

PENENTUAN NILAI KONDUKTIVITAS HIDROLIK TANAH TIDAK JENUH MENGGUNAKAN UJI RESISTIVITAS DI LABORATORIUM

Runi Asmaranto^{1,2}, Ria Asih Aryani Soemitro², Nadjadji Anwar²

1Jurusan Teknik pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (runi_asmaranto@ub.ac.id)

2Jurusan Teknik Sipil, FTSP Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (INDONESIA)

Abstrak: Resistivitas listrik dapat digunakan untuk mengidentifikasi parameter geoteknik seperti kadar air, batas cair, batas plastis dan berat volume tanah. Telah diketahui bahwa nilai konduktivitas hidrolik dapat diprediksi berdasarkan nilai sifat fisik tanah, maka seharusnya nilai konduktivitas hidrolik tanah juga dapat ditentukan melalui pengujian resistivitas. Beberapa peneliti menjelaskan bahwa konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh berkorelasi dengan kurva karakteristik air-tanah (*soil-water characteristic curve*, SWCC), sehingga perkiraan nilai konduktivitas hidrolik menggunakan uji resistivitas sangat penting untuk dikembangkan dengan mengamati perilaku tanah.

Penelitian ini mengkaji perubahan konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh berdasarkan pengujian resistivitas laboratorium. Hasil pengujian dibandingkan dengan metode empiris Gardner (1958) dan Campbel (1973). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh berkorelasi cukup baik dengan kedua metode empiris yang digunakan.

Kata Kunci: *soil-water characteristic curve*, SWCC, konduktivitas hidrolik, tanah tidak jenuh, suction

Abstract: Electrical resistivity can be used to identify geotechnical parameters such as water content, liquid limit, plastic limit and unit weight. It is known that the hydraulic conductivity values can be predicted based on soil properties, so that should be determined through resistivity laboratory test. Some researchers explained that unsaturated soil hydraulic conductivity correlated with soil-water characteristic curve (SWCC), thus the estimated values of hydraulic conductivity using a resistivity test is very important to be developed by observing the behavior of the soil.

This study examines changes in hydraulic conductivity of unsaturated soil based on laboratory resistivity test. The results are compared with Gardner (1958) and Campbel (1973) empirical methods. The results show that the unsaturated soil hydraulic conductivity correlates well with the empirical methods used.

Keywords: *soil-water characteristic curve*, hydraulic conductivity, unsaturated soil, suction

Konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh (K), diketahui sangat dipengaruhi oleh perubahan kadar air (w_c) atau tegangan air pori negatif (*suction*, $-U_w$) dimana nilai K ini sangat penting untuk memperkirakan volume air didalam zone tidak jenuh (Revil and Cathles, 1999). Pada pengukuran lapangan, variasi nilai konduktivitas hidrolik arah horisontal dan vertikal cukup besar (Reynolds and Elrick, 1985; Mohanty et al., 1994) sehingga membutuhkan data pengamatan yang banyak untuk mendapatkan perkiraan hasil yang cukup memuaskan (Warrick et al., 1977).

Sebuah model matematika telah dikembangkan untuk memodelkan konduktivitas hidrolik tidak jenuh sebagai fungsi dari beberapa parameter yang dikenal sebagai *soil-water characteristic curve* (Lu and Likos, 2004). Resistivitas mungkin merupakan sifat fisik dasar suatu tanah sehingga bisa digunakan

untuk penyelidikan tanah, namun sulit untuk mengkorelasikan secara langsung terhadap kadar air, batas cair dan plastis serta berat volume (Giao et al., 2003). Resistivitas listrik tidak hanya bergantung pada material tanah tetapi juga konsentrasi ion pada air pori. Sehingga, hal ini akan menimbulkan kelebihan dan kekurangan jika dibandingkan dengan pengujian geoteknik secara konvensional.

Permeabilitas juga sering dikenal sebagai konduktivitas hidrolik jenuh. Istilah permeabilitas didefinisikan oleh beberapa ahli dalam kalimat yang berbeda tetapi mengandung arti yang sama. Kesulitan utama dari penggunaan parameter ini adalah rentang nilai resistivitas yang cukup besar untuk beberapa jenis tanah. Nilai resistivitas suatu tanah sangat dipengaruhi oleh kandungan air didalamnya. Tanah jenuh mempunyai nilai resistivitas lebih kecil jika di-

bandingkan dengan tanah tidak jenuh. Resistivitas atau hambatan jenis yang kecil berarti bahwa mudah menghantarkan listrik karena pengaruh keberadaan air (Kodoatie, 1996).

BAHAN DAN METODE

Perlakuan Benda Uji

Benda uji yang digunakan adalah Mojokerto *Silty Loam* (menurut Klasifikasi Tanah Metode USDA (*United States Department of Agricultural*) dan MH (*elastic silt*) menurut Kriteria USCS (*Unified Soil Classification System*). Benda uji diberikan perlakuan pembasahan dan pengeringan dengan cara menambahkan dan mengurangi sejumlah kadar air. (Asmaranto et al, 2010). Tabel 1 menunjukkan proses pembasahan dan pengeringan pada benda uji.

Tabel 1. Pengaturan penambahan dan pengurangan kadar air pada benda uji.

Proses Pembasahan Benda Uji	Proses Pengeringan Benda Uji
1. w_i (kadar air awal/ <i>initial</i>)	1. w_i (kadar air awal/ <i>initial</i>)
2. $w_i + 25\% (w_{saturation} - w_i)$,	2. $25\% (w_i - w_{minimum})$
3. $w_i + 50\% (w_{saturation} - w_i)$,	3. $50\% (w_i - w_{minimum})$,
4. $w_i + 75\% (w_{saturation} - w_i)$,	4. $75\% (w_i - w_{minimum})$,
5. $w_i + 100\%$ ($w_{saturation} - w_i$)	5. $100\% (w_i - w_{minimum})$

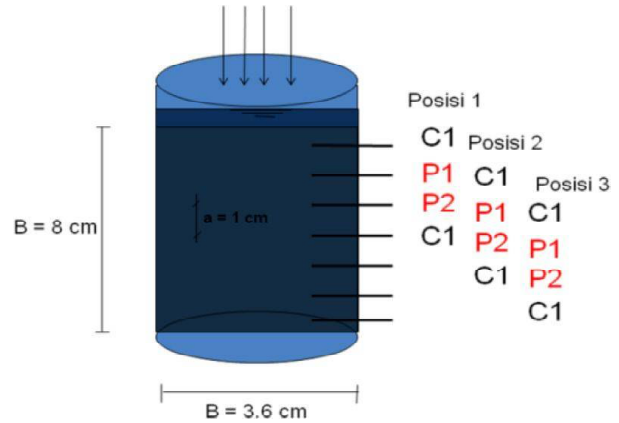
Pengujian Laboratorium

Tanah dengan perlakuan pembasahan dan pengeringan di atas selanjutnya masing-masing dilakukan pengujian sifat fisik yang meliputi nilai: kadar air (w) digunakan standar uji ASTM D2216-71, uji volumetri-gravimetri digunakan standar uji ASTM D854-72 meliputi: angka pori (e), derajat kejenuhan (S_r), kepadatan kering (*dry density*, g_d) dan berat volume tanah (*unit weight*, g). Sedangkan pengujian tegangan air pori negatif (*suction*, $-U_w$) dilakukan dengan menggunakan kertas filter type Whatman No.42.

Pengujian resistivitas di laboratorium dilakukan dengan menggunakan Alat Geolistrik merk “*Martiel Geophysics Resistivity Meter*” berdasarkan konfigurasi Wenner (Kodoatie, 1996).

Untuk mengetahui keakuratan hasil pengujian menggunakan uji kolom infiltrasi maka nilai konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan Metode Campbel (1973) dan Metode Gardner (1958) dimana

kedua metode ini ditentukan berdasarkan parameter tegangan air pori negatif dan nilai *volumetric water content*, q_w (Leong and Rahardjo, 1997; Lu dan Likos, 2004; Muntaha, 2005). Konfigurasi model resistivitas sebagaimana terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema pengukuran resistivitas di Laboratorium

Kajian Pustaka

Pada tanah jenuh, aliran air dalam tanah sesuai dengan hukum Darcy, dimana kecepatan aliran air yang melalui massa tanah sebanding dengan gradien hidrolik:

$$V_w = k_w \frac{h_w}{y} \tag{1}$$

dengan:

- V_w = Kecepatan aliran air
- K_w = Koefisien Permeabilitas
- h_w/y = Gradien hidrolik

Menurut Fredlund dan Rahardjo (1993), hukum Darcy juga diterapkan untuk aliran air dalam tanah tidak jenuh. Perbedaannya adalah pada koefisien permeabilitas. Pada tanah jenuh koefisien permeabilitas dianggap konstan sebab hanya tergantung pada angka pori. Anggapan ini tidak berlaku pada tanah tidak jenuh. Koefisien tanah tidak jenuh dipengaruhi oleh perubahan kadar air atau *matric suction*. Air tidak dapat mengalir melalui ruang pori yang terisi udara, namun air hanya dapat mengalir melalui ruang pori yang terisi oleh air. Pada waktu tanah dalam kondisi tidak jenuh, udara menempati ruang pori yang besar. Akibatnya air hanya dapat mengalir melalui pori yang lebih kecil. Seiring dengan meningkatnya tegangan air pori negatif, ruang pori lebih banyak terisi oleh udara, sehingga permeabilitas menjadi berkurang. Disamping angka pori, derajat kejenuhan (kadar air) adalah faktor penting lain yang mempengaruhi permeabilitas tanah tidak jenuh.

Menurut Fredlund dan Rahardjo (1993), kurva karakteristik tanah-air (kurva *drying* atau *wetting*) dapat digunakan untuk menghitung koefisien permeabilitas k_w (q_w) tanah tak jenuh. Campbell (1973) membuat suatu persamaan empiris untuk menghitung koefisien permeabilitas tanah tak jenuh (k_w) seperti berikut:

$$k_w = k_s \frac{q_w}{q_s} \quad (2)$$

dengan:

$$b = \frac{\log \dots}{\log \dots}$$

dimana:

- k_w = koefisien permeabilitas tanah tidak jenuh
- k_s = koefisien permeabilitas jenuh
- q_w = *volumetric water content*
- q_s = *volumetric water content* kondisi jenuh
- = *suction*

Menurut Gardner (1958) konduktivitas hidrolik tidak jenuh memenuhi persamaan sebagai berikut (Lu dan Likos, 2004):

$$k(\) = \frac{k_s}{1 + a^n} \quad (3)$$

dengan:

- $k(\)$ = konduktivitas hidrolik tidak jenuh (cm/detik)
- k_s = konduktivitas hidrolik tanah jenuh (cm/detik)
- a = konstanta tidak berdimensi, parameter yang berkaitan dengan *air-entry pressure*
- n = *curve-fitting parameters*, nilainya berkisar antara 2 – 4.
- = *soil suction* (kPa)

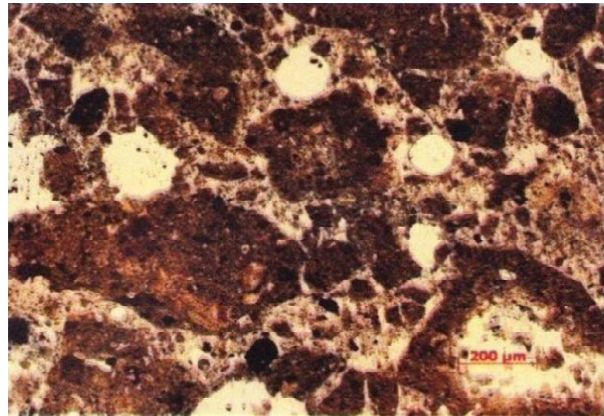
Analisis Data

Analisis Data dihubungkan untuk menentukan hubungan-hubungan antara perubahan sifat fisik seperti: kadar air (w_c), derajat kejenuhan (S_r), porositas (n), angka pori (e), kepadatan kering (ρ_d), *suction* ($-U_w$) dan konduktivitas hidrolik (k_w).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik tanah kondisi awal (*initial*) maka diketahui bahwa tanah didominasi oleh jenis lanau (51,74%), mengandung fraksi halus lempung (*clay*) sebesar 25,81% dan pasir (*sand*) 22,45%. Sedangkan pengujian batas-batas konsistensi diketahui bahwa tanah memiliki plastisitas cukup tinggi (PI = 23,32%), hal ini mendukung kriteria

tanah berdasarkan metode USCS digolongkan sebagai MH (lanau plastisitas sedang sampai tinggi). Gambar 2 menunjukkan hasil fotogrametri pada benda uji. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sifat fisik tanah kondisi awal.



Gambar 2. Hasil fotomikrografi tanah Mojokerto silty loam

Tabel 2. Hasil pengujian sifat fisik tanah terhadap benda uji awal.

Pengujian	hasil	satuan
Batas-batas konsistensi		
1. <i>Liquid limit</i> (LL)	54,09	%
2. <i>Plastic Limit</i> (PL)	30,77	%
3. <i>Plasticity Index</i> (PI)	23,32	%
Gravimetri dan Volumetri		
1. <i>Specific Gravity</i>	2,661	
2. <i>Water Content</i> , w	39,74	%
3. <i>Unit Weight of Soil</i> , γ_t	1,522	gr/cm ³
4. <i>Dry Density</i> , γ_d	1,089	gr/cm ³
5. <i>Void Ratio</i> , e	1,443	-
6. <i>Degree of Saturation</i> , Sr	73,30	%
Analisis ayakan dan hidrometer (USCS)		
1. <i>Gravel</i> (76,2 – 4,75mm)	0,00	%
2. <i>Sand</i> (4,75-0,075mm)	22,45	%
3. <i>Silt</i> (0,075-0,002mm)	51,74	%
4. <i>Clay</i> (< 0,002mm)	25,81	%

Sumber: hasil analisis, 2012

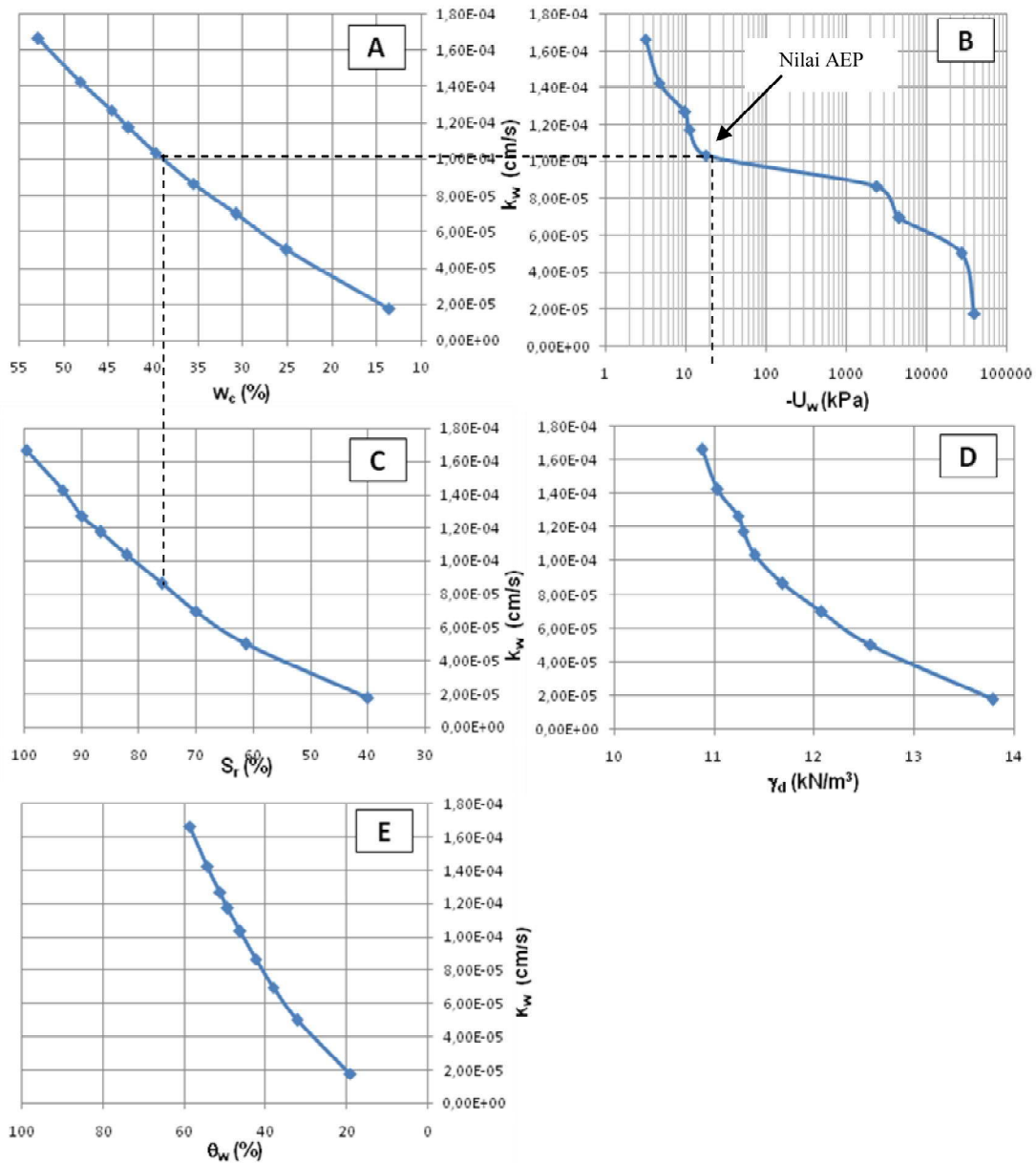
Gambar 3.a menunjukkan hubungan antara perubahan kadar air terhadap konduktivitas hidrolik. Terlihat bahwa semakin besar nilai kadar air maka konduktivitas hidrolik juga semakin besar. Pada kondisi jenuh ($S_r = 100\%$) akan meningkatkan nilai k_w menjadi 1.60×10^{-4} cm/detik (Gambar 3.c). Sedangkan pada kondisi $S_r = 40\%$ atau tanah mencapai kadar air (w_c) = 13% diperoleh nilai konduktivitas hidrolik sekitar 1.80×10^{-5} cm/detik. Pada kondisi jenuh ($S_r = 100\%$) nilai konduktivitas hidrolik mendekati nilai permeabi-

litas tanah jenuh yang ditentukan berdasarkan pengujian tinggi jatuh (*falling head*) dimana pada kondisi ini berlaku hukum Darcy. Hukum Darcy secara kuantitatif mengukur volume air pada tanah jenuh dan dinyatakan bahwa kecepatan air (v) sama dengan nilai konduktivitas hidrolik tanah jenuh (k) dikalikan dengan gradien hidrolik (i) atau dinyatakan sebagai: $v = k \cdot i$. Nilai AEP

Gambar 3.b menunjukkan hubungan antara nilai tegangan air pori negatif/*suction* ($-U_w$) terhadap nilai konduktivitas hidrolik. Fenomena ini mengindikasikan bahwa konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh dapat juga digambarkan sesuai dengan parameter *suction*. Lu and Likos (2004) juga menerangkan bahwa kon-

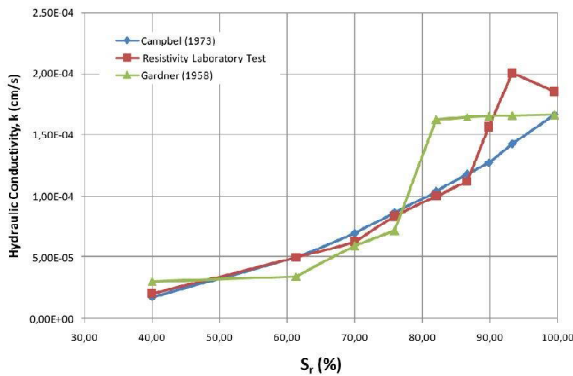
duktivitas hidrolik tanah adalah fungsi dari variabel-variabel seperti: struktur pori (angka pori dan porositas), sifat-sifat fluida pori (kepadatan dan ketebalan), dan sejumlah fluida pori didalam sistem tanah (kadar air dan derajat kejenuhan). Juga menurut Lu and Likos (2004) bahwa nilai konduktivitas hidrolik dapat juga digambarkan dari parameter *matric suction*. Perilaku hubungan antara kepadatan kering dengan konduktivitas hidrolik disajikan pada Gambar 3.d, sedangkan Gambar 3.e menunjukkan hubungan antara perubahan kadar air volumetrik dengan konduktivitas hidrolik.

Gambar 4 menunjukkan perbandingan hasil antara konduktivitas hidrolik metode empiris Gardner



Gambar 3. Hubungan antara perubahan kadar air (w_c) terhadap nilai *suction* ($-U_w$), derajat kejenuhan (S_r), kepadatan kering (γ_d), kadar air volumetrik (θ_w) dan konduktivitas hidrolik tidak jenuh (k_w) akibat proses pembasahan dan pengeringan pada tanah Mojokerto *silty loam*

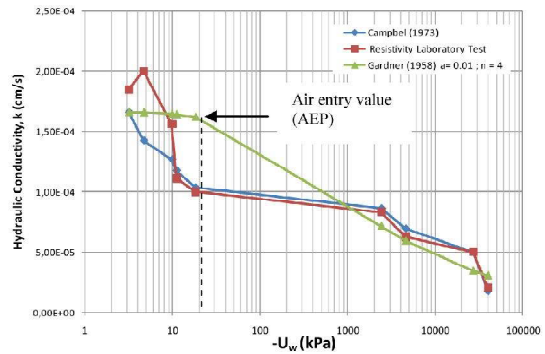
(1958) dan Campbell (1973). Terlihat bahwa ketiga metode yang digunakan memiliki perilaku yang hampir sama jika dihubungkan dengan perubahan derajat kejenuhan. Soemitro and Asmaranto (2001) juga menjelaskan bahwa pengurangan sejumlah air pada tanah kohesif akan menyebabkan tanah menjadi lebih padat akibat pengurangan angka pori. Perubahan-perubahan volume pori tentu menyebabkan perubahan parameter konduktivitas hidrolik tanah tidak jenuh.



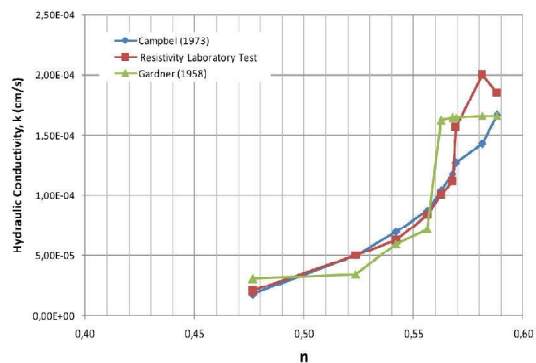
Gambar 4. Hubungan antara derajat kejenuhan dan konduktivitas hidrolik.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara suction dengan konduktivitas hidrolik pada tanah *silty loam*. Pada metode Gardner (1958) terlihat bahwa pada kondisi tanah mencapai nilai $-U_w \leq 20$ kPa atau sebelum mencapai titik *air entry value* (AEP) maka nilai konduktivitas hidrolik cenderung konstan. Pada kondisi ini diduga tanah masih berada pada kondisi jenuh air. Kondisi AEP adalah suatu kondisi dimana udara pori mulai masuk kedalam pori-pori tanah, dan diperkirakan pada kondisi ini tanah mulai masuk zone tidak jenuh. Pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara porositas tanah dengan nilai konduktivitas hidrolik. Secara umum terlihat jelas bahwa semakin besar porositas tanah maka konduktivitas hidrolik juga semakin besar. Hal ini terjadi pada semua metode empiris yang dibandingkan. Nilai porositas tanah berkisar antara 0,475–0,590.

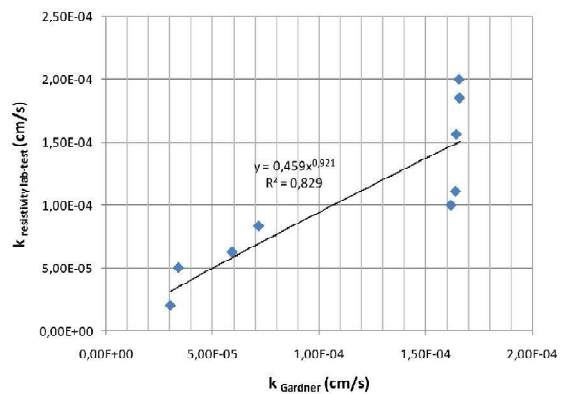
Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan grafik korelasi konduktivitas hidrolik antara metode resistivitas dengan metode empiris Campbell (1973) dan Gardner (1958). Tampak bahwa hasil pengujian konduktivitas hidrolik metode resistivitas mempunyai korelasi yang dekat dengan Metode Campbell (1973) dengan nilai determinasi $R^2 = 0,961$ sedangkan terhadap metode Gardner (1958) didapat koefisien determinasi $R^2 = 0,829$. Namun demikian kedua metode tersebut masih memiliki korelasi yang cukup erat dengan nilai $R^2 > 0,5$.



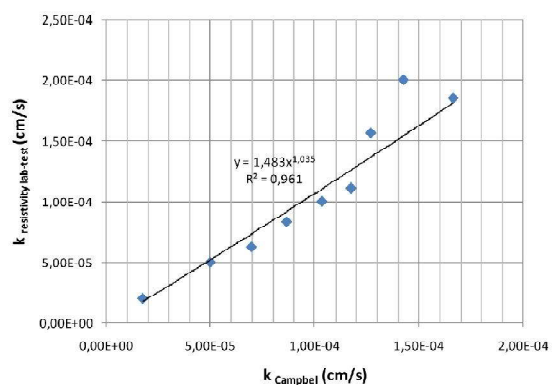
Gambar 5. Hubungan antara suction dan konduktivitas hidrolik



Gambar 6. Hubungan antara porositas dengan konduktivitas hidrolik



Gambar 7. Korelasi antara konduktivitas hidrolik metode resistivitas laboratorium dengan Metode Gardner (1958)



Gambar 8. Hubungan antara konduktivitas hidrolik yang ditentukan dengan uji resistivitas laboratorium dengan Metode Campbell (1973)

KESIMPULAN

Perubahan sifat fisik tanah akan terjadi jika terjadi perubahan kadar air didalam tanah akibat proses pembasahan dan pengeringan dimana proses ini sering terjadi pada daerah tropis. Perubahan-perubahan sifat fisik seperti: porositas, angka pori, kepadatan kering, berat volume akan mempengaruhi *suction* (tegangan air pori negatif) dan konduktivitas hidrolis. Pengujian resistivitas laboratorium dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengukur nilai konduktivitas hidrolis tanah tidak jenuh, dimana hasil pengujian dengan menggunakan metode ini berkorelasi dengan baik terhadap metode empiris Campbell (1973) dan Gardner (1958).

DAFTAR PUSTAKA

- Asmaranto, R., Soemitro, R.A.A, Anwar N. 2010. *Changes of Soil Erodibility due to Wetting and Drying Cycles Repetitions on the Residual Soil. International Journal of Academic Research*, Azerbaijan: Vol 2. No 5. September 2010.
- ASTM D2216. *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM Standard and Test Methods*. ASTM International. USA.
- ASTM D854. *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM Standard and Test Methods*. ASTM International. USA.
- Campbell, J.D. 1973. *Pore pressures and volume changes in unsaturated soils. Ph.D. Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- Doussan, C., Ruy, S. 2009. *Prediction Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity with Electrical Conductivity. Water Resources Research*. Vol 45. 1-12.
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Willey Publications.
- Gardner, W.R. 1958. *Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science*, 85, No. 4, 228-232.
- Giao, P.H., Chung, S.G., Kim D.Y., Tanaka, H. 2003. *Electric Imaging and Laboratory Resistivity Testing for Geotechnical Investigation of Pusan Clay Deposits. Journal of Applied Geophysics* 52. 157–175.
- Liu, N., Likos, W.J. 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Leong, E.C., and Rahardjo, H. 1997. *Permeability functions for unsaturated soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, December.
- Mohanty, B.P., M.D. Ankey, R., Horton, dan R.S Kanwar. 1994. *Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers, Water Resour. Res.*, 30, 2489-2498.
- Muntaha, M. 2005. *Studi pengaruh infiltrasi terhadap kestabilan lereng tanah residual lanau kelempungan dari daerah G.kawi Malang. Tesis S2*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Kodoatie, R.J. 1996. *Pengantar Hidrogeologi*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Revil, A, and L. M. Cathles (1999). *Permeability of Shaly Sands, Water Resour. Res*, 35, 651-662.
- Reynold, W.D., and D.E Elrick. 1985. *In situ Measurement of filed saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a-parameter using the Guelph permeameter, Soil Sci.* 140 (4) 292-302.
- Soemitro, R.A.A., and Asmaranto, R. 2001. *Influence of wetting-drying cycle's repetitions to the soil dynamic properties on unsaturated expansive soil using cyclic triaxial apparatus*. Proceeding. Seminar Nasional. ITS. Surabaya.
- Warrick, A.W., G.J. Mullen., and D.R. Nielsen. 1977. *Predictions of the soil water flux based upon filed-measured soil-water properties, Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 14-19.