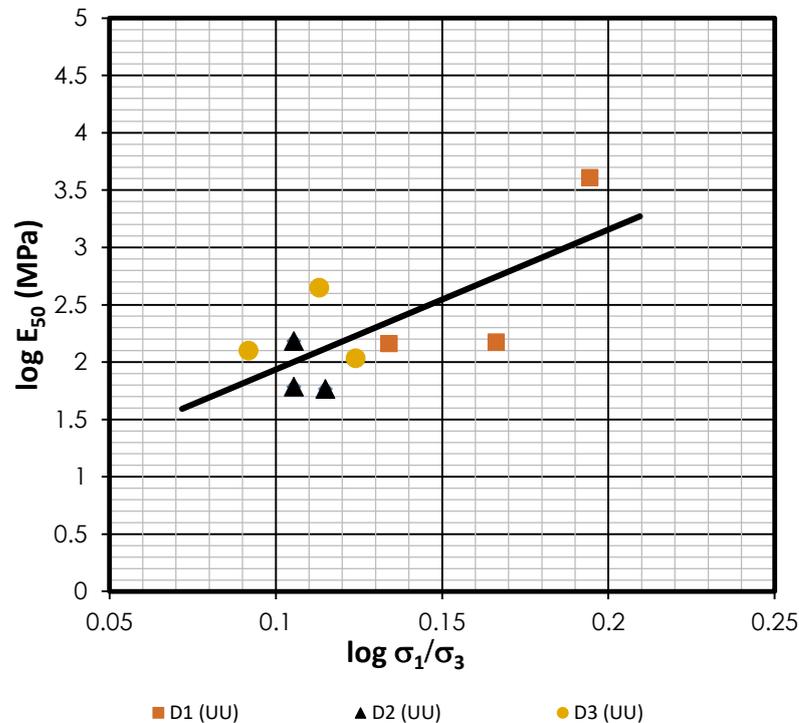
Stabilisasi tanah menggunakan kolom SiCC pada penelitian ini menghasilkan nilai  $c$  dan  $\phi$  yang bervariasi bergantung pada titik pengambilan tanah uji. Pada tanah yang sama, tingkat kejenuhan tanah memiliki nilai yang berbeda-beda sehingga parameter kuat geser yang dihasilkan juga bervariasi. Secara umum dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini kedua nilai parameter kuat geser yaitu sudut gesek internal dan kohesi tersebut tidak dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan kekuatan geser tanah tersebut. Hal tersebut disebabkan karena banyak faktor yang mempengaruhinya, salah satunya yaitu kadar air, angka pori, derajat kejenuhan, dan koefisien tekanan air pori.

## 2. Modulus elastisitas terhadap jarak dari kolom

Paramater lain yang dapat diperoleh dari uji triaksial adalah modulus elastisitas ( $E_{50}$ ). Modulus elastisitas adalah salah satu parameter yang digunakan untuk karakteristik kekakuan atau elastisitas tanah. Nilai  $E_{50}$  didapat dari perbandingan tegangan deviatorik 50% dengan regangan pada saat tegangan deviatorik 50% seperti yang disajikan pada Tabel 4.1 untuk uji triaksial UU dan pada Tabel 4.4 untuk uji triaksial CU. Berdasarkan nilai modulus elastisitas yang didapatkan pada uji triaksial UU menunjukkan bahwa semakin dekat dari pusat kolom nilai modulus elastisitas semakin meningkat, dan untuk uji triaksial CU menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas juga semakin meningkat dengan dilakukannya stabilisasi menggunakan kolom SiCC. Dari Gambar 4.8 menggambarkan hubungan tegangan  $E_{50}$  dan  $\sigma_1/\sigma_3$  yang menunjukkan bahwa sebaran data nilai  $E_{50}$  pada 1D lebih tinggi daripada D2 dan D3. Hal ini menunjukkan jika tanah yang distabilisasi menggunakan dan yang berada lebih dekat dengan kolom akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan dari tanah tersebut. Reaksi dasar yang terjadi antara tanah dan bahan kimia adalah hidrasi, pertukaran ion, polimerisasi, oksidasi, dan karbonasi. Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Muntohar dan Liao (2006) dan Muntohar (2009) memaparkan jika kolom kapur memberikan kontribusi untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah dalam arah radial hingga 3D-4D dari pusat kolom kapur. Kekuatan yang lebih tinggi terjadi di dekat kolom kapur dan menurun dengan jarak jauh dari pusat kolom.

Muntohar dan Liao (2006) menjelaskan dalam penelitiannya jika setelah dilakukannya stabilisasi menggunakan kolom kapur, kalsium atau ion kapur bermigrasi ke tanah disekeliling kolom kapur. Sifat-sifat tanah di sekitar kolom kapur akan berubah karena konsolidasi, densifikasi, dan pengerasan yang dihasilkan oleh reaksi kimia antara kapur dan tanah. Untuk efisien stabilisasi, kalsium dan ion hidroksil harus bermigrasi melalui tanah liat, karena ion hidroksil menyebabkan kondisi yang sangat alkalinic di tanah liat. Kondisi alkalinic menyebabkan proses sangat lambat dari alumino-silikat yang kemudian diendapkan sebagai hasil hidrasi dari reaksi semen. Hasil reaksi ini

menghasilkan flokulasi dengan ikatan partikel-partikel tanah yang berdekatan. Mekanisme ini akan mengontrol kekuatan tanah disekeliling kolom kapur.



Gambar 4. 8 Hubungan tegangan  $E_{50}$  dan  $\sigma_1/\sigma_3$  untuk berbagai jarak dari pusat kolom

Tegangan deviatorik dan tegangan geser dapat dinyatakan dalam hubungan lintasan keruntuhan sebagai kurva  $p - q$  seperti pada Gambar 4.4 untuk uji triaksial UU dan Gambar 4.7 untuk uji triaksial CU. Koordinat  $p$  merupakan pusat lingkaran Mohr dan  $q$  menunjukkan nilai kuat geser maksimum yang mana merupakan jari-jari lingkaran Mohr. Gambar 4.4 menjelaskan bahwa benda uji memiliki sifat yang nonmonotik, sedangkan untuk Gambar 4.7 menunjukkan bahwa benda uji memiliki sifat yang monotik.