

TEGANGAN PORI NEGATIF SEBAGAI PARAMETER STABILITAS LERENG TANAH TAK JENUH (SOIL MECHANICS ON UNSATURATED SOIL)

I Nengah Sinarta¹⁾

1) Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Warmadewa

ABSTRAK

Tegangan air pori negatif atau suction. Suction maksimum terjadi dekat permukaan tanah pada akhir musim kering sehingga kapasitas infiltrasi maksimum terjadi didekat permukaan tanah selama kering, sebaliknya suction minimum terjadi pada akhir musim penghujan sehingga keruntuhan lereng sering terjadi pada saat itu karena kapasitas infiltrasinya juga mencapai minimum.

Matric suction dalam tanah tak jenuh memainkan peran penting dalam mengendalikan kekuatan geser tanah dan sifat hidrolis tanah seperti soil-water characteristic curve (SWCC) dan fungsi permeabilitas tak jenuh. Oleh karena itu, suction tanah memberikan kontribusi signifikan terhadap perubahan volume, dan stabilitas lereng tanah. Tekanan normal ($\sigma - u_a$), dan matric suction ($u_a - u_w$), dimana σ adalah total tegangan normal, u_a adalah tekanan udara, dan u_w tekanan air pori adalah merupakan dua parameter independen pada variabel stress state untuk tanah tak jenuh, perilaku ini adalah kontrol mekanika tanah dalam kuat geser tanah dan volume change untuk tanah tidak jenuh.

Pengujian matric suction berdasarkan ASTM D 5298, disarankan untuk mencapai periode keseimbangan di peram 3 sampai 5 hari. Jika kedua matric dan total suction dilakukan pada sampel yang sama dalam botol kaca, maka waktu penyeimbangan akhir, setidaknya 7 hari dari total periode hisap penyeimbangan.

Kata kunci: tegangan pori, stabilitas lereng, tanah tak jenuh

1 PENDAHULUAN

Konferensi ISSMFE pertama (International Society for Mekanika Tanah dan Teknik Fondasi pada tahun 1936 menyediakan forum untuk pembentukan prinsip dan persamaan yang relevan dengan mekanika tanah jenuh. Prinsip-prinsip ini dan persamaan ini menjadi sangat penting sepanjang dekade berikutnya baik dalam pendidikan dan penelitian. Konferensi yang sama ini juga, banyak makalah penelitian tentang perilaku tanah tak jenuh. Sayangnya, pernyataan prinsip dan persamaan tidak segera muncul untuk tanah tak jenuh, selanjutnya tahun-tahun berikutnya, ilmu pengetahuan dan teknologi untuk tanah tak jenuh lambat berkembang (Fredlund, 1979). Penelitian di Imperial College di tahun 1950-an melakukan usaha untuk memahami konsep perilaku tanah tak jenuh dilakukan oleh Bishop, 1959. Penelitian Lytton (1967) di Amerika Serikat berbuat banyak untuk memastikan bahwa pemahaman tentang perilaku tanah tak jenuh didasarkan teoritis lisan, bahwa semua teori konsistensi dengan prinsip-prinsipnya dikemukakan dalam mekanika kontinum. Sebagian besar penelitian awal pada tanah tak jenuh terkait dengan aliran air di zona tekanan air pori negatif (yaitu, aliran kapiler).

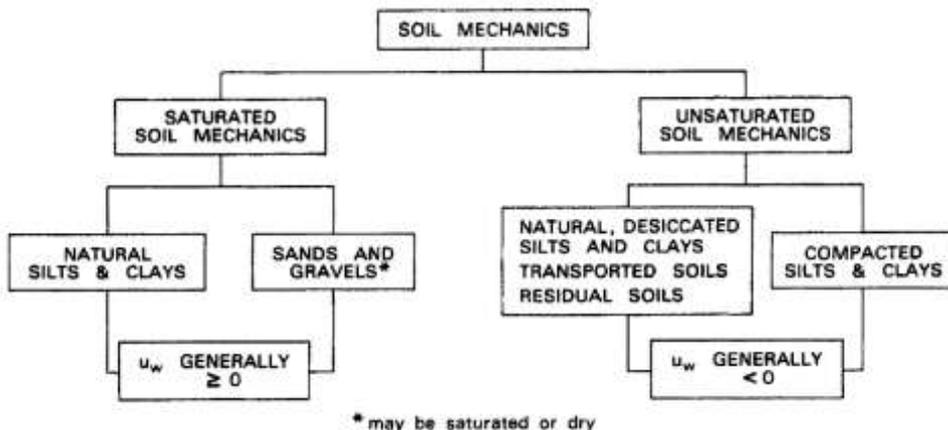
Analisis stabilitas lereng sering melibatkan tanah tak jenuh yang memiliki tekanan air pori negatif. Zona tanah tak jenuh secara langsung dipengaruhi oleh perubahan iklim mikro atau lokal. Curah hujan dan penguapan menyebabkan perubahan dalam tekanan air pori yang berpengaruh terhadap kekuatan geser tanah. Pada umumnya tanah berada pada kondisi setengah jenuh (*partially saturation*), pada kondisi ini tegangan air pori dapat bernilai negatif yang menimbulkan terjadinya gaya serap (*soil suction* atau *matric suction*) dan berpengaruh terhadap kuat geser tanah (*shear strength*). Kondisi *partially saturation*, ruang pori

sebagian terisi air yang merupakan *matric suction* ($u_a - u_w$) dan dapat membentuk maniskus air, yang timbul karena fenomena tegangan permukaan (*surface tension*). (Rahardjo, 2009).

2 PERBEDAAN SOIL MECHANICS ON SATURATED SOIL DENGAN SOIL MECHANICS ON UNSATURATED SOIL

Pada kenyataannya praktek di lapangan terjadi konsep-konsep mekanika tanah klasik, *saturated soil mechanics* tidak dapat diterapkan, akibat sifat-sifat tanah yang sangat kompleks, terkait dengan konsistensi tanahnya. Kondisi lapangan terjadi lebih dari dua fase yang menghasilkan bahan yang sulit untuk ditangani, salah satunya adalah tanah tak jenuh (*unsaturated soil*) merupakan kategori bahan yang tidak mematuhi dalam perilaku mekanika tanah klasik, sehingga konsep mekanika tanah jenuh *Soil Mechanics on Unsaturated Soil* perlu di terapkan. Mekanika tanah pada tanah jenuh dengan mekanika tanah jenuh terdapat perbedaan yang mendasar, Mekanika tanah tak jenuh memiliki 2 fase yaitu pada tekanan air pori nya, pada mulanya adalah negatif, di tanah permukaan, dan akan menjadi positif dalam jangka waktu tertentu jika rongga butiran telah di penuhi air, perbedaan akan hal tersebut dapat di lihat pada Gambar 1.

Ringkasan dari penggunaan mekanika tanah klasik (*saturated soil*) yang di cetuskan oleh Terzaghi, 1928 sebagai awal mula berkembangannya ilmu mekanika tanah dalam analisis geoteknik dengan prinsip mekanika tanah modern (*unsaturated soil*) dalam persamaan yang di berikan oleh Fredlund dan Rahardjo, (1993). Seperti tertera pada Tabel 1, diperlihatkan perbedaan persamaan yang yang digunakan dalam analisa kuat geser tanah, khususnya *safety factor* terhadap stabilitas tanah.



Gambar 1. Kategori Saturated dan Unsaturated Soil

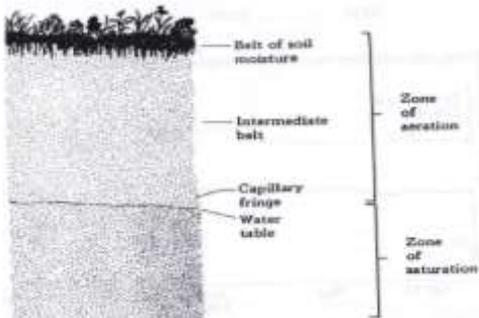
Tabel 1. Perbedaan Mekanika tanah klasik (Saturated Soil) dengan Unsaturated Soil

Principle or Equations	Saturated Soil	Unsaturated Soil
Stress state variables	$(\sigma - u_w)$ (1)	$(\sigma - u_w)$ and $(u_s - u_w)$ (2)
Shear strength	$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$ (3)	$\tau = c' + (u_s - u_w) \tan \phi^s + (\sigma - u_w) \tan \phi'$ (4) $c = c' + (u_s - u_w) \tan \phi^s$
Flow law for water (Darcy's law)	$v_w = -k_s (\partial h_w / \partial b_s)$ (5) $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$	$v_w = -k_s (u_s - u_w) (\partial h_w / \partial b_s)$ (6) $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$
Unsteady state seepage	$k_s \left(\frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} \right) + k_s \left(\frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} \right) = m_v \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t}$ (7)	$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_v^* \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t}$ (8)
Slope stability based on Bishop's Simplified method (Moment equilibrium)	$F_s = \frac{\sum [c' \beta R + (N - u_w \beta) R \tan \phi']}{Aa + \sum Wx - \sum Ny}$ (9)	$F_s = \frac{\sum \left[c' \beta R + \left(N - u_w \beta \frac{\tan \phi^s}{\tan \phi'} - u_w \beta \left(1 - \frac{\tan \phi^s}{\tan \phi'} \right) \right) R \tan \phi' \right]}{Aa + \sum Wx - \sum Ny}$ (10)
Soil-water characteristic curve		$\theta_w = C(\psi) \left[\frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^*$, Fredlund & Xing (1994) (11) <small>$C(\psi) = 1$ as suggested by Leong and Rahardjo (1997a)</small>

3 KONSEP TANAH JENUH SEBAGIAN (UNSATURATED SOIL)

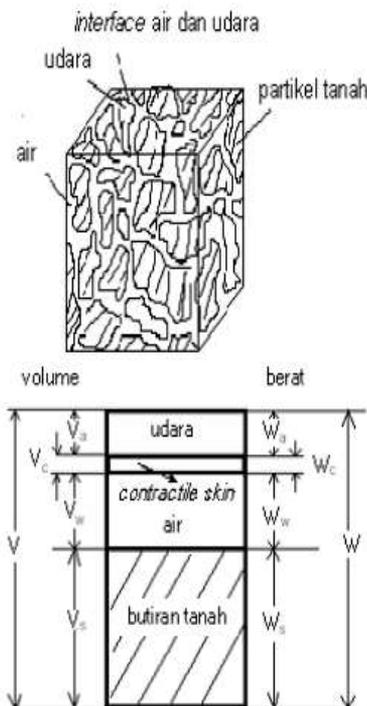
Hujan yang membasahi permukaan tanah mengalami infiltrasi ke bawah permukaan, yang dibedakan menjadi zona jenuh sebagian dan zona jenuh. Zona jenuh sebagian umumnya berada di atas muka air tanah dengan pori sebagian diisi dengan air. Zona ini disebut juga dengan zona aerasi dan ia

yang menyebar dari permukaan tanah turun melalui zona akar utama. Ketebalannya bervariasi tergantung pada jenis tanah dan vegetasi. Dalam zona ini, ruang antara partikel-partikel sebagian terisi oleh air dan sebagian lagi terisi oleh udara seperti Gambar 2 (Leet et al., 1978 dalam Abraham, et al 1995).



Gambar 2. Zona air bawah tanah

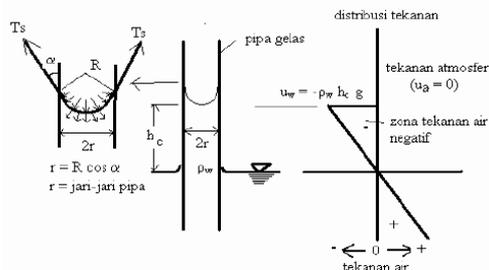
Tanah jenuh sebagian atau *Unsaturated soil* berada di atas muka air tanah (m.a.t). Tanah tersebut mempunyai beberapa fase yaitu fase udara, air dan butiran / tanah, dan akan ada interface antara air dan udara yang dikenal dengan *contractile skin*. Skema elemen tanah jenuh sebagian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Elemen tanah jenuh sebagian (Fredlund dan Rahardjo, 1993)

Contractile skin merupakan proses dari tegangan permukaan air pada tanah (*surface tension*) yang diumpamakan seperti membran elastis (Kaye dan Laby dalam Fredlund dan Rahardjo, 1993). *Contractile skin* dimanifestasikan sebagai tekanan udara, adanya perbedaan tekanan antara udara dengan air adalah nilai ($u_a - u_w$).

Komponen *matric suction* yang merupakan tegangan permukaan air dianalisis dengan tekanan kapiler u_c . Nilai u_c tergantung tegangan permukaan T_s dan jari-jari kurva R . Analisis tegangan permukaan air dan jari-jari kurva digambarkan dengan sebuah gelas pipa yang diisi air (Gambar 4). Jarak jejari R tergantung pada dimensi kapiler pipa dan sudut kontak.



Gambar 4. Fenomena tegangan permukaan air pada pipa kapiler (Fredlund dan Rahardjo, 1993)

Perbedaan pengertian pada mekanika tanah unsaturated berada pada pengertian tentang suction atau tekanan air pori negatif menganut sistem kapilaritas seperti tertera pada Gambar 5.

Pada kondisi seimbang, komponen vertikal dari gaya tarik sama besarnya dengan berat air yang naik, sehingga persamaan menjadi:

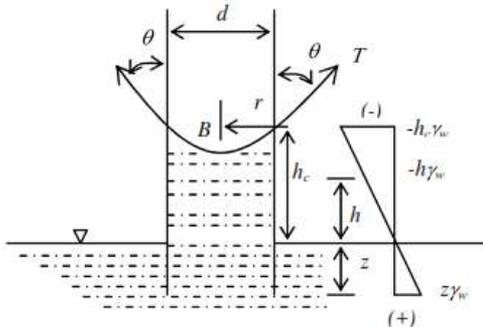
$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot T_s \cdot \cos\theta = \pi r^2 \cdot h_c \cdot \gamma_w$$

Maka ketinggian air h_c adalah:

$$h_c = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos\theta}{r \cdot \gamma_w}$$

Dimana :

- T_s = tegangan permukaan (surface tension)
- θ = sudut kontak antara dinding tabung kapiler dengan T_s
- γ_w = berat volume air



Gambar 5. Konsep tekanan air pori negative

Persamaan di atas terlihat bahwa harga tekanan air pori (*pore-water pressure*) untuk titik B yang terletak di atas muka air negatif yang berarti bahwa tegangan tersebut bersifat tegangan tarik. Tegangan air pori inilah yang

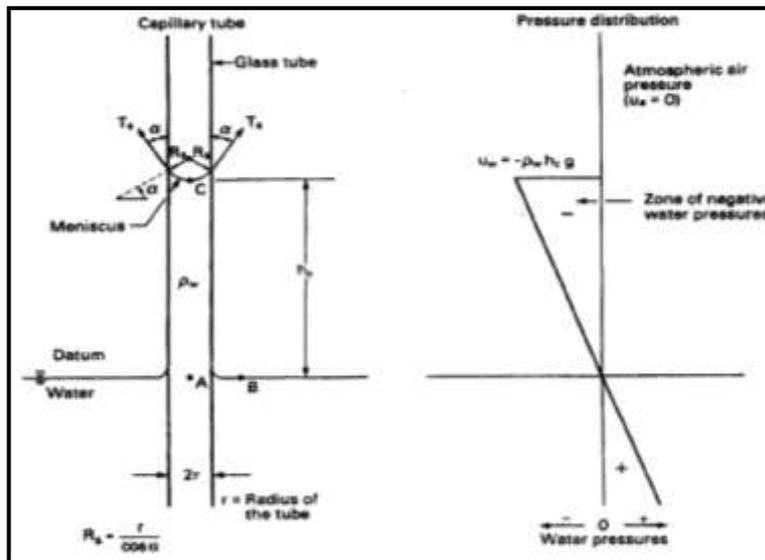
disebut tegangan air pori negatif atau *suction*. Suction maksimum terjadi dekat permukaan tanah pada akhir musim kering sehingga kapasitas infiltrasi maksimum terjadi didekat permukaan tanah selama kering, sebaliknya suction minimum terjadi pada akhir musim penghujan sehingga keruntuhan lereng sering terjadi pada saat itu karena kapasitas infiltrasinya juga mencapai minimum.

4 PARAMETER TANAH JENUH SEBAGIAN

4.1 Tekanan Air Pori Negatif (*Suction*)

Suction merupakan selisih antara tekanan udara pori (u_a) dengan tekanan air pori (u_w). *Suction* dapat dianalisis dengan tekanan kapiler (u_c). Nilai tekanan kapiler tergantung pada tegangan permukaan (τ_s) dan jari-jari kubah R. Analisis tegangan permukaan dan jari-jari kurva dapat digambarkan dengan sebuah gelas pipa yang diisi air.

Jarak jari R tergantung pada dimensi kapiler pipa dan sudut kontak, seperti Gambar 6. (Fredlund dan Rahardjo, 1993).



Gambar 6. Model Fisik dan Fenomena tegangan permukaan pada pipa kapiler

Hubungan antara tegangan permukaan dan tegangan kapiler dapat dirumuskan dengan persamaan Laplace sebagai berikut:

$$u_c = (u_a - u_w) = \frac{2\tau_s \cos \alpha}{r} = h_c \gamma_w$$

dengan:

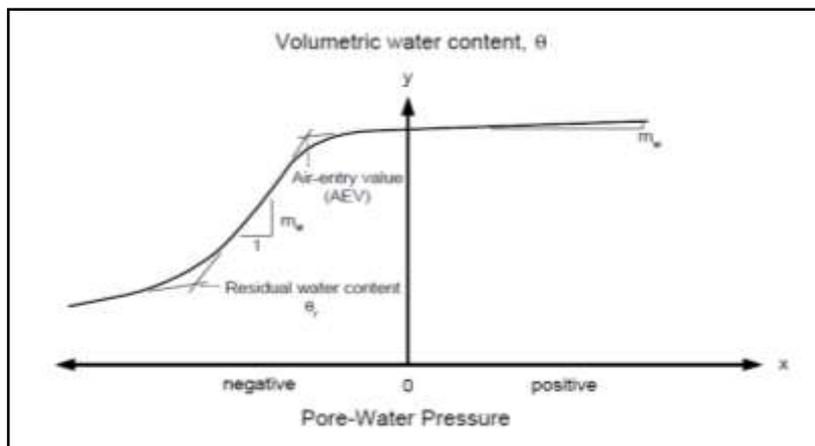
- u_a : tekanan udara pori (kN/m^2),
- u_w : tekanan air pori (kN/m^2),
- τ_s : tegangan permukaan air (kN/m^2),
- r : jejari kapiler pipa (m),
- α : sudut kontak ($^\circ$),
- h_c : tinggi kapiler (m).

Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa *suction* berbanding terbalik dengan jari-jari kapiler, semakin besar jari-jari kapiler, maka nilai *suction* akan semakin kecil. Jadi *suction* untuk tanah lempung akan lebih besar dibandingkan dengan tanah granuler (Fredlund dan Raharjo, 1993).

Pengujian *matric suction* dengan metode *filter paper* berdasarkan ASTM D 5298 – 03. Pada dasarnya metode *filter paper* berdasarkan asumsi bahwa sebuah *filter paper* akan mendatangkan keseimbangan dengan tanah yang mempunyai *suction* tertentu.

4.2 Volumetric Water Content

Volumetric water content function menggambarkan sisa volume rongga yang terisi air sebagai aliran air tanah. Nilai *Volumetric water content* tergantung pada tiga hal yaitu *air entry value (AEV)*, kemiringan grafik tekanan air pori (m_w) dan *residual water content* (θ_r) atau derajat kejenuhan (S), seperti Gambar 7.



Gambar 7. Volumetric water content functions

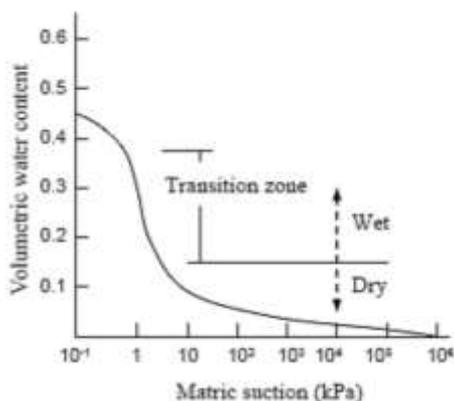
Dari kurva hubungan ketiga hal yang telah dijelaskan di atas, faktor yang paling mempengaruhi *volumetric water content* adalah ukuran butir tanah dan distribusi ukuran butirnya. *Suction* rendah terjadi pada tanah jenuh, belum ada air yang keluar dari pori-pori. Seiring dengan peningkatan *suction*, pada suatu nilai *suction* tertentu, air mulai keluar dari pori-pori tanah. Kondisi ini

didefinisikan sebagai *air-entry suction*. Bila *suction* ditingkatkan, maka volume air juga akan berkurang hingga mencapai nilai residual.

AEV merupakan fungsi dari ukuran maksimum pori tanah dan juga dipengaruhi oleh distribusi ukuran butir dalam tanah. Tanah dengan ukuran pori besar biasanya memiliki nilai AEV yang relatif rendah.

4.3 Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

Soil water characteristic curve (SWCC) merupakan hubungan antara potensial air tanah dan *gravimetric water content*, *volumetric water content* or *degree of saturation*. SWCC merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk pemodelan aliran air tanah (Xiaoli Fu et al, 2011), gambar 8. Menunjukkan kurva SWCC untuk tanah pasir.

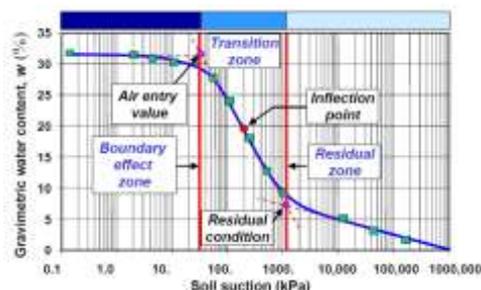


Gambar 8. Soil-water characteristic curve for sandy soil.

Soil Water Characteristic Curve (SWCC) merupakan kurva yang menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan *suction* tanah, (L'Heureux, 2005). Jumlah air tersebut diartikan sebagai *Volumetric water content* (θ_w), kadar air *gravimetric* (w), atau derajat kejenuhan (S). SWCC juga sering diartikan sebagai *retention curve* atau *volumetric water content curve* yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air.

SWCC memberikan gambaran tentang distribusi ukuran butir tanah dan informasi penting mengenai hidrolis sama seperti karakteristik mekanik dan perilaku tanah jenuh sebagian, seperti gambar 9. (Leroueil dan Hight, 2003). Banyak sifat tanah yang

bisa diperoleh dari SWCC, seperti kuat geser tanah, koefisien permeabilitas dan derajat kejenuhan (Siller et al, 2001).



Gambar 9. Soil Water Characteristic Curve (SWCC) dalam Distribusi Ukuran Butiran.

4.4 Hydraulic Conductivity Function

Berdasarkan kurva SWCC yang berhubungan dengan nilai permeabilitas tanah terdapat properties unsaturated soil yaitu *Hydraulic conductivity*. *Hydraulic conductivity* yang merupakan kemampuan tanah untuk melewati air, baik pada kondisi jenuh ataupun jenuh sebagian. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan angka pori dan derajat kejenuhan. Besarnya *hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian tidaklah konstan, hal ini tergantung pada nilai *VWC*, dengan demikian dapat dikatakan bahwa *hydraulic conductivity* tanah jenuh sebagian tergantung pada nilai *suction* tanah. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian dapat ditentukan dengan mem-plotkan fungsi dari *matric suction* pada SWCC yang merupakan kurva hubungan antara derajat kejenuhan atau *volumetric water content* dan *matric suction*, dengan menggunakan koefisien permeabilitas pada tanah jenuh (k_{sat}).

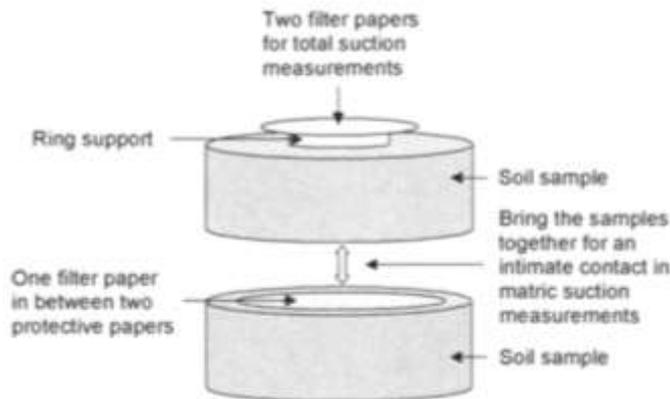
5 HUBUNGAN SWCC DAN KEKUATAN GESER

Kekuatan geser dari tanah meningkat dengan meningkatnya *matric suction* atau

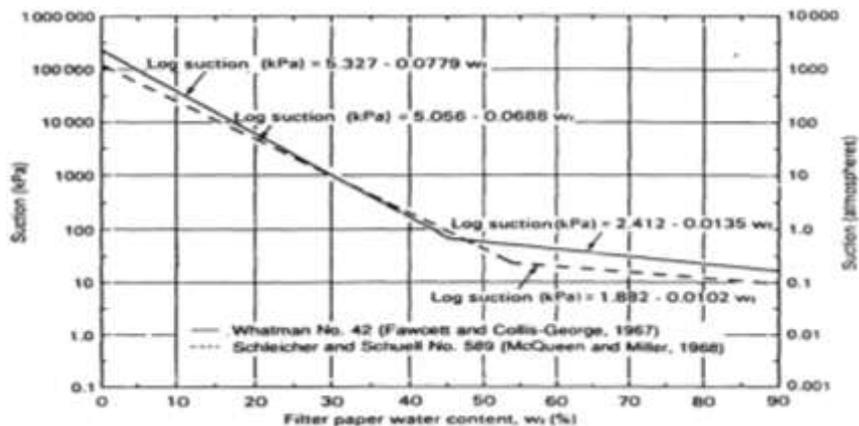
Houston et al. 1994, Lee 1991). Namun, jika kedua matric dan total suction dilakukan pada sampel yang sama dalam botol kaca, maka waktu penyeimbangan akhir, setidaknya 7 hari dari total periode hisap penyeimbangan. Prosedur untuk pengukuran kadar air dengan filter paper pada akhir quilibrium adalah persis sama dengan yang diuraikan untuk total pengukuran kadar air hisap. Setelah mendapatkan semua kadar air pada filter paper dilakukan kalibrasi dengan kurva kalibrasi yang tepat untuk mendapatkan nilai hisap matric dari sampel tanah, seperti terlihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.

Pengujian matrik suction terhadap lempung Ngawi, dilakukan pada laboratorium mekanika tanah, Universitas Gadjah Mada, seperti tertera pada Tabel 2.

Berdasarkan data tersebut dilakukan pengolahan data dengan Software SoilVision. SoilVision adalah Knowledge-Based System yang merupakan kumpulan informasi 6000 database tanah yang diperoleh dari para ahli di lapangan dan publikasi jurnal terkini. Hasil olah data seperti pada Gambar 13 sampai sampai Gambar 15.



Gambar 11. Pemasangan Filter Paper pada Sample

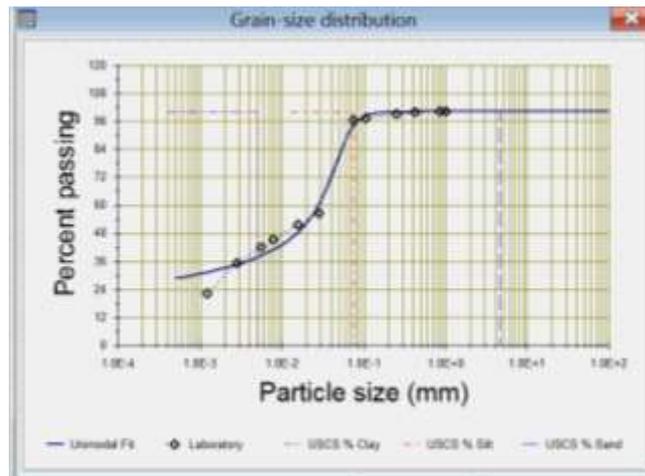


Gambar 12. Kalibrasi filter paper Whatman

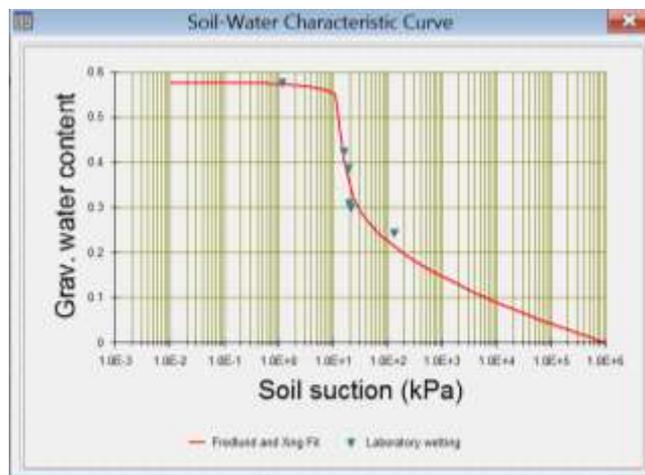
Tabel 2. Hasil Pengujian matrik suction Lempung Ngawi.

TABEL HASIL PENGUJIAN MATRIC SUCTION DENGAN FILTER PAPER																			
		1	2	3	4	5	6			Keterangan									
Berat Cawan (gram) dingin	Tc	16.3254	16.419	16.8442	16.571	16.0197	16.4514	16.9174	16.6883	16.5053	16.2723	16.8581	16.553						
Berat filter paper basah+ berat cawan dingin	M1	17.6868	17.0212	17.2246	17.0321	16.3462	16.7803	17.7304	17.0421	16.709	16.6024	17.251	16.9753						
Berat filter paper kering +berat cawan panas	M2	16.7889	16.0212	17.061	16.8065	16.2381	16.67	16.6199	16.9079	16.6162	16.5041	17.0934	16.7725						
Berat cawan panas	Th	16.2941	16.656	16.825	16.5519	16.0069	16.4296	16.6672	16.6672	16.383	16.256	16.8428	16.5352						
Berat filter paper kering (m2-th)	Mf	0.4948	16.4003	0.236	0.2546	0.2312	0.2404	1.1105	0.1342	0.0928	0.0983	0.1576	0.2028						
Berat air dalam filter paper (M1-M2-Tc+Th)	Mw	0.8666	1.2370	0.1444	0.2065	0.0953	0.0885	0.8603	0.1131	-0.0295	0.082	0.1423	0.185						
Kadar air filter paper (Mw/Mf)	Wf	1.7514147	0.0754254	0.6118644	0.8110762	0.4121972	0.3681364	0.7746961	0.842772	-0.3178879	0.8341811	0.9029188	0.9122288						
Suction, pF atau log kPa (hasil bacaan)	h	0.0475901	4.7394357	1.5859831	1.3170471	2.1159836	2.4592171	1.3661603	1.2742578	7.803347	1.2858555	1.1930596	1.1804911	Grafik filter Paper Whitman					
Suction kpa (dirubah dim suction)		1.1158097	54882.735	38.546331	20.751387	130.61215	287.88374	23.235942	18.804328	63583874	19.313258	15.597667	15.152738	mllog kPa menjadi kPa					
Kadar air		57.57	57.57	42.3	42.3	31	31	30	30	24.5	24.5	38.75	38.75	Dipilih yang masuk akal					

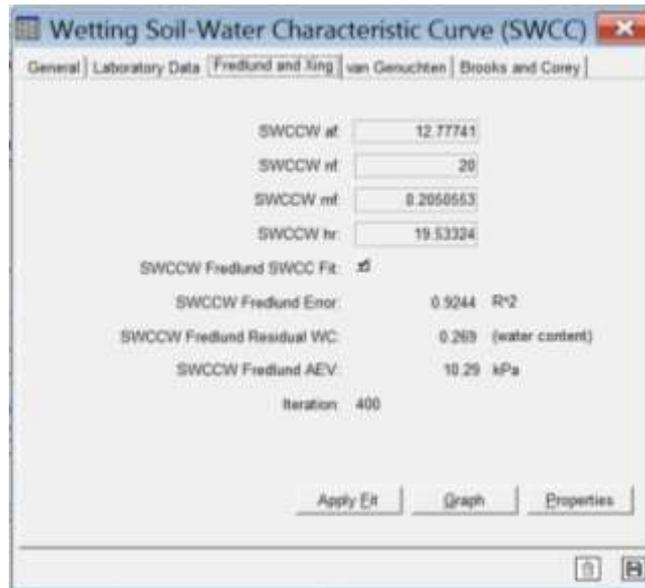
(Sumber: Pengujian Laboratorium Mekanika Tanah, UGM)



Gambar 13. Distribusi Ukuran Butiran



Gambar 14. Kurva SWCC



Gambar 15. Tabel Output SWCC

Berdasarkan hasil tersebut dapat dilakukan interpretasi perilaku tanah tanah tak jenuh terhadap kemampuannya menghisap air. Tegangan tanah akan berubah begitu drastis pada tegangan negatif menuju positif sangat berpengaruh terhadap kuat geser tanah. Pada saat tekanan air pori negatif tegangan geser tanah akan meningkat, sebaliknya suction minimum terjadi pada akhir musim penghujan sehingga keruntuhan lereng sering terjadi pada saat itu karena kapasitas infiltrasinya juga mencapai minimum.

7 KESIMPULAN

Studi mekanika tanah terbagi menjadi dua kondisi, yaitu tanah jenuh (*saturated soil*) sebagai mekanika tanah klasik dan tanah tidak jenuh (*unsaturated soil*). Perbedaan antara tanah jenuh dan tidak jenuh penting untuk diketahui mengingat karakteristik dan perilaku tanah yang berbeda. Tanah jenuh air memiliki tegangan air pori positif, sedangkan tanah tidak jenuh memiliki tegangan air pori negatif. Hal ini

terjadi bila muka air tanah berada di bawah muka tanah, sehingga tanah yang berada di atas muka air tanah memiliki tegangan air pori negatif. Tanah tidak jenuh memiliki lebih dari dua fase yaitu solid, air dan udara.

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi tanah kering memiliki parameter kuat geser (c dan ϕ) lebih besar daripada kondisi tanah basah, dimana pada kondisi basah berat isi bertambah, daya apung pada kondisi jenuh menurunkan tegangan efektif antar butiran sehingga lempung lebih cepat menjadi lemah dan kekuatan geser tanah menurun. Semakin besar nilai c dan ϕ , maka nilai kuat geser tanah semakin meningkat dan kecil kemungkinan terjadinya penurunan tanah. Perubahan-perubahan sifat fisik seperti: porositas, angka pori, kepadatan kering, berat volume akan mempengaruhi suction (tegangan air pori negatif) dan konduktivitas hidrolik

Metode pengukuran kemampuan tanah menghisap air menuju sifat jenuh tanah menggunakan kertas filter atau sering disebut

Metode *Filter Paper*, metode ini mampu mengukur matric suction dari beberapa kilopascal sampai ratusan ribu kilopascal. Prinsip dasar dari metode kertas filter adalah pada suatu hipotesis bahwa pada suatu titik keseimbangan tegangan air pori negatif atau suction di dalam suatu contoh tanah dan di dalam suatu kertas filter yang berada dalam kondisi kontak dengan contoh tanah tersebut adalah sama. Nilai suction dihitung dengan cara menarik garis arah vertikal dari sumbu horizontal (kadar air kertas Whatman No. 42) pada grafik kalibrasi kertas filter hingga berpotongan dengan garis kurva kalibrasi kertas filter, kemudian ditarik garis horizontal hingga perpotongan dengan sumbu vertikal (pF). Posisi dimana sumbu vertikal dipotong adalah nilai suction dari tanah yang distabilisasi dengan satuan nilai pF.

Countries November, 2-3, 2009, Bandung, West Java, Indonesia ISBN 978-979-98278-2-1

Rahardjo, H., Lim, T.T., Chang, M.F., & Fredlund, D.G. (1995). *Shear Strength Characteristics of a Residual Soil in Singapore*. Canadian Geotechnical Journal 32, 6077.

8 DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D5298 – 10, *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*.
- Fredlund, Rahardjo, 1993, *Soil Mechanics For Unsaturated Soil*, A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC. New York Chichester Brisbane Toronto Singapore.
- Ni Lu, William.J.Kos, 2004, *Unsaturated Soil Mechanics*, Copyright 2004 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.
- Rahardjo, Santoso, and Eng-Choon, *Unsaturated Soil Mechanics for Solving Geotechnical Problems, International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing*