

MONITORING KADAR AIR TANAH MELALUI PENGUKURAN SIFAT DIELEKTRIK PADA LAHAN JAGUNG

MONITORING SOIL WATER CONTENT USING DIELECTRICAL PROPERTIES AT CORN FIELD

Bandi Hermawan

Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu

bhermawan_bkl@yahoo.com

ABSTRACT

This research aims to monitor soil water content in the field through the measurement of the electrical impedance during the early period of corn growth in the dry season. Two levels of tillage and four types of mulch were arranged at a split plot design with three replications. Part of experiment plot was cultivated twice and the other part was not cultivated. Each main plot was then divided into four sub-plots of 3 x 4 m each of which was applied with 100% imperata mulch, 80% imperata and 20% kerinyu mulch, 50% imperata and 50% kerinyu, or 100% kerinyu. Two sets of wire, where the lowest 10 cm part was not isolated, were inserted into 10 and 20 cm soil depth therefore they measured the electrical impedance at the 0-10 and 10-20 cm soil layers. The electrical impedance values were measured using the digital ohm-meter that produce the electrical current at frequency of 1 kHz. Results show that the measured electrical impedance values have a very high sensitivity to the fluctuation of soil water content in the field. When calibrated to the same soil, the values can be transformed into water content values. During the measurement period, the cultivated soil is consistently drier at the 0-10 depth and wetter at the 10-20 depth compared to the uncultivated soil. The combination of 50% imperata and 50% kerinyu mulch maintains higher soil water content during the dry season compared to other combinations. The research suggests that monitoring of soil water content can be conducted directly in the field through the measurement of electrical impedance.

Keywords : soil moisture content, electrical impedance, cultivation, mulch.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memonitor kadar air tanah melalui pengukuran impedansi listrik selama fase awal pertumbuhan tanaman jagung di musim kemarau pada dua taraf pengolahan tanah dan empat jenis mulsa. Sebagian petak percobaan diolah secara konvensional dan sebagian lagi tidak diolah sama sekali. Setiap petak selanjutnya dibagi menjadi empat anak petak berukuran 3 x 4 m yang masing-masing diberi 100% mulsa alang-alang, 80% alang-alang dan 20% kerinyu, 50% alang-alang dan 50% kerinyu, serta 100% kerinyu. Dua pasang kawat tembaga dibungkus karet, bagian bawahnya dikupas sepanjang 10 cm, dimasukkan ke dalam tanah sedalam 10 dan 20 cm sehingga dapat digunakan untuk mengukur impedansi listrik pada lapisan 0-10 dan 10-20 cm. Nilai impedansi listrik diukur secara berkala dengan menggunakan ohm-meter digital yang memancarkan listrik pada frekuensi 1 kHz. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai impedansi listrik yang terukur memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi terhadap fluktuasi kadar air tanah. Setelah dikalibrasi pada tanah yang sama, nilai impedansi listrik tersebut dapat dikonversi menjadi nilai kadar air tanah. Selama periode satu bulan pertama tanaman jagung, tanah yang diolah selalu lebih kering pada lapisan 0-10 cm dan cenderung lebih basah pada lapisan 10-20 cm dibandingkan tanah yang tidak diolah. Kombinasi antara 50% mulsa alang-alang dan 50% mulsa kerinyu mampu mempertahankan kadar air tanah yang lebih tinggi di musim kemarau dibandingkan jenis mulsa yang lain. Hasil penelitian ini menjanjikan metode monitoring kadar air tanah secara langsung di lapangan melalui pengukuran nilai impedansi listrik.

Kata kunci: kadar air tanah, impedansi listrik, pengolahan tanah, mulsa.

PENDAHULUAN

Kadar air tanah dapat ditetapkan 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 langsung secara gravimetri memiliki akurasi yang sangat tinggi namun membutuhkan waktu dan tenaga yang sangat besar. Kebutuhan akan metode yang cepat dalam memonitor fluktuasi kadar air tanah di lapangan menjadi sangat mendesak sebagai jawaban atas tingginya waktu dan tenaga yang dibutuhkan oleh metode gravimetri. Dua metode penetapan kadar air tanah secara tidak langsung yang sudah banyak dikenal adalah melalui pengukuran sebaran neutron dan pengukuran waktu hantaran listrik di dalam tanah (*time domain reflectometry*, TDR). Prinsip kerja kedua metode tersebut adalah mengukur dinamika sebaran neutron atau waktu hantar listrik di dalam tanah akibat adanya sejumlah air (Nadler *et al.*, 1991). Kendala yang dihadapi dalam memanfaatkan neutron probe dan TDR untuk memonitor fluktuasi kadar air tanah adalah harga kedua alat tersebut yang sangat mahal. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian tentang sifat-sifat tanah lain yang dapat diukur sebagai penduga kadar air tanah.

Penelitian yang dilakukan Hermawan *et al.* (2000) menemukan adanya hubungan yang erat antara sifat-sifat dielektrik tanah seperti konduktivitas, kapasitansi dan impedensi listrik pada suatu media berpori dengan kadar air. Kontribusi air tanah terhadap keragaman nilai impedensi listrik, misalnya, jauh lebih besar dibandingkan kontribusi dari kepadatan tanah yang sebenarnya menjadi aspek utama dalam penelitian tersebut. Air tanah cenderung meningkatkan sebaliknya udara di dalam pori cenderung menghambat laju konduktivitas listrik di dalam tanah sehingga nilai impedensi listrik meningkat dengan semakin rendahnya kadar air tanah (Kittel, 1991). Fenomena tersebut sejalan dengan teori hubungan dielektrik dan air tanah yang dikembangkan Friendman (1997). Peranan

dielektrik sebagai penduga kadar air tanah telah diteliti lebih lanjut di laboratorium oleh Hermawan (2004) yang mengkombinasikan hubungan antara impedensi listrik dengan kadar air dan kepadatan tanah.

Penelitian ini merupakan implementasi di lapangan dari model yang dibangun Hermawan (2004). Dalam hal ini, model tersebut digunakan untuk memonitor fluktuasi kadar air tanah pada lahan jagung melalui pengukuran nilai impedensi listrik tanah. Luaran dari penelitian ini adalah teknik penetapan kadar air tanah di lapangan secara cepat dan akurat melalui pengukuran nilai impedensi listrik tanah.

METODE PENELITIAN

Kalibrasi alat pengukur kadar air tanah

Kalibrasi alat diperlukan karena kemampuan tanah menyerap air dipengaruhi oleh fisik dan kimia tanah yang diteliti (Ahuja *et al.*, 1995). Tanah yang digunakan untuk percobaan di lapangan diambil pada kedalaman tanah 0-20 cm, dikeringanginkan dan diayak dengan ayakan bermata saring 2.0 mm, lalu kadar airnya ditetapkan secara gravimetri (Θ_{ga} , satuan kg kg^{-1}). Tanah kering angin tersebut dimasukkan kedalam kontainer dan ditimbang (W_a), disiram dengan air hingga jenuh dan dibiarkan 24 jam sampai semua pori terisi oleh air. Pada kondisi jenuh, tanah di dalam kontainer ditimbang kembali (W_1), lalu kadar air gravimetri pada kondisi tanah jenuh, Θ_{g1} , dihitung sebesar: $\Theta_{g1} = (W_1 - W_t) / W_t$ (1) adapun W_t adalah berat tanah dalam kontainer setara kering oven yang dihitung dengan persamaan: $W_t = W_a / (1 + \Theta_{ga})$ (2). Nilai impedensi listrik tanah jenuh (Z_1) diukur menggunakan ohm-meter digital yang dihubungkan dengan rangkaian elektronik yang mengeluarkan arus listrik pada signal frekuensi 1 kHz. Frekuensi 1 kHz digunakan karena menghasilkan hubungan antara Z dan kadar air yang lebih erat dibandingkan frekuensi di atas atau di bawahnya (Hermawan, 2001a ; Hermawan, 2001b).

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, Θ_{g2} , dihitung dengan: $\Theta_{g2} = (W_2 - W_1) / W_1$ (3). Nilai impedensi listrik selama satu hari evaporasi (Z_2) diukur dengan alat yang sama. Proses pengeringan dan pengukuran nilai Θ_g dan Z diatas diulangi setiap hari sehingga diperoleh kadar air yang mendekati kondisi titik layu permanen.

Hubungan antara Z dan Θ_g ditetapkan dengan menggunakan persamaan regresi non-linear berikut (Hermawan, 2004) : $\Theta_g = aZ^b$ (4) adapun a dan b adalah konstanta. Untuk tanah yang digunakan dalam penelitian ini, kalibrasi menghasilkan nilai $a = 0.59$ dan $b = -0.43$ ($R^2 = 0.99$) pada lapisan 0-10 cm serta $a = 1.01$ dan $b = -0.65$ ($R^2 = 0.89$) pada lapisan 10-20 cm. Persamaan 4 selanjutnya digunakan untuk mengkonversi nilai impedensi Z yang dibaca di lapangan menjadi nilai kadar air tanah.

Pelaksanaan percobaan lapangan

Percobaan dilaksanakan di lahan kampus Universitas Bengkulu selama fase awal pertumbuhan jagung pada bulan Juli s/d Agustus 2004. Rancangan yang digunakan adalah rancangan petak terbagi dengan tiga ulangan, adapun pengolahan tanah sebagai petak utama dan mulsa sebagai anak petak. Lahan dibersihkan dari gulma, sebagian tidak diolah sama sekali (t_0) dan sebagian lagi diolah secara konvensional dengan cangkul dua kali (t_1). Setiap petak pengolahan tersebut dibagi lagi menjadi empat anak petak berukuran 3 m x 4 m, masing-masing diberi perlakuan 5 ton ha^{-1} alang-alang (m_1), 4 ton ha^{-1} alang-alang + 1 ton ha^{-1} kerinyu (m_2), 2.5 ton ha^{-1} alang-alang + 2.5 ton ha^{-1} kerinyu (m_3), dan 5 ton ha^{-1} kerinyu (m_4). Mulsa alang-alang mewakili jenis tanaman yang memiliki nilai C/N tinggi, sedangkan mulsa kerinyu mewakili C/N rendah. Setelah turun hujan lebat, 2 benih jagung ditanam per lubang dengan jarak 25 cm x 75 cm dan tanaman tidak pernah disiram selama pengamatan

berlangsung. Setelah tumbuh dilakukan penjarangan sehingga hanya satu tanaman per lubang yang dibiarkan tumbuh. Untuk menjaga penampilan tanaman maka diberi pupuk dasar berupa 200 kg urea ha^{-1} , 100 kg SP-36 ha^{-1} dan 100 kg KCl ha^{-1} .

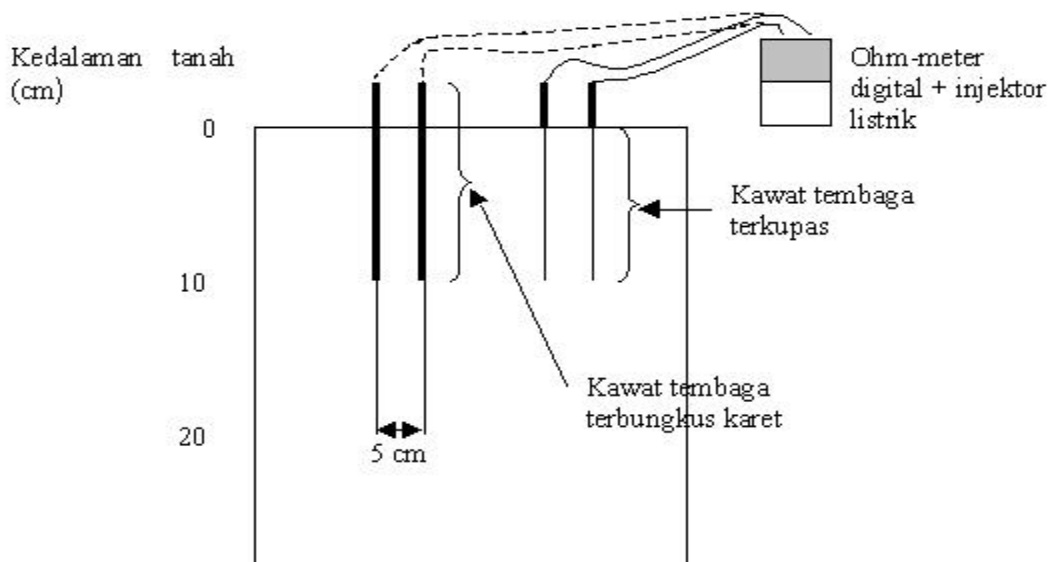
Dua pasang kawat tembaga dibungkus karet, bagian bawahnya dikupas sepanjang 10 cm, dimasukkan ke dalam tanah sedalam 10 dan 20 cm sehingga dapat digunakan untuk mengukur impedensi listrik pada lapisan 0-10 dan 10-20 cm (Gambar 1). Kawat tersebut dipasang pada lajur tanaman, impedensi listrik diukur secara berkala dengan menghubungkan ujung atas kawat ke ohm-meter digital.

Ketika dihidupkan, alat ini memancarkan arus listrik pada frekuensi 1 kHz melalui kedua batang kawat. Setelah mencapai bagian yang terkupas, arus tersebut bergerak melewati tanah yang terletak di antara kedua ujung kawat terkelupas (sensor) dan impedensinya tercatat secara langsung oleh ohm-meter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai impedensi listrik

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai impedensi listrik yang terukur memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi terhadap fluktuasi kadar air tanah. Nilai impedensi listrik tanah berfluktuasi cukup nyata setiap hari pengukuran yang menunjukkan adanya respon yang sensitif terhadap perubahan kadar air tanah akibat hujan atau penguapan (Tabel 1). Selama 32 hari monitoring, rerata impedensi listrik secara konsisten lebih tinggi pada lapisan 0-10 cm daripada impedensi listrik pada lapisan 10-20 cm, baik pada lahan yang diberi perlakuan pengolahan tanah maupun mulsa. Nilai rerata impedensi listrik tertinggi ($>5.8 \text{ k}\Omega$) diperoleh pada lapisan 0-10 cm untuk lahan yang diolah dan diberi 5 ton ha^{-1} mulsa kerinyu. Sebaliknya, nilai impedensi listrik tanah yang terendah ($<3.3 \text{ k}\Omega$) diperoleh pada lapisan 10-20 cm yang diolah dan diberi 5 ton ha^{-1} mulsa kerinyu.



Gambar 1. Sketsa pemasangan alat pengukur impedensi listrik pada kedalaman 0-10 dan 10-20 cm di lapangan.

Konsistensi data impedensi selama 32 hari pengukuran menunjukkan bahwa penggunaan kawat tembaga sebagai sensor dielektrik cukup mampu bertahan di dalam tanah. Bahan sensor yang digunakan dalam penelitian tidak terlihat mengalami korosi sehingga dapat digunakan untuk pengukuran kadar air selama masa pertumbuhan tanaman semusim. Namun untuk jangka waktu monitoring kadar air tanah yang lebih lama, disarankan untuk menggunakan bahan sensor yang lebih baik seperti yang terbuat dari stenles atau perak. Di samping lebih mampu bertahan terhadap proses korosi di dalam tanah, kedua jenis bahan tersebut memiliki sensitivitas yang lebih tinggi daripada tembaga.

Pengaruh pengolahan terhadap fluktuasi kadar air tanah

Nilai impedensi listrik pada Tabel 1 dikonversi menjadi nilai kadar air tanah dengan menggunakan Persamaan 4. Hasil monitoring selama 32 hari pertama pertumbuhan jagung menunjukkan bahwa tanah yang tidak diolah selalu memiliki kadar tanah yang lebih tinggi pada lapisan 0-10 cm daripada tanah yang diolah

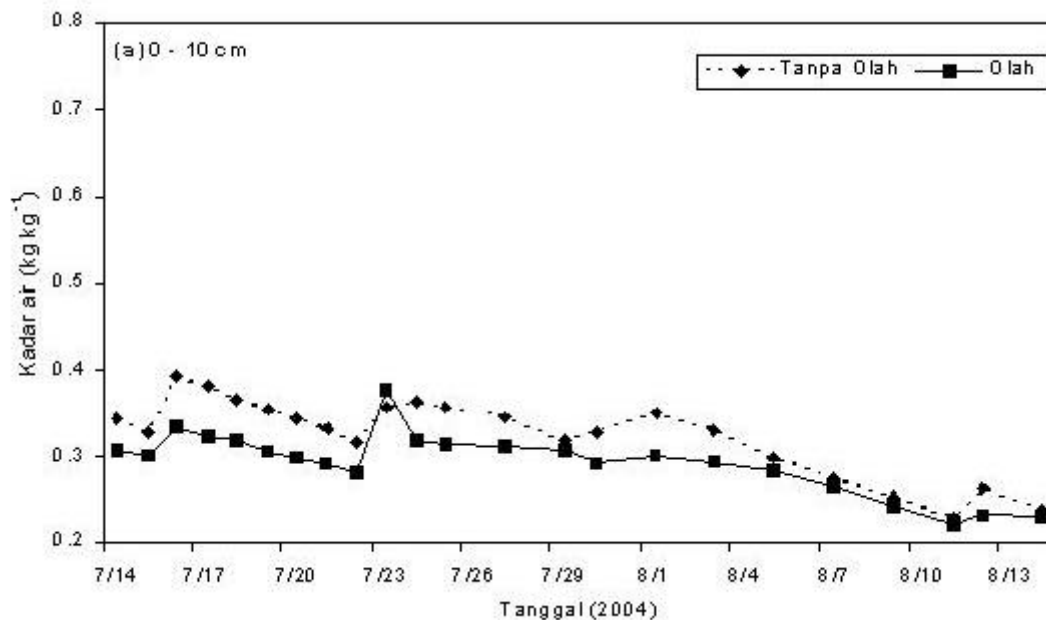
(Gambar 2a). Hal ini kemungkinan disebabkan pengolahan tanah telah membuka pori-pori tanah di lapisan atas sehingga meningkatkan laju kehilangan air tanah melalui proses drainase dan evaporasi tanah. Namun, perbedaan kadar air tanah antara kedua jenis pengolahan tersebut tidak nyata sesaat setelah terjadi hujan lebat (seperti pada tanggal 24 Juli 2004) atau setelah tidak turun hujan selama enam hari berturut-turut (yaitu terjadi pada pengamatan tanggal 7, 9 dan 11 Agustus 2004). Dengan demikian, pengaruh pengolahan tanah terhadap kadar air tanah pada lapisan 0-10 cm terjadi selama periode dua sampai enam hari setelah kejadian hujan yang lebat.

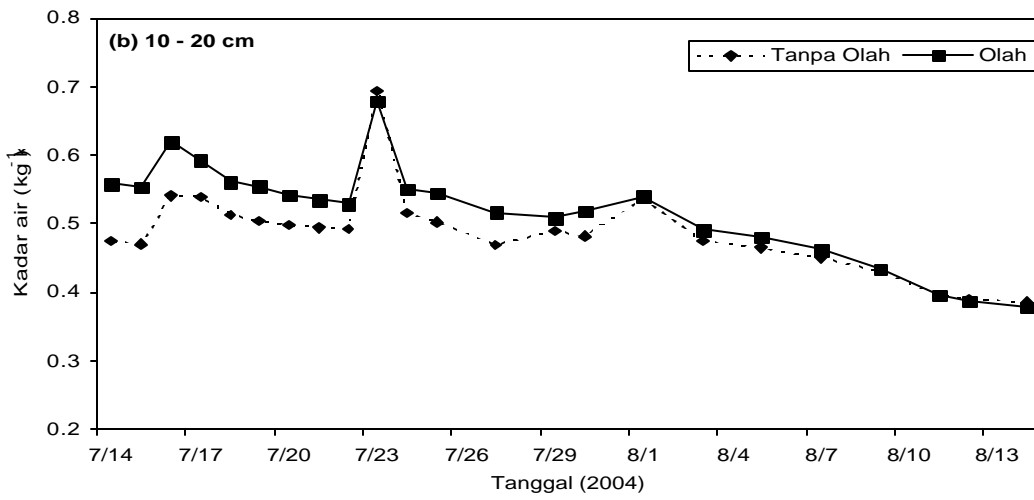
Pada lapisan 10-20 cm, tanah yang diolah justru memiliki kadar air yang lebih tinggi daripada tanah yang tidak diolah. Pada tanah yang diolah, tingginya laju infiltrasi pada lapisan 0-10 cm seperti dijelaskan di atas menyebabkan air bergerak menuju lapisan 10-20 cm dan terakumulasi pada lapisan tersebut. Namun, seperti pada lapisan di atasnya, perbedaan tersebut tidak nyata pada saat terjadi hujan lebat atau ketika tanah mengalami proses pengeringan akibat tidak terjadinya hujan yang lebat.

Tabel 1. Nilai rerata impedensi listrik, Z ($k\bar{U}$), untuk dua tingkat pengolahan dan empat macam mulsa pada kedalaman 0-10 dan 10-20 cm selama satu bulan pertama pertumbuhan jagung

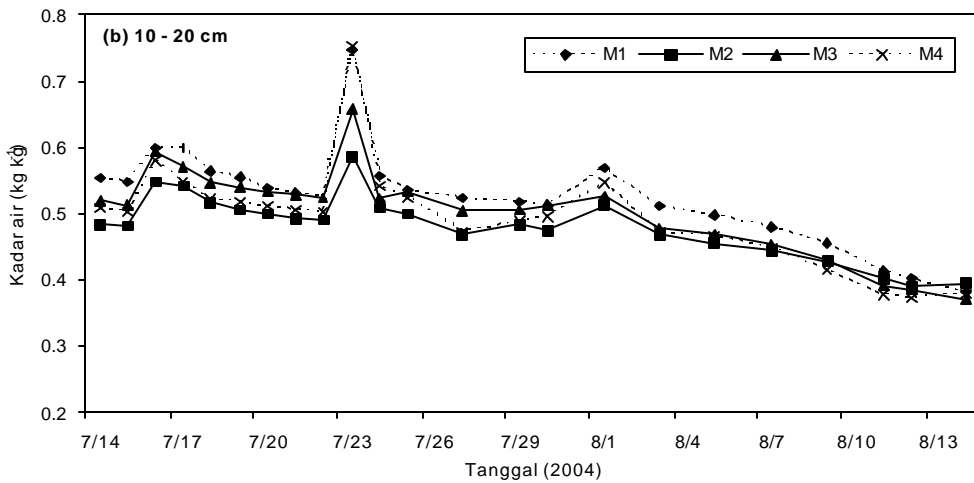
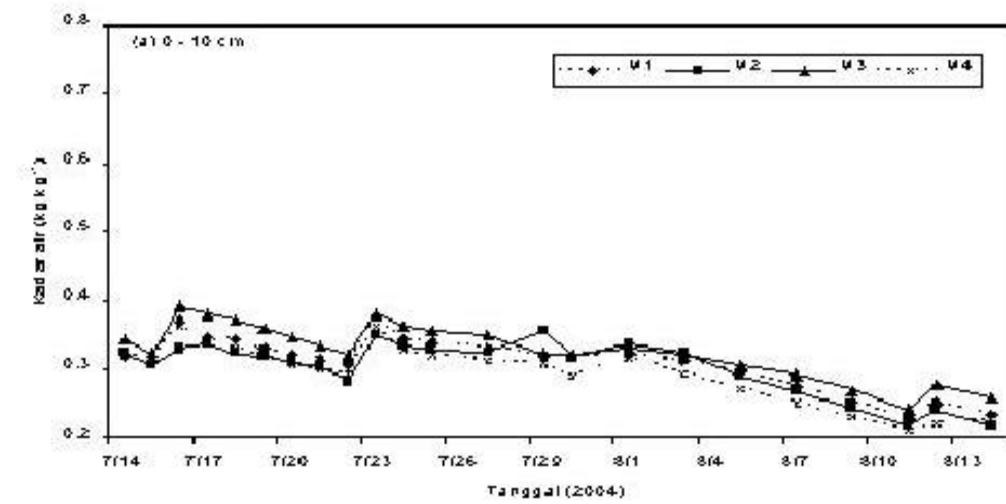
Hari ke	Tanpa Olah		Diolah		m_1		m_2		m_3		m_4	
	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
1	3.68	3.72	4.57	2.69	4.22	3.25	4.20	3.39	3.73	3.08	4.34	3.10
2	4.03	3.77	4.98	2.71	4.40	3.32	4.87	3.43	4.37	3.09	4.36	3.14
3	2.80	3.03	3.97	2.33	3.16	2.85	4.19	2.72	3.03	2.46	3.16	2.50
4	2.98	2.93	4.98	2.38	3.60	2.72	4.01	2.69	3.28	2.57	3.61	2.64
5	3.27	3.18	4.36	2.57	3.70	3.02	4.26	2.88	3.40	2.75	3.91	2.85
6	3.50	3.25	4.78	2.61	4.17	3.03	4.44	3.00	3.60	2.80	4.34	2.89
7	3.78	3.31	5.07	2.69	4.41	3.14	4.73	3.06	3.87	2.84	4.70	2.94
8	4.06	3.34	5.36	2.74	4.69	3.19	4.95	3.11	4.18	2.88	5.01	2.97
9	4.56	3.36	5.77	2.79	5.05	3.24	5.64	3.14	4.63	2.92	5.33	3.01
10	3.44	1.90	3.05	1.96	3.04	1.67	3.74	2.42	2.98	2.05	3.23	1.60
11	3.31	3.16	4.32	2.65	3.78	2.96	3.92	3.08	3.41	2.90	4.16	2.69
12	3.46	3.31	4.50	2.71	3.90	3.25	4.08	3.16	3.56	2.81	4.36	2.82
14	3.75	3.73	4.57	3.00	4.08	3.30	4.25	3.54	3.68	3.18	4.64	3.42
16	3.58	3.45	4.78	3.10	4.30	3.43	3.98	3.28	4.19	3.19	4.92	3.21
17	4.24	3.50	5.26	2.92	4.46	3.40	4.58	3.39	4.48	2.98	5.47	3.06
19	3.75	2.95	4.87	2.83	4.40	2.83	4.38	3.01	4.03	3.05	4.44	2.68
21	4.28	3.58	5.18	3.27	4.60	3.39	4.68	3.44	4.40	3.55	5.25	3.32
23	5.19	3.68	5.84	3.36	5.24	3.51	5.73	3.58	4.88	3.60	6.21	3.38
25	6.37	3.84	6.94	3.56	6.23	3.69	6.93	3.74	5.51	3.81	7.95	3.55
27	7.89	4.05	8.85	3.93	7.87	3.90	8.74	3.93	6.55	4.19	10.32	3.94
29	9.89	4.53	11.29	4.60	10.26	4.39	11.17	4.34	8.49	4.97	12.43	4.56
30	7.47	4.60	9.88	4.81	8.17	4.49	9.04	4.53	5.90	5.14	11.58	4.67
32	9.30	4.65	10.65	5.29	10.57	4.76	11.21	4.58	7.17	5.98	10.95	4.58
Rerata	4.72	3.51	5.82	3.11	5.14	3.34	5.55	3.37	4.49	3.34	5.86	3.20

m_1 = alang-alang 5 ton ha⁻¹; m_2 = alang-alang 4 ton ha⁻¹ + kerinyu 1 ton ha⁻¹; m_3 = alang-alang 2.5 ton ha⁻¹ + kerinyu 2.5 ton ha⁻¹; m_4 = kerinyu 5 ton ha⁻¹.





Gambar 2. Fluktuasi nilai kadar air tanah pada lahan yang diolah dan tidak diolah. Kenaikan kurva menunjukkan adanya kejadian hujan sebelum dilakukan pengukuran.



Gambar 3. Fluktuasi nilai kadar air tanah pada lahan yang diolah dan tidak diolah

Pengaruh mulsa terhadap fluktuasi kadar air tanah

Kombinasi perlakuan antara 2.5 ton ha⁻¹ mulsa alang-alang dan 2.5 ton ha⁻¹ mulsa-kerinyu mampu mempertahankan kelembaban tanah pada lapisan 0-10 cm selama periode pengeringan (Gambar 2a). Perlakuan mulsa tersebut menghasilkan kadar air tanah tertinggi ketika terjadi proses pengeringan seperti terlihat pada periode 17 sampai 23 Juli, 1 sampai 9 Agustus, dan 12 sampai 14 Agustus. Kadar air tertinggi berikutnya cenderung diperoleh melalui pemberian mulsa alang-alang tanpa dicampur kerinyu. Pada lapisan 10-20 cm, kadar air tertinggi secara konsisten dihasilkan melalui pemberian mulsa alang-alang tanpa dicampur kerinyu, sedangkan campuran alang-alang dan kerinyu dengan perbandingan 1:1 cenderung menempati urutan kedua (Gambar 2b).

Berdasarkan fenomena di atas, pemanfaatan campuran alang-alang dan kerinyu dengan perbandingan 1:1 sebagai mulsa dapat mempertahankan ketersediaan air tanah selama fase awal pertumbuhan tanaman di musim kemarau. Efektivitas kombinasi ini dalam menjaga kelembaban tanah pada lapisan 0-10 cm sangat penting bagi tanaman muda yang perakarannya masih berada pada lapisan tersebut. Meskipun keberadaan kerinyu hanya terlihat efektif pada bulan pertama pertumbuhan tanaman karena jenis mulsa ini sangat cepat terdekomposisi, akar tanaman sudah berkembang sehingga telah mampu memanfaatkan air yang tersedia pada lapisan 10-20 cm mulai bulan kedua setelah tanam. Hasil penelitian ini dapat diterapkan untuk memonitor pergerakan air hujan atau air irigasi (Or, 1995).

KESIMPULAN

Impedensi listrik di dalam tanah sangat sensitif terhadap perubahan kadar air tanah selama fase awal pertumbuhan tanaman jagung. Nilai impedensi listrik (Z) dikonversi menjadi kadar air tanah (Θ_g) dengan persamaan $\Theta_g = 0.59 Z^{-0.43}$ pada

lapisan 0-10 cm dan $\Theta_g = 1.01 Z^{-0.65}$ pada lapisan 10-20 cm. Hasil pengamatan selama 32 hari pertama pertumbuhan jagung menunjukkan bahwa pengolahan tanah menyebabkan lapisan tanah 0-10 cm lebih kering dan lapisan tanah 10-20 cm lebih basah dibandingkan tanpa pengolahan. Pemberian mulsa sebanyak 2.5 ton ha⁻¹ alang-alang yang dikombinasi dengan 2.5 ton ha⁻¹ kerinyu sangat efektif dalam mempertahankan ketersediaan air tanah terutama pada lapisan 0-10 cm.

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., 2001a. Korelasi antara berat volume dan impedensi listrik tanah: I. Percobaan Laboratorium. *JIPI.3(1)* : 1–8.
- Hermawan, B., 2001b. Korelasi antara berat volume dan impedensi listrik tanah: II. Percobaan Lapangan. *JIPI.3(1)* : 9–15.
- Hermawan, B., 2004. Penetapan kadar air tanah melalui pengukuran sifat dielektrik pada berbagai tingkat kepadatan. *JIPI. 6(2)* : 66 – 74.
- Hermawan, B., Z. Bahrum, dan Hasanudin, 2000. Pendugaan nilai kepadatan tanah melalui pengukuran sifat dielektrik: suatu teknik analisis tanah baru berwawasan lingkungan. Laporan Penelitian Hibah Bersaing VIII. Lembaga Penelitian Universitas Bengkulu.
- Kittel, C., 1991. *Introduction to Solid State Physics.* John Wiley & Sons, Singapore.

Nadler, A., S. Dasberg, dan 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.