

Penentuan Kurva Retensi Air Tanah Laboratorium dengan Sensor Resistensi dan Kapasitansi

Cahyoadi Bowo¹, Mohammad Hasan² dan Bambang Marhaenanto³

Makalah diterima 3 Juni 2008 / disetujui 20 September 2008

ABSTRACT

Laboratory Determination of Soil Water Retention Curve using Resistance and Capacitance Sensors (C. Bowo, M. Hasan, and B. Marhaenanto): A soil water retention curve determination method is developed based on the use of gipsblock and capacitance sensors. The objective of the research was to provide a simple and quick method in characterization of soil water retention in the laboratory based on resistance and capacitance sensors. Undisturbed soil sample collected using stainless steel ring sampler 8cm in diameter and 6 cm height. Digital gipsblock and capacitance sensors connected to personal computer detected periodically water tension and volumetric water content of the sample. To test the reliability of collected data, measurement using pressure plate apparatus was also conducted. Result of the experiment for soil samples textural classes loam to clay loam leded well compromise with result from pressure plate. However, significant deviation of soil water content has been detected as the soil water suction exceeded 15,000hPa. Deviation of measured water content increased with the reducing water content up to 0.300cm³.cm⁻³. Implication of this result showed a further finer standardization assesing water tension above 10.000hPa is needed.

Keywords: Capacitance, resistance, retention curve, soil water

PENDAHULUAN

Penentuan kurva retensi air tanah merupakan langkah penting dalam pengelolaan air tanah untuk berbagai keperluan, seperti irigasi pertanian, transpor pestisida dalam tanah, residu pupuk dalam tanah, bahan-bahan polutan dari limbah industri ataupun perumahan yang mengalir di dalam tanah. Kurva retensi yang merupakan hubungan antara tegangan air tanah (ψ hPa) dengan kadar air (θ cm³ cm⁻³) menggambarkan karakteristik penahanan matriks tanah terhadap air, kemampuan tanah untuk menyediakan air tanaman, ataupun pola distribusi pori tanah.

Pengukuran tegangan air tanah secara konvensional dilakukan menggunakan tensiometer keramik yang diawali Gardner tahun 1932 (Hillel, 1980). Tensiometer konvensional yang diaplikasikan di lapangan pada awalnya menggunakan air raksa (Hg) sebagai indikator manometer. Dengan alasan

keamanan lingkungan, teknik ini telah diubah menggunakan *pressure transducer* model digital (Schlichting *et al.*, 1995).

Berbagai model keramik untuk tensiometer tensiometer telah dikembangkan, di antaranya mesotensiometer (Bowo, 1997) dan microtensiometer (Plagge, 1991) yang membedakan dengan tensiometer konvensional dalam ukuran. Pengembangan lain adalah tensiometer khusus dengan *pressure transducer* yang dipasang dekat pangkal keramik untuk pengukuran pada kedalaman tanah lebih dari 2 meter (McElroy dan Hubbell, 2004). Hal ini terkait kebutuhan pemanfaatan sensor tegangan air untuk mencapai volume representasi pengukuran yang lebih kecil agar dapat diperoleh data lebih detil.

Tensiometer keramik mempunyai keterbatasan pengukuran tegangan maksimum 800 hPa. Diatas tegangan ini pengukuran harus dihentikan karena udara mulai masuk ke dalam tensiometer (Schlichting *et al.*, 1995; Marouelli dan Silva, 2007). Sebagai

¹Laboratorium Fisika dan Konservasi Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember 68121, E-mail: *soil_bowo@telkom.net*

²Laboratorium Komputasi, Fakultas MIPA Universitas Jember

³Laboratorium Instrumentasi, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember

J. Tanah Trop., Vol. 14, No. 1, 2009: 57-64

ISSN 0852-257X

C. Bowo et al.: Penentuan Kurva Retensi Air Tanah dengan Sensor

alternatif tensiometer untuk pengukuran tegangan tinggi yang dipergunakan hingga saat ini adalah gipsblock (Hartge dan Horn, 1992), Thermocouple Psychrometer (McElroy dan Hubbell, 2004) atau Granule Matrix Sensor GMS (Carpena, 2004). Gipsblock yang terbuat dari material gipsum mempunyai kelebihan dibanding peralatan lain, yaitu mudah diperoleh di toko bahan kimia dan dapat dibuat sendiri menjadi sensor tegangan air (Hartge dan Horn, 1992; Bowo et al., 2006).

Gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) merupakan material bersifat higroskopis. Dalam keadaan agak kering struktur agregatnya stabil dan mempunyai konduktivitas elektrik rendah. Jika dimasukkan ke dalam contoh tanah dengan potensial air lebih tinggi (tanah basah), air akan memasuki pori-pori Gipsum yang menyebabkan kenaikan konduktivitas elektrik gipsum (Hartge dan Horn, 1992; Schlichting et al., 1995).

Penggunaan gips untuk pengukuran tegangan air telah diaplikasikan di laboratorium (Hartge dan Horn, 1992; Bowo, 2005) ataupun di lapangan (Wong dan Asseng, 2007). Hasil uji laboratorium terhadap penggunaan gipsblock untuk penentuan kurva retensi dengan teknik tensiogravimetris menunjukkan kesesuaian pola dengan model empirik van Genuchten (van Genuchten, 1980) untuk kelas tekstur tanah lempung sampai lempung berliat (Bowo, 2005).

Penentuan kadar air tanah volumetris (θ_v) dilakukan dengan berbagai metode, di antaranya pancaran neutron dari bahan radioaktif Am-Be (Jury et al., 1991), refleksi gelombang elektromagnetik dengan teknologi Time Domain Reflectometry TDR (Topp et al., 1980; Plagge, 1991; Wessolek et al., 1994; Bowo, 1997) dan pengukuran Frequency Domain Reflectometry FDR (Kelleners et al., 2005; Lukanu dan Savage, 2006), hingga dengan kapasitansi (Baumhardt et al., 2000; De Rosny et al., 2001; Arregui dan Quemada, 2006). Seluruh metode ini mengukur kadar air tanah tanpa perlu mengambil contoh tanah, sehingga memungkinkan untuk melakukan monitoring kadar air dalam jangka panjang pada titik pengukuran yang tetap. Pengukuran dengan Radioaktif terkendala tingkat keamanan bahan radioaktif, sehingga fleksibilitas pemakaiannya rendah. TDR, FDR dan Kapasitans merupakan perangkat pengukuran yang potensial untuk dioperasikan secara intensif.

Perbedaan ketiga metode terletak pada frekuensi listrik yang digunakan. TDR dan FDR menggunakan frekuensi besaran MHz menghasilkan resiko

interferensi lingkungan yang lebih rendah (Lukanu dan Savage, 2006), tetapi membutuhkan teknologi pengukuran lebih tinggi dan mahal. Sensor kapasitan dapat dipergunakan dalam frekuensi rendah kisaran 50 Hz sehingga lebih mudah dibuat, tetapi mempunyai resiko interferensi lebih besar.

Pengukuran kadar air berbasis kapasitansi dilakukan berdasar perubahan nilai kapasitans matriks tanah yang menyisip di antara dua keping penghantar (Robinson et al., 1999; Carpena, 2004; Starr dan Timlin, 2004). Perubahan kapasitans tanah tergantung pada komposisi matriks tanah (konduktivitas dielektrik $\epsilon_0 = 80-85$), udara ($\epsilon_0 = 1$) dan air ($\epsilon_0 = 3-5$) (Topp et al., 1980; Bohl, 1996).

Hal ini dapat ditulis dengan persamaan (Serway dan Faughn, 1989):

$$V = \frac{Q}{C} \quad [1]$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad [2]$$

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \frac{A}{d \cdot C} \quad [3]$$

dengan Q jumlah muatan (Coulomb), C kapasitansi (Farad), ϵ_0 permitivitas vakum (F/m), ϵ_r konstanta dielektrik zat media (-), A luas permukaan keping penghantar (m^2), dan d jarak antar keping (m).

Dengan memasukkan persamaan [2] ke dalam [1] dan menganggap $\epsilon_0 = 1$, diperoleh:

$$V = \frac{Q \cdot d}{\epsilon_r \cdot A} \quad [4]$$

dengan V beda tegangan antar penghantar (Volt). Jika semua variabel kecuali ϵ_r dibuat konstan, maka tegangan V hanya tergantung pada nilai ϵ_r (konstanta dielektrik zat media). Dalam penelitian ini nilai kelembaban dikonversikan terhadap kadar air volumetris tanah (θ_v).

Penetapan kurva retensi tanah ($\Psi-\theta$) di laboratorium secara konvensional dilakukan dengan menentukan kadar air volumetris tanah ($\theta \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) pada beberapa nilai tegangan air (Ψ hPa) dengan bantuan sand-box (Hartge dan Horn, 1992) untuk tegangan 0-100 hPa, dan panci tekan (Klute, 1986; Mecke et al., 2002) untuk tegangan 100-15.000 hPa. Metode penetapan secara elektris dikembangkan dengan kombinasi peralatan tensiometer keramik dan Time Domain Reflectometry TDR (Plagge, 1991; Vaz et al., 2002).

Penggunaan kapasitans sebagai pengukur kadar air dalam penentuan kurva retensi juga telah

diaplikasikan dengan hasil baik (Mecke *et al.*, 2002). Sensor kapasitas ini telah diproduksi dalam fabrikasi, dengan harga yang lebih murah dibandingkan dengan TDR ataupun FDR.

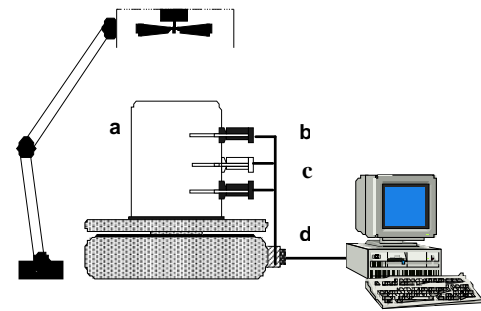
Dalam pembuatan alat ukur, hal penting yang diperlukan adalah presisi dan akurasi peralatan. Presisi merupakan ukuran keragaman observasi yang masih berada di dalam batas penerimaan statistik, menjadi indikator keseragaman atau reproduksibilitas suatu hasil, meskipun hasilnya tidak selalu benar. Akurasi merupakan tingkat kesesuaian hasil terhadap pengukuran standar (Fares *et al.*, 2004).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menguji (a) pemanfaatan peralatan untuk penentuan kurva retensi air tanah di laboratorium dengan gabungan prinsip resistensi dan kapasitansi, dan (b) hasil pengukuran sensor terhadap hasil pengukuran metode konvensional panci tekan.

BAHAN DAN METODE

Peralatan

Penelitian dilakukan di laboratorium menggunakan teknik tensiohigrometri. Tensiometer digital dibuat dari bahan dasar gipsum, dan higrometer dari kapasitansi keping jajar logam tahan karat (Bowo *et al.*, 2006). Sampel tanah dalam ring sampler diameter 8 cm tinggi 6 cm disisipi sensor tensiometer dan higrometer yang terhubung ke komputer Pentium-II lewat kabel RS232. Timbangan digital kapasitas 3.000 g dengan ketelitian 0,1 g diletakkan di bawah sampel untuk tujuan perbandingan ketelitian



Keterangan: a: sample tanah dalam ring dengan evaporator, b: tensiometer, c: higrometer, d: logger, e: komputer

Gambar 1. Penggunaan Tensiohigrometer di laboratorium (ukuran gambar tidak proporsional).

higrometer. Evaporator berupa kipas angin kecil dilengkapi lubang kontrol digunakan untuk mempercepat proses evaporasi (Gambar 1).

Data tegangan air (Ψ) dalam satuan hPa dan kadar air volumetris (θ_v) dalam satuan $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ dicatat dalam periode setiap 4 jam. Data disimpan dalam komputer dan diambil lewat disket untuk pengolahan lebih lanjut.

Tanah

Sampel tanah dikumpulkan dari beberapa wilayah di sekitar Jember dengan ring sampler tahan karat diameter 8 cm dan tinggi 6 cm. Dinding ring

Tabel 1. Karakteristik fisik tanah hasil analisis laboratorium.

No.	Klasifikasi USDA	Distribusi Partikel Tanah				Pori Tanah		
		Liat (%)	Debu (%)	Pasir (%)	Kelas Tekstur	BV g cm^{-3}	BJP g cm^{-3}	Porositas $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
1.	<i>Oxyaquic eutrudept</i>	31	39	30	<i>Clay loam</i>	1,04	2,32	0,552
2.	<i>Vertic eutrudept-1</i>	33	42	25	<i>Clay loam</i>	1,06	2,50	0,576
3.	<i>Vertic eutrudept-2</i>	31	40	27	<i>Clay loam</i>	1,06	2,50	0,576
4.	<i>Typic hapludert</i>	33	42	25	<i>Clay loam</i>	1,05	2,53	0,585
5.	<i>Typic hapludalf</i>	27	43	30	<i>Loam</i>	1,02	2,52	0,595
6.	<i>Typic eutnudept Hor. Ap</i>	24	47	29	<i>Loam</i>	1,09	2,32	0,530
7.	<i>Typic eutnudept Hor. Bw</i>	15	41	44	<i>Loam</i>	1,21	2,27	0,467
<i>Red Brown Earth Soil, Victoria, Australia (Fares et al., 2004)</i>								
8.	Horison E	59	14	27	<i>Sandy clay loam</i>	1,4	-	-
9.	Horison B	25	11	64	<i>Clay</i>	1,6	-	-
10.	Horison Bt	60	10	30	<i>Clay</i>	1,7	-	-

C. Bowo et al.: Penentuan Kurva Retensi Air Tanah dengan Sensor

diberi lubang dengan bor untuk melewati sensor ke dalam tanah. Karakteristik tanah sampel disajikan dalam Tabel 1. Sebagai acuan tingkat keragaman disajikan hasil penelitian Fares *et al.* (2004) untuk *Red Brown Earth Soil* di Australia.

Sebelum pengukuran dilakukan, seluruh sampel tanah direndam 24jam secara bertahap untuk penjenuhan (Schlichting *et al.*, 1995). Sensor higrometer dipasang sebelum proses penjenuhan, sedang tensiometer dipasang setelah penjenuhan. Pemasangan tensiometer dilaksanakan dengan pipa besi berujung runcing untuk membuat lubang horisontal menembus tanah tepat sebesar diameter tensiometer.

Untuk menentukan besarnya simpangan pengukuran terhadap hasil analisis sebagai informasi akurasi peralatan dipergunakan metode konvensional RMSE (*Root Mean Square Error*). Indikator ini banyak dipergunakan mengukur simpangan dalam pengukuran karakteristik hidraulik tanah (Bosch, 2004; Fares *et al.*, 2004) dengan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{ci} - \theta_{oi})^2}{n}} \quad [5]$$

dengan θ_{ci} kadar air diukur kapasitas ($cm^3 cm^{-3}$) dan θ_{oi} kadar air yang diobservasi dari metode standar panci tekan ($cm^3 cm^{-3}$). Dari nilai ini dihitung NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*) untuk menentukan besarnya simpangan:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\theta_{o\max} - \theta_{o\min}} \quad [6]$$

Nilai NRMSE dinyatakan dalam persentase, dengan NRMSE lebih kecil menunjukkan varians residu lebih rendah (Ott, 1994).

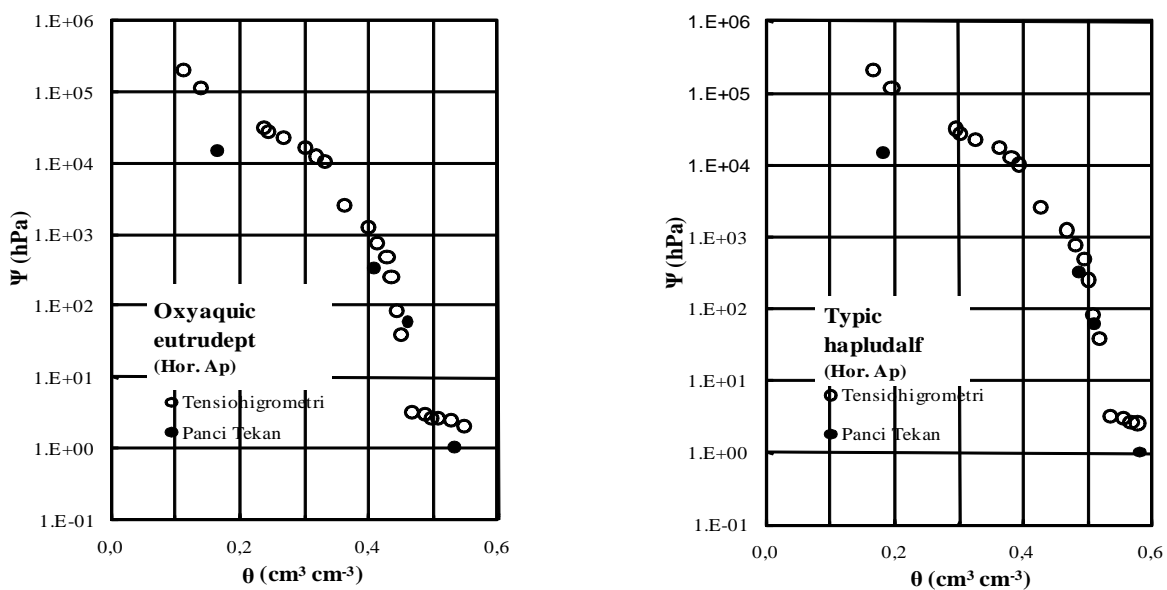
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva Retensi Air

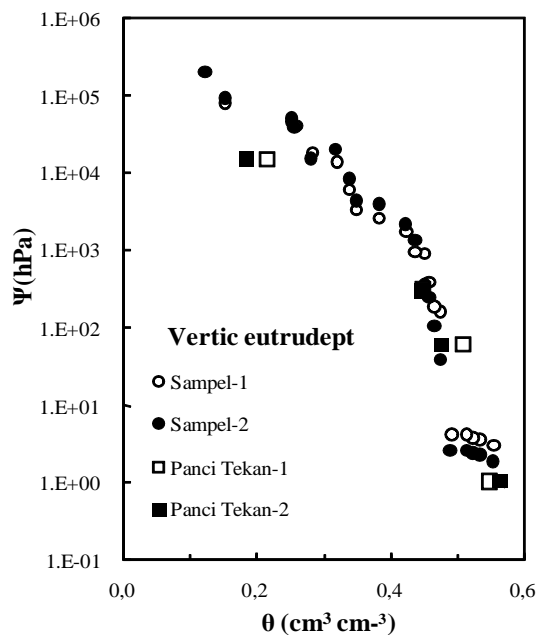
Uji sensor untuk tanah artifisial (sampel tanah yang dihaluskan) dalam ring-sampler dilakukan terhadap seluruh sampel tanah. Indikator luaran sensor tensiometer dan higrometer berupa kurva retensi air tanah atau kurva distribusi pori tanah (Gambar 2).

Gambar 2 menunjukkan kurva retensi yang dihasilkan sensor dibandingkan dengan data panci tekan. Pada tegangan rendah, data sensor menampakkan kesesuaian yang baik dengan data dari panci tekan. Simpangan mulai terjadi saat tegangan mendekati 15.000hPa (pF 4,2). Hasil ini menunjukkan bahwa diperlukan perbaikan standarisasi tegangan dan kadar air sensor pada tegangan di atas 10.000hPa agar dapat dipergunakan pada pengukuran tegangan tinggi.

Dalam penelitian ini pengukuran hanya dilakukan hingga batas tegangan 10⁵hPa. Pada tegangan lebih tinggi tanah mulai retak, dan sensor mulai kehilangan kontak dengan matriks tanah sehingga pengukuran tidak dapat dilanjutkan. Risiko



Gambar 2. Kurva retensi *Oxyaquic eutrudept* (kiri) dan *Typic hapludalf* (kanan).



Gambar 3. Pola distribusi pori pada dua sampel tanah *Vertic eutrudept*.

selanjutnya adalah pecahnya gipsblock ketika tegangan air mendekati 10^6 hPa. Hingga taraf penelitian ini kualitas sensor yang dibuat hanya mampu melakukan pengukuran tegangan dan kadar air sampai batas 10^3 hPa.

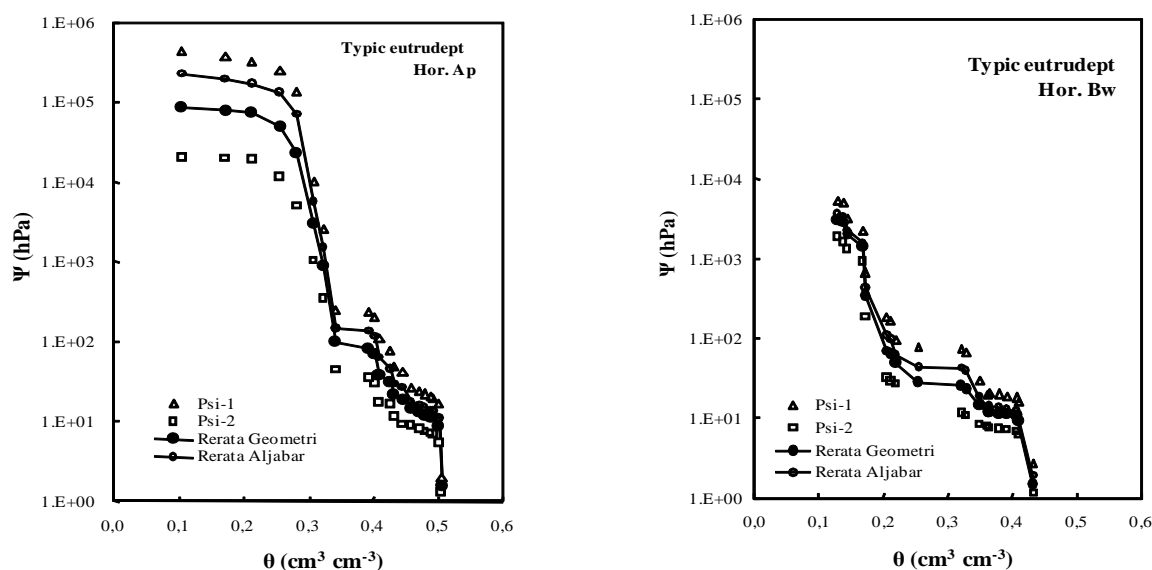
Uji terhadap satu jenis tanah dalam satu profil yang sama tetapi berbeda titik pengambilan disajikan dalam Gambar 3. Kedua sampel tanah diambil dari horison Ap lapisan teratas tanah pada kedalaman 20 cm dari permukaan tanah

Pola distribusi pori yang dihasilkan dari 2 sampel tanah *Vertic eutrudept* menunjukkan kesamaan pola distribusi pori pada jenis tanah yang sama, dan pola simpangan terhadap nilai panci tekan juga terjadi pada tegangan 15.000hPa (Gambar 3). Fenomena yang sama dijumpai juga pada sampel jenis tanah lain.

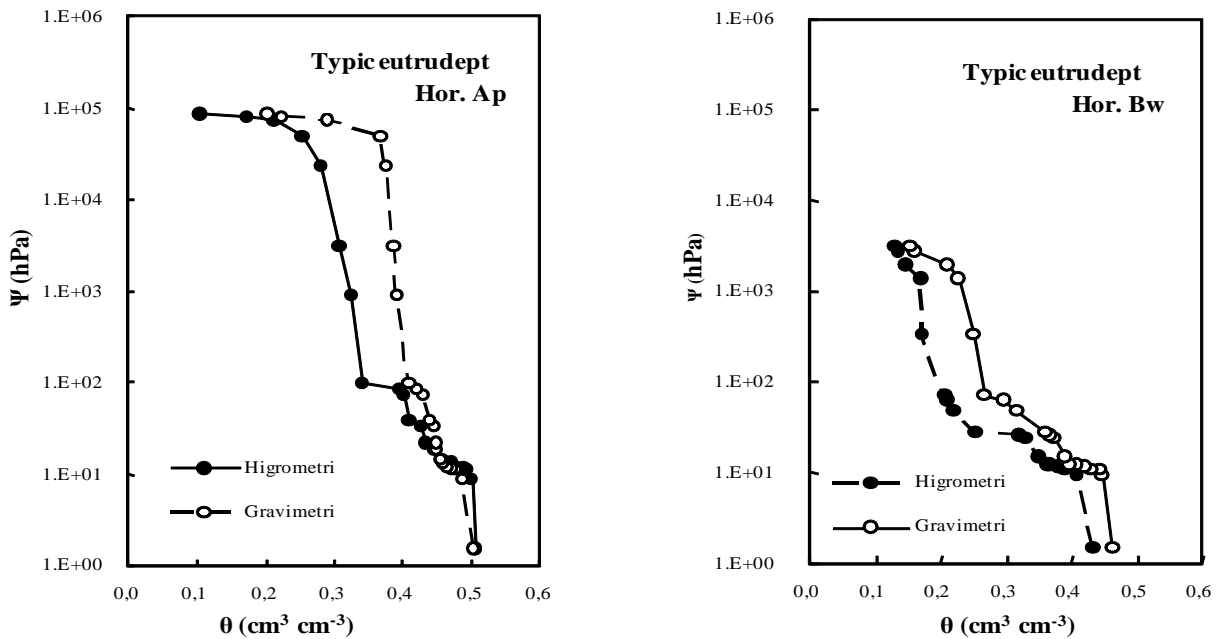
Pengukuran menggunakan 2 sensor tensiometer dan 1 sensor higrometer dilakukan untuk mempelajari pengaruh posisi sensor terhadap penetapan nilai akhir tegangan air tanah. Nilai tengah tegangan diperoleh dari rerata geometri (Plagge, 1991) dibandingkan terhadap rerata aljabar (Hartge dan Horn, 1992) disajikan dalam Gambar 4.

Luaran sensor mampu menunjukkan pola distribusi pori tanah *Inceptisol* (Gambar 4). Tensiometer bagian atas (Ψ_1) selalu menunjukkan tegangan matriks lebih tinggi dibanding sensor di bawah (Ψ_2). Hal ini menunjukkan lapisan atas selalu lebih kering dibanding lapisan bawah. Fenomena ini tidak dapat terukur jika hanya dipergunakan 1 sensor tegangan air yang diletakkan di tengah.

Perbedaan tegangan yang besar mulai terjadi pada tegangan sekitar 10.000hPa ke atas yang sebagian besar diisi oleh pori mikro. Gerakan air tidak jenuh dalam tanah berlangsung secara efektif melalui pori meso (Renger dan Strebel, 1978; Paltineanu dan Starr, 2000) yang berada dalam tegangan air 60-15.000hPa. Pada tegangan di atas 15.000hPa aliran air ke atas sangat menurun, sehingga terjadi beda yang lebih besar antara tegangan lapisan atas (Ψ_1) dengan tegangan lapis bawah (Ψ_2). Pada tegangan 15.000hPa



Gambar 4. Tegangan matriks pada tensiometer atas, bawah, dan rerata geometri.



Gambar 5. Kurva retensi dari sensor higrometer dan gravimetric.

ini mulai terjadi simpangan hasil pengukuran dibanding panci tekan (Gambar 2). Perbedaan ini timbul akibat beda penurunan kecepatan aliran karena peningkatan tegangan air dalam tanah (Plagge, 1991; Hartge dan Horn, 1993). Dari hasil tersebut, rerata geometri menunjukkan nilai yang lebih representatif sebagai perwakilan nilai tegangan air tanah dengan pengukuran dua atau lebih sensor yang diletakkan vertikal.

Analisis Presisi Sensor

Analisis presisi sensor higrometer dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran kadar air volumetris (θ_v) oleh sensor terhadap hasil pengukuran gravimetris timbangan digital (Gambar 5). Nilai tegangan air diperoleh dari rerata geometri hasil pengukuran kedua tensiometer atas dan bawah.

Gambar 5 menunjukkan simpangan kadar air higrometer yang lebih tinggi antara 0,03-0,05 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ dibanding kadar air timbangan (gravimetri) pada wilayah pori meso (tegangan 60-15.000 hPa). Hal ini karena sensor higrometer mengukur kadar air hanya pada bagian tengah contoh tanah, sedang timbangan menentukan kadar air dari seluruh contoh. Perbedaan hasil pengukuran akan muncul selama kadar air dalam tanah tidak terdistribusi merata secara vertikal.

Permasalahan serupa juga dialami peneliti lain (Plagge, 1991) yang mengatasi ketidakseragaman distribusi air dalam kolom vertikal dengan

pemasangan 3 sensor kadar air di dalam contoh tanah menggunakan sensor mini-TDR. Dalam kasus higrometer, metode pemasangan 3 sensor ini tidak praktis diaplikasikan untuk karena harus menambah tinggi sample. Penambahan tinggi sample menyebabkan waktu pengukuran menjadi lebih lama sehingga mengurangi kepraktisan pengukuran.

Root Mean Square Error (RMSE) hasil pengukuran berkisar antara 0,023-0,047 dengan nilai terbesar pada sampel *Typic hapludalf*. Kisaran nilai MRMSE untuk seluruh pengukuran antara 7-12%. Hasil ini tidak berbeda jauh dengan hasil penelitian Fares *et al.* (2004) yang menggunakan kapasitasan pabrikasi dengan tensiometer keramik standar (Tabel 2).

Hasil analisis keragaman menunjukkan masih perlu dilakukannya perbaikan kualitas alat agar MRMSE seluruh hasil pengukuran selalu berada di bawah 10%. Penyimpangan terjadi utamanya pada kadar air tanah tinggi (Gambar 2). Pengurangan sumber kesalahan dapat dilakukan dengan perbaikan kalibrasi sensor kapasitasan ataupun gipsblock terutama pada tegangan di atas 10.000hPa.

Dalam pembuatan peralatan ukur atau sensor diperlukan ketepatan (*accuracy*) dan kejituan (*precision*), selain juga diharapkan memenuhi kriteria ketahanan (*robust*). Ketahanan gipsblock mengukur tergantung dari material yang dipergunakan dan sifat *cracking* tanah yang diukur. Dalam penelitian ini

Tabel 2. Simpangan hasil pengukuran kurva retensi air tanah.

Tanah	Sampel	Metode	RMSE	MRMSE (%)	Kadar Air (cm ³ cm ⁻³)	
					Rendah	Tinggi
Hasil Pengukuran Penelitian						
<i>Oxyaquic eutrudept</i>	4	C-R ^{1/}	0,037	10,1	0,167	0,534
<i>Typic hapludalf</i>	4	C-R ^{1/}	0,047	11,9	0,183	0,582
<i>Ventic eutrudept-1</i>	4	C-R ^{1/}	0,023	6,9	0,215	0,548
<i>Ventic eutrudept-2</i>	4	C-R ^{1/}	0,036	9,5	0,184	0,563
Red Brown Earth Soil, Australia (Fares et al., 2004)						
Horison E	6	C-T ^{2/}	0,034	-	0,038	0,330
Horison B	6	C-T ^{2/}	0,021	-	0,183	0,390
Horison Bt	6	C-T ^{2/}	0,014	-	0,240	0,406

Keterangan: ^{1/} C-R *Capacitance-Resistance*, ^{2/} C-T *Capacitance – Ceramic Tensiomete*.

gipsblock mengalami keretakan (kerusakan permanen) pada tegangan sekitar 10⁶-10⁷hPa, sedang kapasitan pada tegangan 10⁶hPa. Pada tingkatan ini pengukuran tidak dapat dilanjutkan, dan sensor tidak dapat dipergunakan lagi.

Untuk tanah-tanah yang bersifat *vertic* (mengembang-mengerut) yang kuat, nilai ketahanan ini dapat berada dibawah angka tersebut. Pada kapasitan kerusakan terjadi dengan mengelupasnya isolator keping logam akibat gaya adhesi dengan matriks tanah. Hal ini menyebabkan terjadinya kebocoran sistem kapasitan yang merusak standarisasi sensor. Perlu ditemukan konstruksi yang tepat untuk meningkatkan kekuatan fisik sensor kadar air kapasitan dengan mencoba mencari pengganti resin sebagai mantel keping kapasitan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan uji sensor terhadap kurva retensi air tanah menghasilkan unjuk kerja yang baik. Hasil uji terhadap tanah dengan kelas tekstur lempung (*loam*) dengan 2 sensor tensiometer pada bagian atas dan bawah sample tanah menunjukkan kemampuan sensor yang baik dalam mengukur fenomena ketidakseragaman kadar air dalam contoh tanah pada gerak air vertikal. Perbedaan nilai tegangan semakin jelas ketika gerakan air didominasi oleh pori mikro pada tegangan di atas 15.000hPa.

Uji simpangan nilai kadar air sensor higrometer yang dilakukan terhadap teknik gravimetri menunjukkan nilai simpangan yang rendah pada tegangan kecil. Simpangan semakin meningkat dengan menurunnya kadar air tanah di bawah 0,300

cm³ cm⁻³. Teknik tensiohigrometri menentukan kurva retensi air tanah dalam penelitian ini menunjukkan konsistensi hasil yang baik untuk sebagian besar sampel penelitian. Simpangan mulai terjadi pada kadar air di bawah 0,300 cm³ cm⁻³ atau tegangan di atas 15.000hPa. Dengan perbaikan kualitas fisik sensor dan standarisasi, teknik pengukuran ini dapat dikembangkan untuk pengukuran tanah-tanah tropika yang di musim kemarau pada umumnya mempunyai tegangan di atas 10.000hPa. Pemanfaatan resistensi dan kapasitansi dalam penentuan kurva retensi air tanah di laboratorium potensial untuk dikembangkan menjadi peralatan lapangan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional melalui Penelitian Hibah Bersaing XIV Tahun Anggaran 2007 dengan Surat Perjanjian nomor Nomor 040/SP2H/PP/DP2M/III/2007.

DAFTAR PUSTAKA

- Arregui, L.M. and M. Quemada. 2006. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil* 288: 57-69.
- Baumhardt, R.L., R. J. Lascano, and S. R. Evett. 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1940-1946.
- Bohl, H. 1996. Eichung von TDR zur wasergehaltsbestimmung in boeden auf basis gemischt dielektrischer modelle. *Fachgebiet Bodenkunde*,

C. Bowo et al.: Penentuan Kurva Retensi Air Tanah dengan Sensor

- Institut fuer Oekologie, Technische Universitaet Berlin. Dissertation.
- Bosch, D. 2004. comparison of capacitance-based soil water probes in coastal plain soils. *Vadose Zone J.* 3: 1380-1389.
- Bowo, C. 1997. Wasserhaushalt eines ehemaligen Rieselfeldstandortes in Berlin Buch. (D83) Berlin: Fachbereich 7-Umwelt und Gesellschaft- der Technischen Universität Berlin. Dissertation.
- Bowo, C. 2005. Kajian pemanfaatan gipsblock dalam penentuan karakteristik tidak jenuh tanah dengan teknik tensiogravimetri. Laporan Penelitian Dasar. Lembaga Penelitian Universitas Jember.
- Bowo, C., B. Marhaenanto, dan M. Hasan. 2006. Teknologi tensiograf digital untuk penentuan karakteristik hidraulik tanah. Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun I. Lembaga Penelitian Universitas Jember.
- Carpenna, R.M. 2004. Field devices for monitoring soil water content. Bulletin 343, Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- De Rosny, G., A. Chanzy, M. Parde, J.C. Gaudu, J.P. Frangi, and J.P. Laurent. 2001. Numerical modeling of a capacitance probe response. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 13-18.
- Fares, A; P. Buss, M. Dalton, A. I. El-Kadi, and L. R. Parsons. 2004. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking–swelling clay soil. *Vadose Zone J.* 3:1390-1399.
- Hartge, K.H. und R. Horn, 1992. Die physikalische Untersuchung von Böden. 3., durchgesehene Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic Press, San Diego, CA.
- Jury, W.A., W.R. Gardner and W.H. Gardner. 1991. Soil Physics. Fifth Edition. John Wiley and Sons Inc. Canada.
- Kelleners, T.J., D. A. Robinson, P. J. Shouse, J. E. Ayars, and T. H. Skaggs. 2005. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 67-76.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.: 635-662.
- Lukanu, G. and M.J. Savage. 2006. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil. *Water SA* (32): 34-43.
- Marouelli, W.A. and W.L. C. Silva. 2007. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil. *Irrig Sci.* 25: 411–418.
- McElroy D.L., and J. M. Hubbell. 2004. Evaluation of the conceptual flow model for a deep vadose zone system using advanced tensiometers. *Vadose Zone J.* 3: 170-182.
- Mecke, M., C. J. Westman, and H. Ilvesniemi. 2002. Water retention capacity in coarse podzol profiles predicted from measured soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1-11.
- Ott, L. 1984. *An Introduction To Statistical Methods and Data Analysis.* PWS Publ., Boston.
- Paltineanu, I.C. and J. L. Starr. 2000. Preferential Water Flow Through Corn Canopy and Soil Water Dynamics Across Rows. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 44-54.
- Plagge, R., 1991. Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden. Fachgebiete Bodenkunde und Regionale Bodenkunde. Institut für Ökologie. Technische Universität Berlin (Dissertation).
- Renger, M. und Strebel, O. 1978. Der Transport von Funktion der Zeit und der Tiefe. *Kali-Briefe.* 14(2): 137-152.
- Robinson, D.A., C.M.K. Gardner, and J.d. Cooper. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, Capacitance and Theta probe: comparison, including the effect of bulk soil electrical conductivity. *J. Hydrology* 223:198-211.
- Schlichting, E., H.P. Blume und K. Stahr, 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler.* 2., neubearbeitete Auflage. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.
- Serway, R.A. and J.S. Faughn. 1989. *College Physics.* 2nd Ed., Saunders College Publ., Philadelphia.
- Starr, J.L. and Dennis J. Timlin. 2004. Using High-Resolution Soil Moisture Data to Assess Soil Water Dynamics in the Vadose Zone. *Vadose Zone J.* 3: 926-935.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resource Res.* 16: 547-582.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Vaz, C.M.P., M. F. Iossi, J. M. Naime, A. Macedo, J. M. Reichert, D.J. Reinert, and M. Cooper. 2005. Validation of the Arya and Paris Water Retention Model for Brazilian Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 577-583.
- Wessolek, G., R. Plagge, F. J. Leij and M. Th. Van Genuchten. 1994. Analyzing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. *Geoderma* 64: 93-110.
- Wong, M.T.F. and S. Asseng. 2007. Yield and environmental benefits of ameliorating subsoil constraints under variable rainfall in a Mediterranean environment. *Plant Soil* 297: 29-42.