

## PENETAPAN KADAR AIR TANAH MELALUI PENGUKURAN SIFAT DIELEKTRIK PADA BERBAGAI TINGKAT KEPADATAN

### DETERMINING SOIL WATER CONTENT USING DIELECTRICAL PROPERTIES AT SEVERAL COMPACTION LEVELS

**Bandi Hermawan**

*Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu  
bhermawan\_bkl@yahoo.com*

#### ABSTRACT

This research aims to determine the relation between the electrical impedance and water content of the soil at several compaction levels. The benefit of the research is to provide an accurate technique in predicting soil water content. About 1 kg soil sample with 0 – 2 mm in diameter was poured into a plastic container with known volume, weighed then the bulk density was calculated. Soil inside the container was then saturated with water, weighed and the gravimetric water content was calculated. The electrical impedance was measured using the digital Ohm-meter connected to the electrical circuit that producing the 1 kHz electrical current. Water was allowed to evaporate, water content and electrical impedance values were measured everyday. After soil water content decreased to about 0.2 kg kg<sup>-1</sup>, soil sample was compacted and saturated, then the above processes were repeated. Results show that the relation between water content ( $\Theta$ ) and electrical impedance ( $Z$ ) takes the non-linear form of  $\Theta = aZ^{-b}$ . for UNIB-1 soil, the values of volumetric water content ( $\Theta_v$ ) can be predicted from the equation  $\Theta_v = (1/P_b) 0.24 Z^{-0.61}$  ( $R^2 = 0.964$ ) where  $P_b$  is bulk density. However, constant  $a = 0.24$  should be modified to 0.14 when used to predict water content of adjacent soil having different texture, organic matter, cation and electrical conductivity.

*Keywords:* soil water content, dielectrical properties, electrical impedance, compaction.

#### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menetapkan hubungan nilai impedansi listrik dan kadar air tanah pada berbagai tingkat kepadatan. Manfaat penelitian ini adalah guna mendapatkan teknik pendugaan kadar air tanah yang akurat. Sekitar 1 kg contoh tanah berukuran 0 – 2 mm dimasukkan ke dalam bejana plastik yang telah diketahui volumenya, ditimbang dan ditetapkan berat volumenya. Tanah di dalam bejana lalu dijenuhkan dengan air, ditimbang dan ditetapkan kadar air gravimetriknya. Selanjutnya, nilai impedansi listrik tanah diukur menggunakan Ohm-meter digital yang dihubungkan dengan rangkaian elektronik yang mengeluarkan arus listrik pada signal frekuensi 1 kHz. Air tanah dibiarkan menguap, lalu pengukuran kadar air dan nilai impedansi diulangi setiap hari. Setelah kadar air tanah mencapai sekitar 0,2 kg kg<sup>-1</sup>, contoh tanah dipadatkan dan dijenuhkan, lalu proses pengukuran diatas diulangi kembali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan kadar air ( $\Theta$ ) dan impedansi listrik ( $Z$ ) mengambil bentuk non-linear  $\Theta = aZ^{-b}$ . Nilai kadar air tanah volumetri ( $\Theta_v$ ) dapat dihitung berdasarkan persamaan  $\Theta_v = (1/P_b) 0,24 Z^{-0,61}$  ( $R^2 = 0,964$ ) di mana  $P_b$  adalah berat volume tanah. Namun konstanta  $a = 0,24$  harus dimodifikasi menjadi 0,14 apabila digunakan untuk menduga kadar air tanah lain yang memiliki tekstur, bahan organik, kation dan daya hantar listrik yang berbeda.

*Kata kunci:* kadar air tanah, sifat dielektrik, impedansi listrik, kepadatan

#### PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu sifat fisik yang berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan tanaman dan aspek-aspek kehidupan manusia lainnya. Penetapan kadar air tanah dapat dilakukan secara langsung melalui pengukuran

perbedaan berat tanah (disebut metode gravimetri) dan secara tidak langsung melalui pengukuran sifat-sifat lain yang berhubungan erat dengan air tanah (Gardner, 1986). Metode gravimetri merupakan metode standar yang memiliki akurasi yang sangat tinggi. Namun metode ini harus dilakukan di laboratorium sehingga penerapannya

membutuhkan waktu dan tenaga yang banyak untuk mendapatkan satu nilai kadar air tanah.

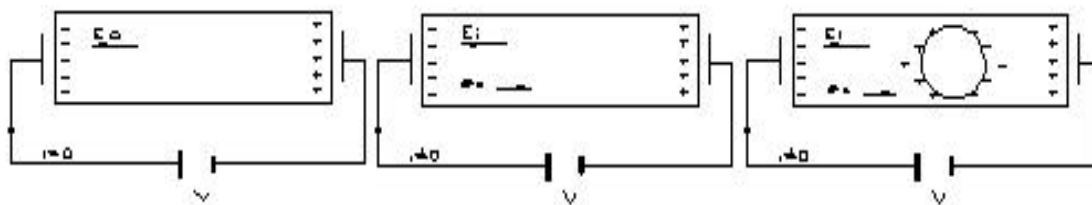
Kebutuhan akan metode pengukuran tidak langsung menjadi sangat mendesak sebab banyaknya waktu dan tenaga yang dibutuhkan metode gravimetri (Nadler *et al.*, 1991; Kachanoski *et al.*, 1992). Sifat-sifat dielektrik tanah seperti konduktivitas, kapasitansi dan impedensi listrik pada suatu media berpori bervariasi menurut kadar air. Penelitian Hermawan *et al.* (2000) tentang pengukuran sifat-sifat dielektrik untuk menduga kepadatan tanah menunjukkan bahwa air tanah cenderung meningkat, sebaliknya udara di dalam pori cenderung menghambat laju konduktivitas listrik di dalam tanah. Indikasi tersebut terlihat dari meningkatnya nilai impedensi listrik dengan semakin rendahnya kadar air tanah. Pengaruh kadar air terhadap nilai dielektrik tanah justru jauh lebih besar daripada pengaruh kepadatan tanah. Penetapan kadar air tanah melalui pengukuran dielektrik hanya dapat dibuktikan secara teori oleh Friendman (1997).

Tanah sebagai suatu sistem dapat dimodelkan dengan sifat dielektrik, semi-isolator dan porositas, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Apabila di antara kedua plat disisipi bahan dielektrik maka akan terjadi dipole dalam bahan tersebut, di mana distribusi muatan akan

menumpuk pada ujung-ujung dielektrik, sementara pada bahan tidak akan terjadi aliran arus listrik ( $i=0$ ) (Gambar 1a). Hal ini disebabkan karena sistem hanya memiliki dielektrik dan bahan tidak mengandung elektron bebas. Medan listrik pada sistem ini hanya menimbulkan polarisasi dan tidak terjadi mobilitas muatan sehingga arus listrikpun tidak mengalir.

Apabila dalam bahan terdapat muatan bebas, kehadiran medan listrik akan menimbulkan arus listrik ( $i \neq 0$ ) seperti terlihat pada Gambar 1b dan 1c. Gambar 1b memperlihatkan suatu sistem di mana bahan dipandang sebagai dielektrik homogen dan terdapat sedikit muatan bebas, sehingga dikenal sebagai bahan semi-isolator atau bahan konduktor dengan konduktivitas rendah. Gambar 1c mewakili bahan semi-isolator yang dilengkapi dengan pori-pori yang terdistribusi merata pada bahan.

Pada bahan semi-isolator berpori ini, distribusi muatan setelah dipengaruhi medan listrik  $E$  tidak hanya terkonsentrasi pada permukaan dari ujung-ujung bahan, tetapi juga terdistribusi pada permukaan luar pori. Apabila pori tersebut kosong (hanya berisi udara) maka pori bersifat dielektrik sempurna, sedangkan bila berisi air atau molekul lain maka muatan air dan molekul lain tersebut akan memberikan kontribusi muatan atau *dipole* di permukaan pori.



Gambar 1a. Bahan dielektrik

Gambar 1b. Semi-silator

Gambar 1c. Porositas

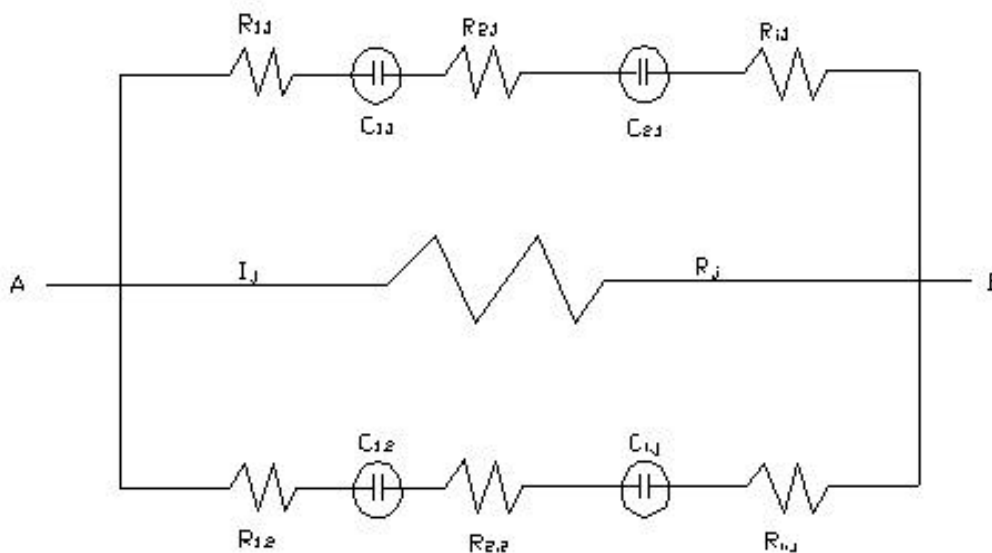
Sebagai media berpori, tanah dapat dimodelkan sebagai rangkaian resistor  $R$  yang mewakili konduktivitas dan kapasitor  $C$  yang mewakili porositas sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. Dengan menginjeksikan listrik dari A ke B pada frekuensi tertentu maka dapat

ditentukan impedensi ( $Z$ ) sebagai kontribusi kapasitor dalam sampel tanah. Hasil penelitian Hermawan (2000a; 2000b) menunjukkan bahwa listrik yang diinjeksikan pada frekuensi 1 sampai 5 kHz paling responsif terhadap perubahan karakteristik tanah. Dimensi sampel dinyatakan

dengan luas penampang dan panjang yang sebanding dengan jumlah pori (C) dan resisten (R). Setiap pori diwakili oleh satu kapasitor dan antara kapasitor dibatasi oleh resistensi,  $R_{ij}$ . Dari model pada Gambar 2 dapat dipahami bahwa apabila ujung A-B diberi beda potensial  $V_{A-B}$  maka arus listrik akan mengalir melalui  $R_j$ , sedangkan kapasitor  $C_{ij}$  akan mengumpulkan muatan, tetapi pada cabang ini tidak mengalir arus.

Nilai impedensi Z berbanding lurus dengan produk dari resistensi R, sedangkan nilai R dipengaruhi oleh rasio antara air dan udara didalam pori C. Nilai R meningkat dengan

semakin dominannya udara di dalam pori, karena udara merupakan penghantar listrik yang jelek. Dengan demikian, nilai Z juga berbanding lurus dengan proporsi udara dan berbanding terbalik dengan proporsi air yang ada di dalam pori. Berdasarkan teori di atas maka nilai Z meningkat dengan semakin rendahnya kadar air tanah yang diukur. Penelitian ini bertujuan untuk menetapkan hubungan antara nilai impedensi listrik dan kadar air tanah pada berbagai tingkat kepadatan tanah. Luaran dari penelitian ini adalah teknik penetapan kadar air tanah secara cepat dan akurat melalui pengukuran nilai impedensi listrik tanah.



Gambar 2. Pemodelan sambungan R dan C pada tanah

**METODE PENELITIAN**

*Perlakuan pepadatan tanah*

Penelitian ini dilaksanakan dari Maret sampai Mei 2004 di Laboratorium Fisika Tanah Universitas Bengkulu. Contoh tanah yang digunakan adalah Ultisol (kedalaman 0 – 20 cm) yang diambil contohnya di lahan Universitas Bengkulu. Contoh tanah pertama (UNIB-1), memiliki tekstur lempung berdebu (*silty loam*) dengan kandungan pasir 26%, debu 65% dan liat 9%, serta mengandung C-organik 1.6%, KTK 16 me 100 g<sup>1</sup>, kejenuhan basa 26%, Ca dan Mg masing-masing 0.50 me 100 g<sup>1</sup>, Na 0.26 me 100

g<sup>1</sup>, Fe 48 ppm, Mn 8.5 ppm, dan daya hantar listrik 112 μs/cm.

Contoh tanah dikeringanginkan, ditumbuk, dan diayak dengan ayakan bermata saring 2.00 mm. Kadar air contoh tanah,  $e_g$ , kering angin ditetapkan secara gravimetri. Sekitar 1 kg tanah kering angin ( $W_{ta}$ ) ukuran 0 – 2 mm dimasukkan ke dalam bejana plastik dan diketahui berat dan volumenya. Berat tanah tersebut dikoreksi dengan kadar air sehingga diperoleh berat tanah setara kering oven ( $W_t$ ) yang penghitungannya dilakukan sebagai berikut:

$$W_t = (W_{ta}) / (1 + \theta_g) \quad (1)$$

Sebagian tanah dimasukkan ke dalam kontainer tanpa dilakukan pemadatan sama sekali, sedangkan sebagian lagi dipadatkan dengan cara menghentakkan kontainer secara berulang-ulang sehingga diperoleh berat volume masing-masing sebesar 0.85, 0.92 dan 1.05 Mg m<sup>-3</sup>.

#### *Pengukuran kadar air gravimetri dan impedensi listrik*

Tanah yang telah dimasukkan ke dalam bejana disiram dengan air hingga permukaan air sama tinggi dengan permukaan dan dibiarkan 24 jam agar semua pori terisi air. Tanah di dalam kontainer ditimbang ( $W_1$ ), lalu kadar air gravimetri pada kondisi tersebut,  $\Theta_{g1}$ , dihitung sebesar:

$$\Theta_{g1} = (W_1 - W_t)/W_t \quad (2)$$

Nilai impedensi listrik tanah ( $Z_1$ ) diukur menggunakan Ohm-meter digital yang dihubungkan dengan rangkaian elektronik yang mengeluarkan arus listrik pada signal frekuensi 1 kHz.

Tanah di dalam kontainer dibiarkan mengalami evaporasi selama 24 jam, lalu ditimbang kembali ( $W_2$ ). Kadar air tanah gravimetri setelah mengalami evaporasi selama satu hari,  $\Theta_{g2}$ , dihitung dengan:

$$\Theta_{g2} = (W_2 - W_t)/W_t \quad (3)$$

Nilai impedensi listrik tanah selama satu hari evaporasi ( $Z_2$ ) diukur dengan alat yang sama. Proses pengeringan dan pengukuran nilai  $\Theta_g$  dan  $Z$  di atas diulangi setiap hari sehingga diperoleh kadar air yang mendekati kondisi titik layu permanen.

#### *Aplikasi model pendugaan kadar air*

Model yang dihasilkan dari percobaan pada tanah UNIB-1 digunakan untuk menduga nilai kadar air pada tanah UNIB-2 yang memiliki kelas tekstur lempung berpasir (*sandy loam*) dengan kandungan pasir 53%, debu 34% dan liat 13%, serta C-organik 3.0%, KTK 22 me 100 g<sup>1</sup>, Ca 5.15 me 100 g<sup>1</sup>, Mg 1.46 me 100 g<sup>1</sup>, dan daya

hantar listrik 78  $\mu\text{s cm}^{-1}$ . Nilai  $Z$  diukur seperti pada tanah UNIB-1, kadar air lalu dihitung menggunakan model yang dihasilkan. Sebagai perbandingan, kadar air diukur dengan metode gravimetrik, hasilnya lalu dibandingkan dengan kadar air berdasarkan hasil penghitungan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Pembangunan model*

Proses pemadatan tanah UNIB-1 menghasilkan nilai berat volume 0.85, 0.92 dan 1.05 Mg m<sup>-3</sup>, sementara proses penjujukan dan pengeringan tanah menghasilkan keragaman kadar air antara 0.18 sampai 0.56 kg kg<sup>-1</sup>. Kombinasi kepadatan dan kadar air tanah tersebut selanjutnya digunakan untuk menetapkan hubungan antara kadar air dan impedensi listrik tanah. Dalam penelitian ini, tanah UNIB-1 digunakan untuk membangun model hubungan tersebut.

Hasil pengukuran terhadap sifat dielektrik, yang dinyatakan dengan nilai impedensi, dan kadar air yang ditetapkan secara langsung dengan metode gravimetri disajikan pada Tabel 1. Secara umum, kadar air berbanding terbalik dengan nilai impedensi listrik di dalam tanah. Menurunnya kadar air dengan meningkatnya nilai impedensi terlihat konsisten pada semua tingkat kepadatan tanah. Pada kondisi jenuh, di mana kadar air gravimetri ( $\Theta_g$ ) berada di atas 0.5 kg kg<sup>-1</sup> dan kadar air volumetri di atas 0.4 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, nilai impedensi ( $Z$ ) berada di bawah 0.4 k $\Omega$ . Sebagai perbandingan, nilai  $Z$  untuk air tanah dangkal (air sumur) adalah 0.25 k $\Omega$  sehingga nilai  $Z$  untuk tanah jenuh lebih mendekati nilai  $Z$  untuk air.

Hubungan antara nilai impedensi dan kadar air gravimetri dianalisis secara empirik melalui Gambar 3. Hubungan antara kadar air gravimetrik  $\Theta_g$  dan impedensi  $Z$  mengambil bentuk non-linear sebagai berikut:

$$\Theta_g = aZ^{-b} \quad (4)$$

di mana  $a$  dan  $b$  merupakan konstanta. Tanda negatif pada konstanta  $b$  dalam Persamaan 4 menunjukkan bahwa kadar air tanah berbanding terbalik dengan nilai impedensinya.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa konstanta  $a$  cenderung menurun dengan meningkatnya kepadatan, misalnya dari 0.3238 untuk nilai berat volume 0.85 Mg m<sup>-3</sup> menjadi 0.2405 untuk berat volume 1.05 Mg m<sup>-3</sup>. Sebaliknya nilai konstanta  $b$  relatif sama untuk semua tingkat kepadatan yakni antara -0.55 sampai -0.62 atau bila dalam satu desimal menjadi -0.6.

Tabel 1. Impedensi listrik, kadar air gravimetri ( $\theta_g$ ) dan volumetri ( $\theta_v$ ) tanah UNIB-1 yang diukur pada berbagai tingkat kepadatan

Berat Volume	Pengamatan ke	Impedensi ( $k\Omega$ )	$\theta_g$ (kg kg <sup>-1</sup> )	$\theta_v$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) (hitungan)
0.85 Mg m <sup>-3</sup>	1	0.371	0.560	0.477
	2	0.452	0.520	0.442
	3	0.568	0.480	0.408
	4	0.652	0.455	0.387
	5	0.792	0.372	0.317
	6	0.990	0.325	0.276
0.92 Mg m <sup>-3</sup>	1	0.311	0.519	0.479
	2	0.361	0.474	0.438
	3	0.424	0.454	0.419
	4	0.584	0.394	0.364
	5	0.740	0.357	0.329
	6	0.912	0.313	0.289
1.05 Mg m <sup>-3</sup>	1	0.345	0.475	0.496
	2	0.362	0.452	0.473
	3	0.374	0.411	0.430
	4	0.453	0.383	0.401
	5	0.556	0.370	0.387
	6	0.565	0.326	0.341
	7	0.791	0.277	0.290
	8	1.052	0.240	0.251
	9	1.512	0.183	0.191

Kadar air gravimetri selanjutnya dikonversi menjadi kadar air volumetri,  $\theta_v$ , di mana kadar volumetri merupakan perkalian antara kadar air gravimetri dan berat volume tanah. Pola hubungan antara nilai impedensi dan kadar air volumetri sama dengan pola hubungan antara impedensi dan kadar air gravimetri sebagaimana disajikan pada Gambar 4. Nilai konstanta  $a$  menurun dari 0.2756 menjadi 0.2516 dengan meningkatnya berat volume dari 0.85 menjadi 1.05 Mg m<sup>-3</sup>, sedangkan nilai konstanta  $b$  sama dengan pada Gambar 3.

Tingginya nilai koefisien korelasi pada Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa sekitar 98% keragaman kadar air tanah dapat dijelaskan oleh keragaman nilai impedensi listrik. Keeratan hubungan yang demikian memungkinkan dilakukannya penetapan kadar air tanah melalui pengukuran impedensi listrik tanah. Hal ini sangat

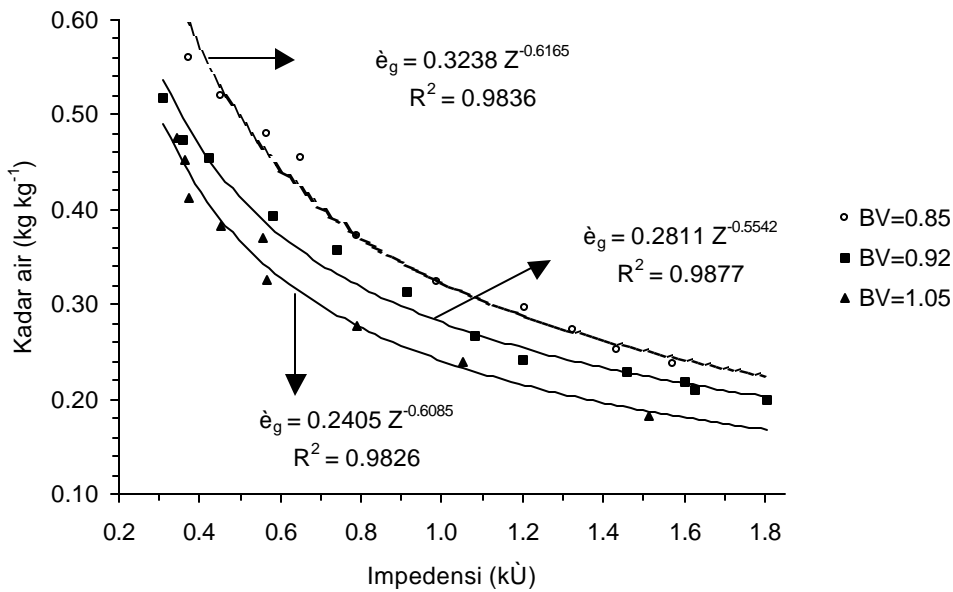
menguntungkan karena pengukuran impedensi listrik tanah jauh lebih mudah dan cepat dibandingkan pengukuran kadar air tanah secara gravimetri. Namun demikian, model hubungan kadar air dan impedensi listrik pada Gambar 3 dan 4 masih dilakukan terpisah antara nilai berat volume, sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mendapat satu model secara terpadu.

Ketiga kurva pada Gambar 4 dianalisis secara terintegrasi untuk mendapatkan satu hubungan kadar air – impedensi yang terbebas dari faktor kepadatan. Sebagaimana disajikan pada Gambar 5, hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa kadar air volumetri tetap memiliki hubungan yang sangat erat dengan impedensi listrik bila nilai berat volume tanah dimasukkan ke dalam model ( $R^2 = 0.964$ ). Dengan demikian, nilai kadar air volumetri dapat ditetapkan berdasarkan nilai

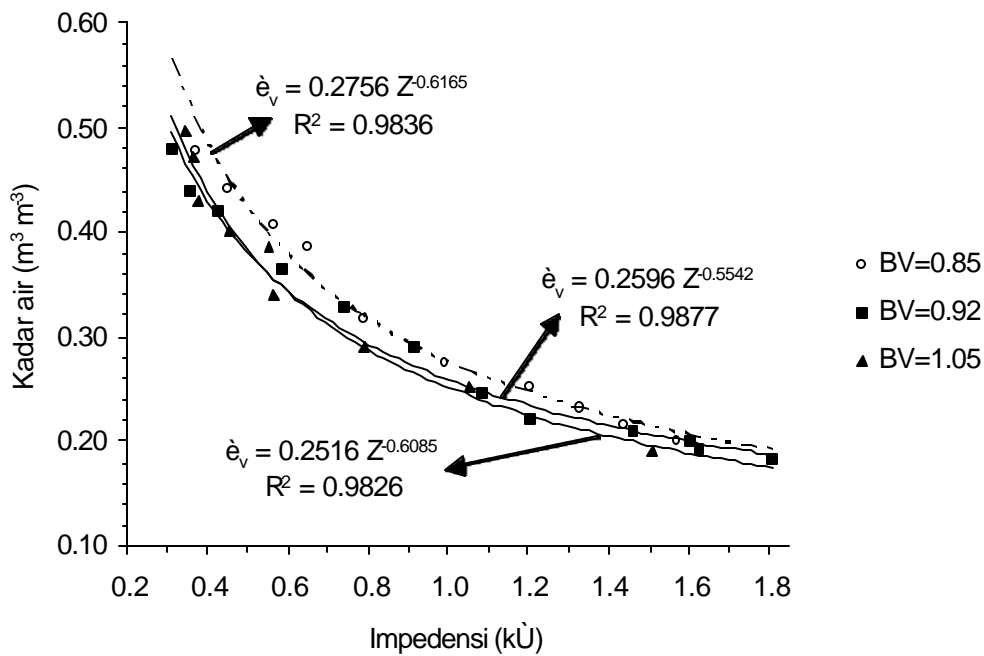
impedensi listrik selama nilai berat volumenya diketahui. Penetapan tersebut dilakukan dengan persamaan:

$$\theta_v = (1/\bar{n}_b) 0,24 Z^{-0,61} \quad (5)$$

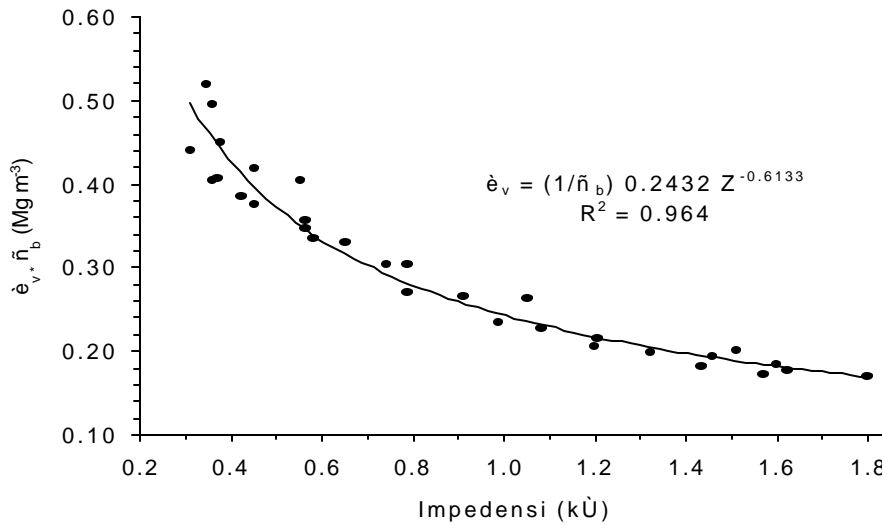
Persamaan 5 selanjutnya dapat digunakan untuk mengkonversi nilai impedensi listrik tanah menjadi nilai kadar air volumetri pada berbagai tingkat kepadatan tanah.



Gambar 3. Hubungan antara impedensi dan kadar air gravimetri



Gambar 4. Hubungan antara impedensi dan kadar air volumetri



Gambar 5. Model untuk menghitung kadar air volumetri dari nilai impedensi listrik dan berat volume

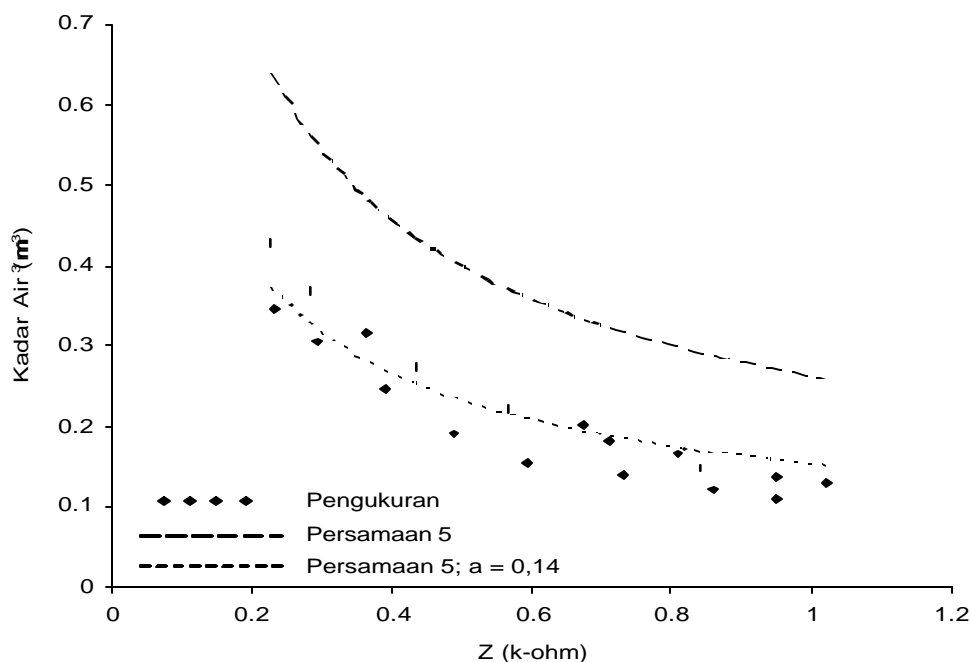
*Aplikasi model*

Persamaan 5 digunakan untuk menduga kadar air tanah UNIB-2 berdasarkan pengukuran nilai impedensinya dan hasil pendugaan tersebut disajikan pada Gambar 6. Dibandingkan hasil pengukuran, Persamaan 5 menghasilkan kadar air volumetrik dugaan sekitar  $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  lebih tinggi pada semua nilai impedensi. Namun perbedaan tersebut berhasil diperkecil dengan memodifikasi konstanta *a* pada Persamaan 5. Hasil pendugaan terbaik diperoleh apabila nilai *a* diturunkan menjadi 0.14 sedangkan nilai *b* tetap  $-0.61$ . Modifikasi terhadap nilai *a* pada Persamaan 5 ini berhasil memperkecil perbedaan antara nilai kadar air dugaan dan hitungan menjadi kurang dari  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Perbedaan nilai konstanta *a* pada Persamaan 5 untuk menghasilkan nilai dugaan kadar air

terbaik pada tanah UNIB-1 dan UNIB-2 kemungkinan disebabkan oleh karakteristik fisik dan kimia kedua jenis tanah tersebut. Tanah UNIB-1 memiliki kandungan pasir lebih rendah, debu lebih tinggi, C-organik lebih rendah, KTK lebih rendah, kation lebih rendah, dan daya hantar listrik lebih tinggi dibandingkan tanah UNIB-2. Ahuja *et al.* (1995) menemukan bahwa pergerakan air di dalam tanah dan proses absorpsi air oleh matriks tanah dipengaruhi oleh kandungan kimia di dalam tanah.

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk melacak perubahan konstanta *a* dalam kaitannya dengan salah satu atau beberapa karakteristik tanah di atas. Metode ini memiliki peluang untuk digunakan dalam memonitor pergerakan air irigasi di dalam tanah (Or, 1995).



Gambar 6. Kadar air tanah volumetrik hasil pengukuran versus hasil pendugaan berdasarkan Persamaan 5 pada tanah UNIB-2

## KESIMPULAN

Kadar air tanah dapat ditetapkan secara insitu di lapangan melalui pengukuran nilai impedensi listrik tanah. Nilai kadar air volumetri ( $\Theta_v$ ) untuk jenis tanah yang diteliti dapat dihitung berdasarkan persamaan  $\Theta_v = (1/P_b) 0.24 Z^{-0.61}$  ( $R^2 = 0.964$ ) dimana  $Z$  adalah impedensi listrik dan  $P_b$  adalah berat volume tanah. Pengukuran nilai impedensi listrik dapat dengan mudah dilakukan secara langsung di lapangan sehingga metode ini sangat cocok diterapkan untuk memonitor ketersediaan air tanah bagi tanaman secara periodik. Namun konstanta  $a = 0.24$  perlu dimodifikasi apabila akan digunakan untuk menduga kadar air pada jenis tanah yang memiliki karakteristik berbeda seperti tekstur, bahan organik, kation dan daya hantar listrik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bregas Budianto, Institut Pertanian Bogor, yang telah membantu perancangan alat pengukur

dielektrik tanah, dan kepada staf Laboratorium Tanah Universitas Bengkulu yang telah membantu persiapan peralatan selama penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahuja, L.R., K.E. Johnsen, and G.C. Heathman, 1995. macropore transport of a surface-applied bromide tracer: model evaluation and refinement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1234-1241.
- Friendman, S. P., 1997. Statistical mixing model for the apparent dielectric constant of unsaturated porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 742-745.
- Gardner, W ., 1986. Water content. *In* A. Klute (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* Second edition. ASA, Inc., SSSA, Inc., Madison, Wisconsin, USA. pp. 493 – 544.
- Hermawan, B. 2000a. Korelasi antara berat volume dan impedensi listrik pada tanah Podsolik: I. Percobaan di Laboratorium. *JIPI.* 2 (5): 60-67.



- Hermawan, B. 2000b. Korelasi antara berat volume dan impedensi listrik pada tanah Podsolik: II. Percobaan di Lapangan. *JIPI*. 2 (5): 68-74.
- Hermawan, B., Z. Bahrum, dan Hasanudin, 2000. Pendugaan nilai kepadatan tanah melalui pengukuran sifat dielektrik: suatu teknik analisis tanah baru berwawasan lingkungan. Laporan Akhir Hibah Bersaing VIII. Lembaga Penelitian Universitas Bengkulu.
- Kachanoski, R.G. Pringle and A. Ward. 1992. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 47-52
- Nadler, A., S. Desberg, and I. Lapid, 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 938-943.
- Or, D., 1995. Stochastic analysis of soil water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1222-1233.
- Snedecor, G.W. and Wig. Cochran. 1982. *Statistical Methods*. 7<sup>th</sup> Edition. The Iowa State Univ. Press. 507 hal.