

PENGARUH KADAR AIR TERHADAP PERILAKU MODULUS DEFORMASI TANAH LEMPUNG DI KAWASAN UNIVERSITAS BRAWIJAYA MALANG YANG DIPADATKAN SECARA STANDAR

As'ad Munawir, Herlin Indrawahyuni dan Elly Romy Haryani
Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
Jl. Mayjen Haryono 147 Malang

ABSTRAK

Metode test yang dipakai untuk mengetahui perilaku tegangan-regangan tanah lempung yang dipadatkan adalah dengan uji Triaxial UU. Dari hasil pengujian diperoleh nilai modulus deformasi dan karakteristik tanah lempung setelah mendapat perlakuan pemadatan. Perlakuan pemadatan pada benda uji menggunakan metode pemadatan standar, benda uji dipadatkan dalam cetakan yang volumenya didesain sesuai dengan volume benda uji Triaxial, berdasarkan rumus energi pemadatan dengan kadar air sebesar 34.44 %, 35.04 %, 35.69 %, 36.25 %, 36.70 %, 37.29 %, dan 37.63 % yang semuanya merupakan kadar air di atas kadar air optimum.

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku tegangan deviator-regangan tanah lempung yang dipadatkan dengan jenis pemadatan standar memiliki model matematis *non linear (polynomial)*, demikian pula halnya dengan tanah asli sehingga secara garis besar keduanya memperlihatkan pola yang hampir sama yaitu tidak linier. Kadar air berpengaruh pada besar tegangan runtuh, dimana nilai tegangan runtuh akan menurun jika tanah lempung dipadatkan dengan kadar air lebih tinggi. Tekanan kekang (σ_3) juga berpengaruh terhadap nilai tegangan runtuh, jika tanah lempung diuji pada tingkat tekanan kekang semakin tinggi maka tegangan runtuh akan meningkat sebanding dengan naiknya tekanan kekang tersebut walaupun diuji pada kadar air sama. Nilai modulus deformasi tanah lempung yang dipadatkan secara standar mengalami peningkatan nilai modulus deformasi sejalan dengan berkurangnya kadar air, hal ini disebabkan, semakin kecilnya kohesi pada waktu contoh tanah longsor dengan meningkatnya kadar air. Nilai kohesi (c) dari tanah lempung yang dipadatkan dengan jenis pemadatan standar akan mempunyai nilai optimum pada kadar air tertentu di daerah sisi kering optimum hal ini ditunjukkan dengan adanya peningkatan nilai kohesi sejalan dengan berkurangnya kadar air. Nilai sudut geser dalam (ϕ) tanah lempung yang dipadatkan dengan jenis pemadatan standar akan semakin meningkat dengan berkurangnya kadar air.

Kata Kunci : kadar air, tanah lempung, modulus deformasi

PENDAHULUAN

Salah satu jenis tanah yang dapat dijumpai di kawasan Universitas Brawijaya Malang adalah tanah kohesif jenis *Clay* (lempung). Pada kondisi alami, sering kali tanah lempung belum memenuhi syarat untuk mendukung beban luar sehingga perlu dilakukan perbaikan, salah satu cara adalah dengan pemadatan (*compaction*). Menurut R.F. Craig (1994), pemadatan merupakan

proses naiknya kerapatan tanah dengan memperkecil jarak antar partikel sehingga terjadi reduksi volume udara, tetapi tidak terjadi perubahan volume air yang berarti pada tanah. Proses pemadatan tanah lempung akan menghasilkan kekuatan geser lebih tinggi, sifat kompresibilitas rendah, dan sifat permeabilitas rendah sehingga tanah lempung cukup kuat untuk menahan beban luar.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dari penelitian sebelumnya antara lain seperti hasil penelitian yang dilakukan oleh Ramadhana A. Hirawan, diperoleh hubungan yang cenderung linier antara kekuatan tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air, hal ini tidak sesuai dengan teori dan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa hubungan antara kekuatan tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air adalah tidak linier. Hal ini disebabkan karena interval kadar air yang dipakai pada penelitian tersebut terlalu jauh, dan kurangnya variasi kadar air tersebut yaitu 27 %, 37 % (optimum), dan 42 %. Pada percobaan yang dilakukan oleh Budi Wibawa, analisa modulus deformasi tanah kohesif diperoleh dengan metode *secant* dari pengujian *Unconfined Compressive Strength*. Selanjutnya kasus ini dapat dikembangkan dengan menganalisa modulus deformasi dengan metode lainnya dan menggunakan jenis percobaan yang lain seperti *Triaxial Test*.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung (Clay)

Tanah lempung (*Clay*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung (*Clay minerals*), dan mineral-mineral yang sangat halus lainnya. Grim (1953) mendefinisikan bahwa tanah lempung adalah tanah yang mempunyai ukuran-ukuran mineral tertentu yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air. Jadi dari segi mineralnya, belum tentu tanah yang tersusun dari partikel-partikel sangat kecil dapat disebut sebagai tanah lempung. Sebagai contoh, partikel quartz, felspar, dan mika dapat berukuran submikroskopis tetapi umumnya tidak

Berdasarkan uraian di atas dan dukungan data dari penelitian sebelumnya, maka penelitian tentang modulus deformasi dengan pengujian triaxial UU pada tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang yang dipadatkan secara standar perlu dilakukan sebagai pembandingan dari hasil penelitian sebelumnya dan untuk mengetahui parameter-parameter tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang setelah mendapat perlakuan pemadatan. Oleh karena penelitian seperti ini belum dilakukan pada tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang, diharapkan hasil penelitian dapat bermanfaat dalam penggunaan tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang sebagai bahan pendukung beban luar, karena selain pengetahuan tentang daya dukung yang harus memenuhi syarat, perlu juga untuk diketahui sifat-sifat kompresibilitas tanah khususnya mengenai deformasi elastis tanah dari hasil pemadatan.

dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis dari tanah.

(Braja M. Das, 1985)

Modulus Deformasi Tanah

Modulus tegangan-regangan disebut juga modulus elastisitas atau modulus deformasi, yaitu suatu sifat bahan elastis yang didefinisikan sebagai suatu konstanta perbandingan antara tegangan dan regangan yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Sebagian besar bahan teknis menunjukkan perilaku linear pada suatu daerah tegangan tertentu (dan regangan yang bersesuaian), misalnya baja (gambar 2.5. a) menunjukkan perilaku linear sepanjang kisaran (*range*) tegangan yang terbesar yaitu sekitar 250

MPa, sedangkan beton, aluminium, besi tuang, kayu dan sebagainya akan berperilaku linier pada kisaran tegangan yang sangat terbatas. Disamping itu, walaupun kurva tegangan-regangan tidak linier untuk bahan-bahan ini, apabila contoh tidak mengalami tegangan diluar batas elastis, ia akan kembali kepada dimensi-dimensi aslinya apabila tegangan tersebut ditiadakan.

Tanah menunjukkan karakteristik tegangan-regangan yang linier hanya pada amplitudo regangan yang sangat rendah, yaitu sebesar 10^{-4} atau lebih kecil. Dalam uji triaxial yang biasa tidak ada data yang diperoleh pada tingkat regangan ini, selain itu contoh tidak akan kembali ke bentuknya yang semula, kecuali apabila percobaan dihentikan pada saat amplitudo regangan yang rendah tadi terjadi.

Setiap faktor yang dapat mengubah kemiringan kurva tegangan regangan akan mempengaruhi modulus deformasi. Faktor-faktor tersebut adalah berat isi tanah, sejarah geologi, bentuk butiran, jenis percobaan (UU, CU, dan CD), tekanan kekang, dan gangguan terhadap contoh tanah. Besaran modulus deformasi dibutuhkan untuk menghitung besarnya deformasi elastis tanah lempung yang dipadatkan.

Pemadatan (*Compaction*)

Pemadatan merupakan usaha untuk mempertinggi kerapatan tanah dengan energi mekanis untuk memperkecil jarak antar partikel tanah, sehingga terjadi reduksi volume udara dengan tidak terjadi perubahan volume air yang berarti.

Karakteristik pemadatan dari suatu tanah dapat diketahui dari uji laboratorium, yaitu *compaction test*. Uji ini pertama kali dikembangkan oleh Proctor (1933). Ada dua macam *compaction test* yang sering digunakan, yaitu *standart compaction test* dan *modified compaction test* yang masing-

masing terbagi dalam empat cara yaitu A, B, C dan D. Yang membedakan antara *standart compaction test* dan *modified compaction test* adalah berat penumbuk, tinggi jatuh dan jumlah lapisnya.

Pemeriksaan kepadatan pada penelitian ini menurut *standart compaction test* cara A, yaitu menggunakan tanah yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm), tanah dipadatkan dalam tiga lapisan, masing-masing lapis ditumbuk 25 kali dengan spesifikasi alat sebagai berikut :

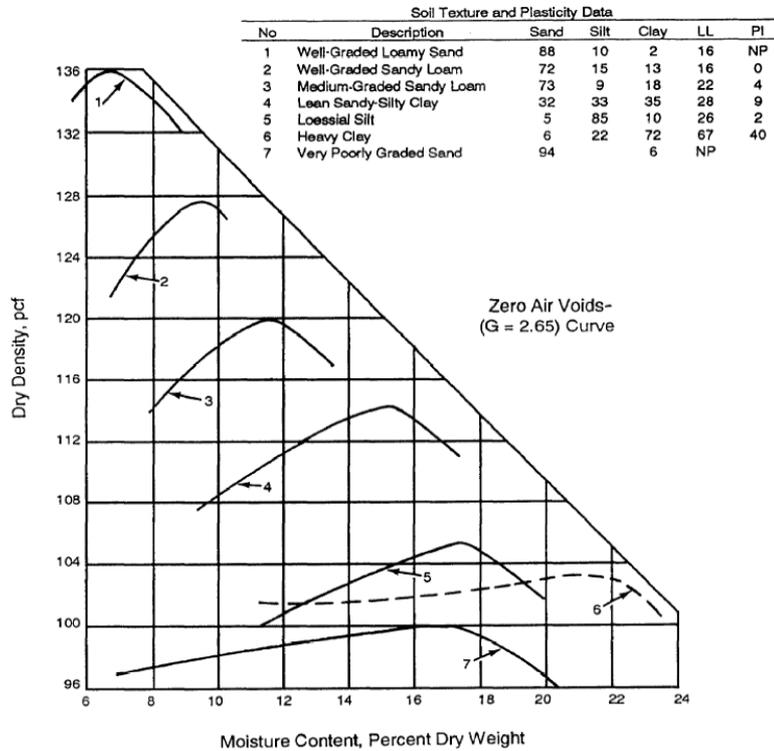
1. Diameter cetakan 4" (10,16 cm)
2. Tinggi cetakan 4,58" (11,64 cm)
3. Berat alat penumbuk 5,5 lb (2,5 kg)
4. Tinggi jatuh 12" (30,48 cm)

Proctor telah mengamati bahwa ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat isi kering agar tanah menjadi padat. Dimana terdapat suatu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat isi kering maksimumnya. Berat isi kering inilah yang menunjukkan derajat kepadatan tanah. Berat isi kering setelah pemadatan bergantung pada jenis tanah, kadar air, dan usaha serta energi pemadatannya.

Kurva yang dihasilkan dari pengujian memperlihatkan nilai kadar air yang terbaik untuk mencapai berat isi kering terbesar atau kepadatan maksimum. Kadar air pada keadaan ini disebut kadar air optimum (*optimum moisture content//OMC*). Pada kadar air yang rendah, untuk kebanyakan tanah cenderung bersifat kaku dan sulit dipadatkan. Setelah kadar air ditambah, tanah akan menjadi lebih lunak. Pada kadar air tinggi, berat isi kering berkurang. Bila seluruh udara dalam tanah dapat keluar pada saat pemadatan, tanah akan berada dalam keadaan jenuh dan nilai berat isi kering akan menjadi maksimum. Akan tetapi dalam prakteknya kondisi ini sangat sulit dicapai. Hubungan antara berat isi kering dengan kadar air bila derajat kejenuhan

adalah 100 % dapat digambarkan dengan sebuah garis yang disebut *zero air void*

line(ZAV *line*) atau garis derajat kejenuhan 100 %.



Gambar 1. Hasil pemadatan dari tujuh macam tanah yang berbeda

METODOLOGI PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Rancangan pembuatan benda uji untuk tiap benda uji ditampilkan dalam tabel 1. berikut :

Tabel 1. Rancangan pembuatan benda uji

No. Sampel	Kadar air (%)	σ_3 (kg/cm ²)	Regangan ($\Delta l/l$)	Tegangan (kg/cm ²)	Jumlah Sampel
1	OMC+14.25 %	1	X	X	2
2	OMC+14.25 %	2	X	X	2
3	OMC+14.25 %	3	X	X	2
4	OMC+37.10 %	1	X	X	2
5	OMC+37.10 %	2	X	X	2
6	OMC+37.10 %	3	X	X	2
7	OMC+44.72 %	1	X	X	2
8	OMC+44.72 %	2	X	X	2
9	OMC+44.72 %	3	X	X	2
10	OMC+52.33 %	1	X	X	2
11	OMC+52.33 %	2	X	X	2
12	OMC+52.33 %	3	X	X	2
13	OMC+59.95 %	1	X	X	2
14	OMC+59.95 %	2	X	X	2

15	OMC+59.95 %	3	X	X	2
16	OMC+67.57 %	1	X	X	2
17	OMC+67.57 %	2	X	X	2
18	OMC+67.57 %	3	X	X	2
19	OMC+75.18 %	1	X	X	2
20	OMC+75.18 %	2	X	X	2
21	OMC+75.18 %	3	X	X	2

PEMBAHASAN

Pengaruh kadar air terhadap deviator stress peak ($\Delta\sigma_{max}$)

Tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % memiliki grafik tegangan-regangan yang cenderung membentuk kurva yang lebih linier (bukan linier sesungguhnya) pada awal pembebanan. Hal ini disebabkan karena perpendekan benda uji yang menerima beban aksial terjadi sangat lambat akibat ketahanan tanah yang cukup keras sehingga mengakibatkan tercapainya tingkat tegangan maksimum yang lebih besar dibandingkan pada saat tanah lempung dipadatkan dengan kadar air 35.04 %, 35.69 %, 36.25 %, 36.70 %,

37.29 %, dan 37.63 %. Oleh karenanya dapat disimpulkan bahwa apabila tanah lempung dipadatkan pada tingkat kadar air rendah maka tanah tersebut dapat menahan tegangan yang lebih besar dari pada tanah lempung dipadatkan pada tingkat kadar air lebih tinggi.

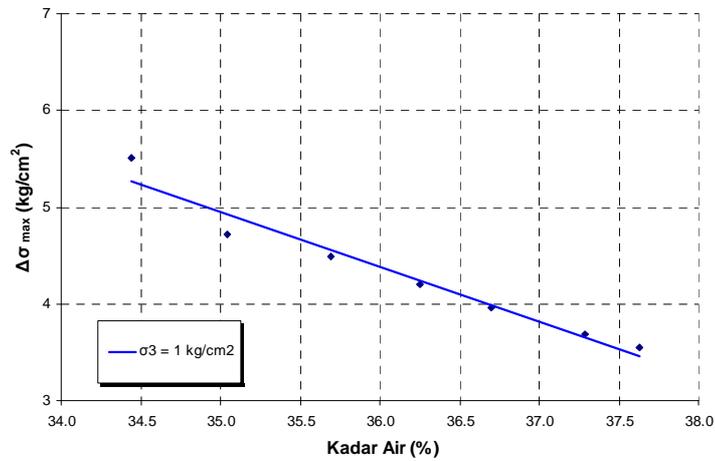
Puncak (Peak) tegangan deviator ($\Delta\sigma_{max}$) didapatkan dari grafik tegangan deviator-regangan dengan mengambil nilai maksimum tegangan deviator dari hasil perhitungan yang telah dilampirkan dalam tabel. Pada tabel 2. dapat dilihat bahwa puncak tegangan deviator ($\Delta\sigma_{max}$) dipengaruhi oleh besarnya kadar air pada waktu pemadatan benda uji.

Tabel 2. *Deviator stress Peak* ($\Delta\sigma_{max}$) dari grafik tegangan-regangan pada tanah lempung yang dipadatkan secara standar, pada uji Triaxial UU.

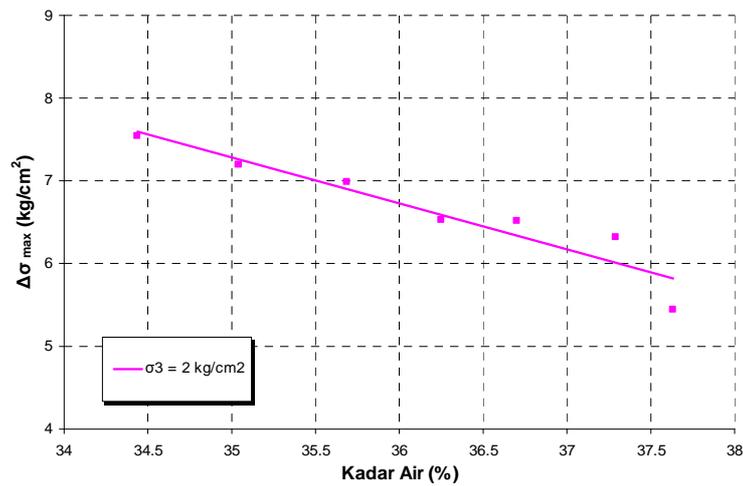
Volume Air (cc)/ Kadar air (%)	$\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$	
	$\Delta\sigma_{max}$ (kg/cm^2)	Rerata	$\Delta\sigma_{max}$ (kg/cm^2)	Rerata	$\Delta\sigma_{max}$ (kg/cm^2)	Rerata
OMC + 14.25% 34.44%	5.545 5.466	5.506	7.648 7.434	7.541	10.555 10.252	10.404
OMC + 3 7.10% 35.04%	4.706 4.737	4.722	7.265 7.129	7.197	9.565 9.729	9.647
OMC + 44.72% 35.69%	4.425 4.554	4.490	7.254 6.724	6.989	8.668 9.090	8.879
OMC + 52.33% 36.25%	4.074 4.335	4.205	6.537 6.507	6.522	9.620 9.061	9.341
OMC + 59.95% 36.70%	3.974 3.955	3.965	6.341 6.678	6.510	8.674 8.565	8.620
OMC+ 67.57% 37.29%	3.751 3.626	3.689	6.388 6.242	6.315	8.331 8.230	8.281
OMC + 75.18% 37.63%	3.345 3.744	3.545	5.528 5.366	5.447	8.025 7.604	7.815

Dari tabel di atas dapat dibuat grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai

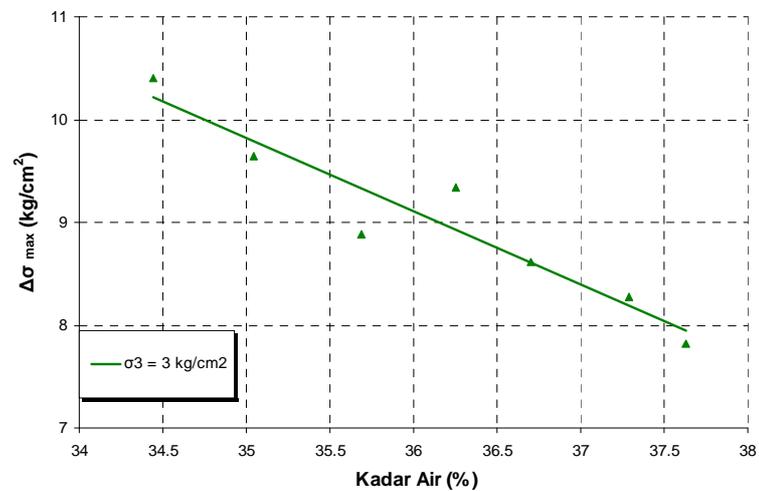
$\Delta\sigma_{\max}$ seperti dalam gambar 2. sampai 4.



Gambar 2. Grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai $\Delta\sigma_{\max}$ pada $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$



Gambar 3. Grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai $\Delta\sigma_{\max}$ pada $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$



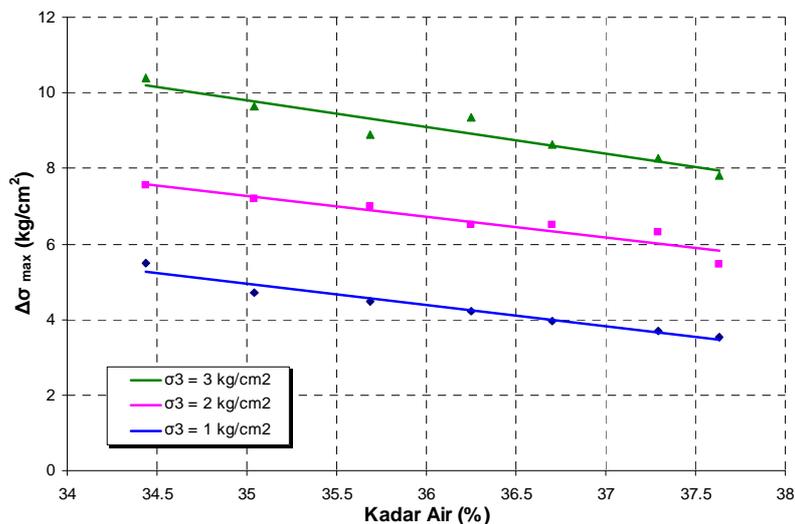
Gambar 4. Grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai $\Delta\sigma_{\max}$ pada $\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$

Pengaruh tekanan kekang terhadap deviator stress peak ($\Delta\sigma_{max}$)

Dari grafik tegangan deviator-regangan tanah lempung yang dipadatkan, dapat dilihat bahwa tekanan kekang (σ_3) sangat berpengaruh terhadap perilaku tegangan deviator-regangan, yaitu ditunjukkan dengan semakin tinggi nilai tekanan kekang yang diberikan maka meningkat pula nilai tegangan runtuhnya. Hal ini dikarenakan dengan adanya peningkatan tekanan kekang (σ_3), maka ketahanan benda uji dalam mempertahankan bentuk akibat gaya aksial yang diterima juga akan semakin kuat, sehingga keruntuhan benda uji baru dapat terjadi pada tingkat beban aksial

yang lebih besar. Kondisi ini dapat dilihat melalui tabel 4.6. dimana puncak tegangan deviator ($\Delta\sigma_{max}$) dipengaruhi oleh besarnya tekanan kekang (σ_3) yang diberikan pada saat percobaan dan besarnya kadar air pada waktu pemadatan benda uji.

Dari tabel 4.6. juga dapat dibuat grafik seperti gambar 5 yang menunjukkan hubungan antara kadar air terhadap nilai $\Delta\sigma_{max}$ untuk berbagai tingkat tekanan kekang yang diberikan pada benda uji. Dari grafik tersebut dapat kita lihat adanya peningkatan nilai puncak tegangan deviator ($\Delta\sigma_{max}$) sebanding dengan peningkatan tekanan kekang yang diberikan.



Gambar 5. Grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai $\Delta\sigma_{max}$ untuk berbagai tingkat tegangan kekang

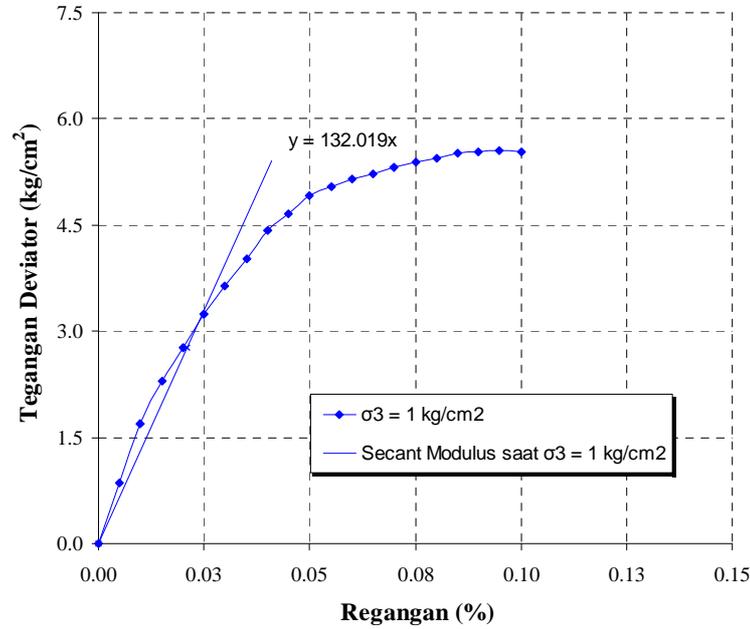
Modulus Deformasi Secant (Secant Modulus)

Nilai *secant modulus* (E_s saat $\Delta\sigma$ 50 %) diperoleh dari grafik tegangan deviator-regangan dengan membuat kemiringan suatu garis lurus yang ditarik dari titik awal ke beberapa tingkat tegangan yang ditentukan yaitu sekitar 50 % dari tegangan maksimum. Kemiringan

garis yang dibentuk dari kedua titik inilah yang merupakan penentu nilai *secant modulus*. Pada contoh tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % dengan pemberian tekanan kekang $\sigma_3 = 1$ kg/cm² diperoleh persamaan garis $y = 132.019 x$ yang dapat dicari dengan rumus :

$$\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} \Rightarrow (x_1, y_1) = (0,0) \text{ sehingga } \frac{x}{x_2} = \frac{y}{y_2}.$$

Pada contoh diatas didapatkan nilai 50 % $\Delta\sigma_{\max}$ pada titik $(x_2, y_2) = (0.0210 : 2.7724)$ sehingga $\frac{x}{0.0210} = \frac{y}{2.7724} \Rightarrow y = \frac{2.7724}{0.0210}x \Rightarrow y = 132.019x$. Kemiringan garis sebesar 132.019 inilah yang merupakan nilai *secant modulus* seperti yang digambarkan berikut ini.



Gambar 6.. *Secant modulus* untuk $\sigma_3=1 \text{ kg/cm}^2$

Hasil perhitungan *secant modulus* untuk masing-masing benda uji lainnya

secara keseluruhan dengan cara yang sama dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *secant modulus* dari grafik tegangan-regangan tanah lempung yang dipadatkan secara standar dengan variasi kadar air, pada uji Triaxial UU

Volume Air (cc)/ Kadar air (%)	$\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$	
	Secan Modulus	Rerata	Secan Modulus	Rerata	Secan Modulus	Rerata
OMC + 14.25% 34.44%	132.019 132.676	132.347	136.577 135.164	135.870	138.876 138.538	138.707
OMC + 3 7.10% 35.04%	130.711 130.858	130.784	132.084 131.522	131.803	134.714 134.361	134.538
OMC + 44.72% 35.69%	128.638 127.911	128.275	130.002 131.333	130.667	133.605 132.866	133.235
OMC + 52.33% 36.25%	126.520 126.015	126.268	128.675 128.587	128.631	129.756 130.604	130.180
OMC + 59.95% 36.70%	122.655 121.308	121.982	125.311 124.586	124.948	128.696 128.599	128.648
OMC + 67.57% 37.29%	118.711 118.417	118.564	122.845 122.384	122.615	125.087 126.609	125.848
OMC + 75.18% 37.63%	95.576 96.002	95.789	110.564 107.319	108.941	123.465 122.650	123.057

Nilai Sudut Geser Tanah Lempung yang Dipadatkan

Nilai sudut geser dalam (ϕ) dapat diketahui melalui kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan secara tidak langsung dari grafik jalur tegangan (*stress path diagram*).

Melalui kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, nilai sudut geser dalam bisa langsung diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-11) yaitu : $\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 (45^\circ + \phi'/2) + 2c' \tan (45^\circ + \phi'/2)$. Pada perhitungan nilai sudut geser dalam terhadap tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % didapatkan nilai ϕ sebesar 33.51° seperti yang dapat dilihat pada contoh terlampir.

Selanjutnya dengan grafik jalur tegangan (*stress path diagram*) nilai

sudut geser dalam didapatkan dengan rumus $\phi = \sin^{-1}(\tan \psi)$. Dimana nilai ψ diperoleh dari grafik p-q yang menghubungkan *principal stress* (p) atau $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ dengan *shear stress* (q) atau $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Nilai ψ merupakan besarnya sudut kemiringan garis regresi terhadap sumbu horizontal yang bisa dicari dari persamaan garis regresi yang telah didapat dalam gambar dengan cara menghitung anti tangen dari kemiringan garis regresi linier tersebut.. Untuk mendapatkan persamaan garis regresi dilakukan perhitungan regresi linier sederhana. Contoh perhitungan regresi linier sederhana pada tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pehitungan Regresi Linier Sederhana (Percobaan triaxial pada benda uji dengan kadar air 34.44 %)

No	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ (kg/cm ²) x	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (kg/cm ²) y	Δx	Δx^2	$(\Delta x \cdot y)$ Dy
1	3.772	2.772	-2.136	4.56216	-5.922
2	5.824	3.824	-0.084	0.00708	-0.322
3	8.277	5.277	2.369	5.61204	12.502
4	3.733	2.733	-2.175	4.73144	-5.945
5	5.717	3.717	-0.191	0.0366	-0.711
6	8.126	5.126	2.218	4.91775	11.367
Jumlah	35.45	23.45	0.001	19.867	10.969
Rata-rata	5.908	3.908			

Tabel 5. Hasil perhitungan persamaan garis regresi diagram p-q

Kadar air (%)	Volume penambahan air (cc)	Persamaan garis regresi
34.44 %	OMC + 14.25%	$y = 0.5521x + 0.6461$
35.04 %	OMC +3 7.10%	$y = 0.552x + 0.5063$
35.69 %	OMC + 44.72%	$y = 0.5499x + 0.4621$
36.25 %	OMC + 52.33%	$y = 0.5396x + 0.425$
36.70 %	OMC + 59.95%	$y = 0.5386x + 0.3909$
37.29 %	OMC+ 67.57%	$y = 0.5356x + 0.344$
37.63 %	OMC + 75.18%	$y = 0.5181x + 0.3136$

Dengan cara yang sama didapatkan besarnya nilai ψ dan ϕ untuk masing-

masing benda uji yang lain secara keseluruhan dapat dilihat pada tabel 6.

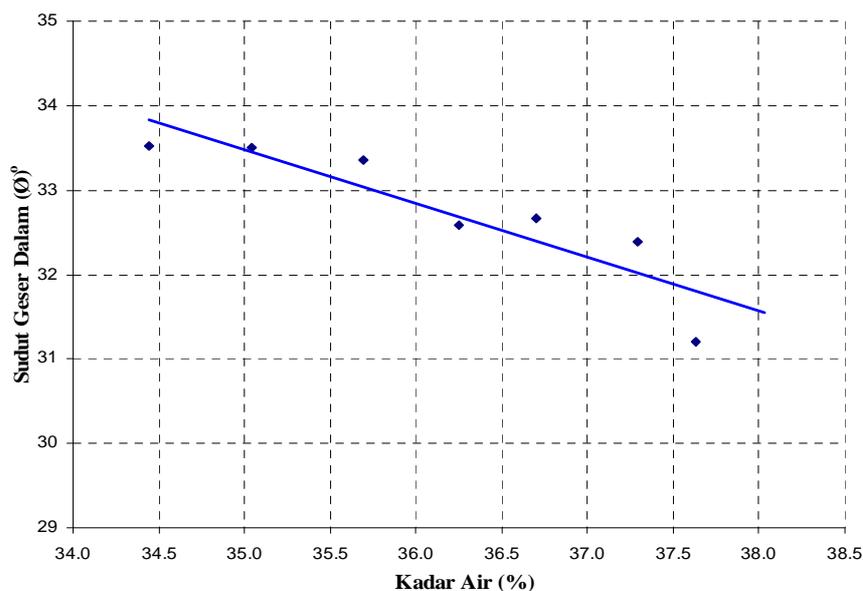
Tabel 6. Nilai ψ dan ϕ dari grafik p-q pada tanah lempung yang dipadatkan secara standar dengan variasi kadar air, pada uji Triaxial UU.

Kadar air	$(\psi)^\circ$	Nilai Sudut Geser Dalam $(\phi)^\circ$
34.44%	28.904	33.513
35.04%	28.897	33.502
35.69%	28.805	33.358
36.25%	28.353	32.659
36.70%	28.308	32.590
37.29%	28.172	32.382
37.63%	27.389	31.206

Pada tabel 6. ditunjukkan bahwa nilai ϕ lebih besar pada tanah lempung yang dipadatkan pada kadar air rendah dari pada apabila tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air tinggi. Kondisi ini serupa dengan hubungan kadar air terhadap nilai modulus deformasi tanah lempung yang dipadatkan, yaitu dengan meningkatnya kadar air akan mengakibatkan semakin kecilnya modulus deformasi tanah tersebut. Hal ini terjadi karena dengan

menurunnya nilai sudut geser dalam (ϕ) mengakibatkan perlawanan tanah tersebut terhadap keruntuhan akan semakin kecil dengan meningkatnya kadar air.

Dengan mengplotkan data pada tabel diatas, didapatkan suatu grafik hubungan antara kadar air terhadap nilai sudut geser dalam ϕ seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik hubungan kadar air dengan sudut geser dalam (ϕ) tanah lempung yang dipadatkan secara standar.

Nilai kohesi Tanah Lempung yang Dipadatkan

Hasil uji Triaxial UU tidak hanya mendapatkan nilai sudut geser dalam (ϕ), tetapi juga mendapatkan nilai kohesi (c) tanah lempung yang dipadatkan secara standar. Nilai kohesi dapat dicari dengan menggunakan rumus $c = \frac{\alpha}{\cos \phi}$, dimana

nilai α didapatkan dari *stress path diagram* pada gambar 4.23. sampai 4.29. yang menghubungkan antara *principal stress* (p) atau $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ dengan *shear stress* (q) atau $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Sebagai gambaran, pada contoh tanah lempung

yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % dalam gambar 4.23. didapat persamaan garis regresi $y = 0.5521x + 0.6461$, dimana 0.6461 merupakan nilai α dari contoh perhitungan tersebut dengan satuan kg/cm^2 saat kadar air 34.44 %. Selanjutnya dengan rumus

$c = \frac{\alpha}{\cos \phi}$ didapatkan nilai

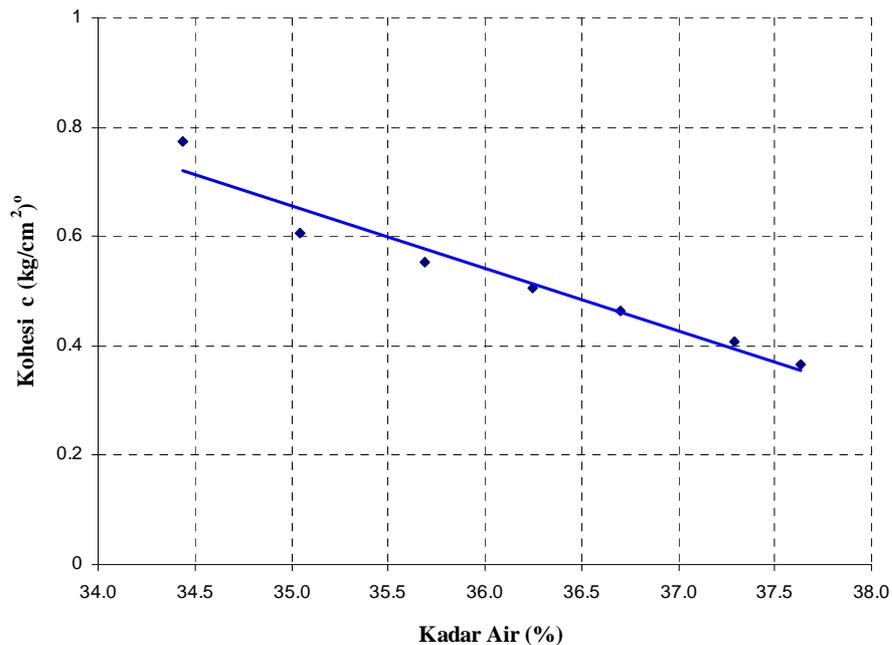
$c = \frac{0.646}{\cos 33.511^\circ} = 0.775$. Besarnya nilai α dan c untuk masing-masing benda uji yang lain secara keseluruhan dengan cara yang sama dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai α dan c dari teori keruntuhan Mohr-Coulomb pada tanah lempung yang dipadatkan secara standar dengan variasi kadar air, pada uji Triaxial UU.

Kadar air	α (kg/cm^2)	c (kg/cm^2)
34.44 %	0.646	0.775
35.04 %	0.506	0.607
35.69 %	0.462	0.553
36.25 %	0.425	0.505
36.70 %	0.391	0.464
37.29 %	0.344	0.407
37.63 %	0.314	0.367

Dengan mengplotkan data pada tabel diatas, didapatkan suatu grafik hubungan

antara kadar air terhadap nilai kohesi (c) seperti terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Grafik hubungan kadar air dengan nilai kohesi (c) tanah lempung yang dipadatkan secara standar.

Dari gambar 4.22. dapat dilihat bahwa peningkatan kadar air pada saat pemadatan tanah lempung menyebabkan turunnya nilai kohesi (c). Penurunan nilai kohesi ini disebabkan oleh adanya pergerakan partikel-partikel tanah yang saling menjauhi satu sama lain akibat pori-pori tanah terisi oleh air sehingga ikatan antar butiran tanah melemah. Hal ini serupa dengan hubungan kadar air terhadap nilai modulus deformasi tanah lempung yang dipadatkan, yaitu dengan meningkatnya kadar air akan mengakibatkan semakin kecilnya modulus deformasi tanah tersebut. Hal

ini disebabkan karena semakin kecilnya kohesi pada waktu contoh tanah longsor dengan meningkatnya kadar air.

Uji Korelasi

Untuk mengetahui seberapa besar prosentase pengaruh peningkatan kadar air dan tekanan kejang terhadap *initial modulus*, *secant modulus*, dan parameter kuat geser tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang yang meliputi nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (Φ), maka dalam penelitian ini digunakan uji korelasi.

Tabel 8. Hasil Uji Korelasi

No.	Macam Uji Korelasi	Pengaruh (%)
1	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 34.44 %	98.108
2	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 35.04 %	99.136
3	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 35.69 %	92.610
4	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 36.25 %	99.981
5	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 36.70 %	99.997
6	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 37.29 %	93.173
7	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>initial modulus</i> saat kadar air 37.63 %	95.215
8	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 34.44 %	99.614
9	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 35.04 %	93.853
10	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 35.69 %	99.958
11	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 36.25 %	98.577
12	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 36.70 %	99.597
13	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 37.29 %	99.581
14	Peningkatan tekanan kejang terhadap nilai <i>secant modulus</i> saat kadar air 37.63 %	99.958
15	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>initial modulus</i> dengan $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$	96.659
16	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>initial modulus</i> dengan $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$	98.870
17	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>initial modulus</i> dengan $\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^2$	98.659
18	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>secant modulus</i> dengan $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$	68.627
19	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>secant modulus</i> dengan $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^3$	79.626
20	Peningkatan kadar air terhadap nilai <i>secant modulus</i> dengan $\sigma_3 = 3 \text{ kg/cm}^4$	98.377
21	Peningkatan kadar air terhadap nilai sudut geser dalam (Φ)	81.960
22	Peningkatan kadar air terhadap nilai sudut kohesi (c)	94.774

Dari tabel di atas bisa dilihat bahwa peningkatan kadar air dan tekanan kejang memberikan pengaruh yang sangat besar dan nyata terhadap modulus deformasi, nilai kohesi (c) dan sudut

geser dalam tanah (ϕ). Hal ini bisa diketahui dari nilai koefisien korelasi (r) yang relatif mendekati angka satu dan nilai koefisien penentu (K_p) mendekati 100%.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian Triaxial UU, analisis data dan pembahasan pada tanah lempung di kawasan Universitas Brawijaya Malang, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Perilaku tegangan deviator-regangan tanah lempung yang dipadatkan dengan jenis pemadatan standar memiliki model matematis *non linear (polynomial)*, demikian pula halnya dengan tanah asli sehingga secara garis besar keduanya memperlihatkan pola yang hampir sama yaitu tidak linier. Namun dapat dilihat perbedaannya, tegangan runtuh tanah lempung undisturbed diperoleh 2.505 kg/cm^2 dengan kadar air 33.213 % sedangkan setelah dipadatkan pada kadar air 34.44 % tegangan runtuhnya menjadi 5.506 kg/cm^2 . Hal ini menunjukkan perilaku tegangan deviator-regangan tanah lempung yang dipadatkan, tegangan runtuhnya dicapai pada tingkat tegangan deviator yang besar, walaupun diuji pada tingkat tekanan kejang yang sama.
2. Pemadatan tanah lempung pada kadar air 34.44 % menghasilkan tegangan deviator maksimum 5.506 kg/cm^2 . Tegangan runtuh ini terus menurun dengan meningkatnya kadar air, diantaranya mencapai 3.545 kg/cm^2 pada kadar air 37.63 %. Tetapi jika tegangan kejang (σ_3) diperbesar, tegangan deviatornya juga akan meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar tekanan kejang yang diberikan, semakin besar pula beban yang dapat diterima oleh tanah lempung tersebut. Oleh karenanya tekanan kejang (σ_3)

berpengaruh terhadap nilai tegangan runtuh, jika tanah lempung diuji pada tingkat tekanan kejang semakin tinggi maka tegangan runtuh akan meningkat sebanding dengan naiknya tekanan kejang tersebut walaupun diuji pada kadar air sama.

3. Tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air 34.44 % menghasilkan *initial modulus* 192.556 pada tekanan kejang 1 kg/cm^2 dan terus mengalami penurunan sejalan dengan bertambahnya kadar air, diantaranya mencapai 112.803 pada kadar air 37.63 %. Begitu juga dengan nilai *secant modulus* tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air rendah, nilainya lebih besar dari pada jika tanah lempung dipadatkan pada kadar air tinggi. Nilai *secant modulus* terbesar adalah 132.347 pada kadar air 34.44 % dengan tekanan kejang 1 kg/cm^2 , setelah penambahan kadar air pada 37.63 % diperoleh *secant modulus* terkecil senilai 95.789. Nilai ini terus meningkat jika diberi tekanan kejang yang lebih besar. Sehingga selain kadar air, tekanan kejang (σ_3) juga sangat berpengaruh terhadap besarnya nilai modulus deformasi, hal ini merupakan akibat dari peningkatan ketahanan tanah untuk menahan tegangan yang semakin besar pada tingkat tekanan kejang yang semakin tinggi. Melalui uji korelasi, besarnya pengaruh kadar air dan tekanan kejang terhadap modulus deformasi tanah ditunjukkan dengan nilai koefisien penentu yang mencapai 99.997 %.

4. Sama halnya dengan modulus deformasi tanah lempung yang dipadatkan, parameter kuat geser tanah lempung yang dipadatkan dengan kadar air lebih rendah, nilainya lebih besar dari pada jika tanah lempung dipadatkan pada kadar air tinggi. Nilai kohesi (c) tanah asli dalam kondisi tak terganggu adalah 0.466 kg/cm^2 . Setelah mendapat perlakuan pemadatan dengan beberapa variasi kadar air, nilai kohesi terkecil adalah 0.367 kg/cm^2 , yaitu pada kadar air 37.63 %. Sedangkan nilai kohesi terbesar adalah 0.775 kg/cm^2 , yaitu pada kadar air 34.44 %. Untuk nilai sudut geser dalam (ϕ) tanah dalam kondisi tak terganggu adalah 21.242° . Setelah mendapat perlakuan pemadatan dengan beberapa variasi

kadar air, nilai sudut geser dalam tanah (ϕ) terkecil adalah 31.206° , yaitu pada kadar air 37.63 %. Sedangkan nilai sudut geser dalam tanah (ϕ) terbesar adalah 33.513° , yaitu pada pemadatan dengan kadar air 34.44 %.

5. Dari uji korelasi didapat bahwa pemadatan dengan variasi kadar air yang terus meningkat dan pemberian tekanan kekang yang bervariasi memberikan pengaruh yang sangat besar dan nyata terhadap modulus deformasi tanah lempung, nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ). Hal ini bisa diketahui dari nilai koefisien korelasi (r) yang relatif mendekati angka satu dan nilai koefisien penentu yang mendekati 100%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang sebagai tempat

pelaksanaan penelitian serta semua pihak atas dukungan dan partisipasinya selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Bowles, Joseph E. 1986. *Sifat-sifat Fisis dan geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*, terjemahan Johan K. Hainim. Jakarta : Erlangga.

Budhu, Muni. 2000. *Soil Mechanics and Foundations*. New York : John Wiley & Sons Inc.

Bell, F. G. 1993. *Engineering Treatment of Soil*. London : E & FN Spon.

Craig, R. F. 1994. *Mekanika Tanah. Edisi keempat, terjemahan Budi Susilo S. Jakarta : Erlangga*

Cernica, J.N. 1995. *Geotechnical Engineering. Soil Mechanics*. New York : John Wiley & Sons, Inc.

Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis). Jilid 1, terjemahan*

Noor Endah dan Indahsurya B. Mochtar. Jakarta : Erlangga.

Davison, Leslie, Dr. 2000. *Soil description and classification*. Universitas of the west England. Bristol.

Dunn L. S., Anderson, L.R., Kiefer, F. W. 1992. *Dasar-dasar Analisis Geoteknik*. New York : John Wiley & Sons Inc.

Graham, Blaiz and Alfaro. 2000. *Behavioural Influence of specimen preparation method for unsaturated plastic compacted clays*.

Gunawi. 1995. “ Perilaku tegangan-regangan dengan uji triaxial (UU) pada tanah lempung yang dipadatkan”. *Skripsi Tidak*

- Diterbitkan. Malang : Jurusan Sipil FT Unibraw, 1995.
- Hendarsih, L. Shirley, Ir. 1994. *Geoteknik dan Mekanika Tanah (Penyelesaian lapangan dan Laboratorium)*. Penerbit : NOVA.
- Hardiyatmo, Hary Christadi.1994. *Mekanika Tanah 2. Edisi kedua*, Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Holtz, Robert D. & Kovacs, William D.1981. “*An Introduction to Geotechnical Engineering*” Prentice_Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Louis, Jane. “Introduction To Soil Modulus”. A & M University, Texas.(briaud@tamu.edu)
- [Mirata](#) T. 2002. *Applications of the Cylindrical Wedge Shear Test to the Study of Shear Strength of Undisturbed and Compacted Soils*. Ankara, Turkey : mirata@narwhal.cc.metu.edu.tr
- Najoan TH. F. 1993. ”Sifat-sifat teknis bahan timbunan tanah di Indonesia”. *Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI)*.
- Raharjo, Paulus P. 1993. “Konsep dasar perilaku dan kuat geser tanah”. *Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI)*.
- Shan, Hsin-Yu. *Shear strength of soil*. Departement of Civil Engineering National Chiao Tung University.
- Soedarmo, G. Djatmiko, Ir., dan Purnomo, S. J. Edy, Ir. 1997. *Mekanika Tanah 2*. Jakarta : Kanisius.
- Terzaghi, Karl & Peck B., Rallph. 1987. *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa. Edisi kedua, terjemahan Agus Witjaksono dan Beny Krisna R.*. Jakarta : Erlangga.
- Wibawa, Budi, Ir. 1996. “Modulus deformasi dari tanah kohesif yang dipadatkan”. Edisi VII.. *Media Komunikasi Teknik sipil*.