

Jurnal

ISSN 1410-7244

13/Akred-LIPI/P2MBI/9/2006

TANAH DAN IKLIM

Indonesian Soil and Climate Journal

Nomor 28, Desember 2008

Susunan Mineral dan Sifat Fisiko-Kimia Tanah Bervegetasi Hutan dari Batuan Sedimen Masam di Provinsi Riau

N. Suharta dan B.H. Prasetyo

Pergerakan Air pada Tanah dengan Karakteristik Pori Berbeda dan Pengaruhnya pada Ketersediaan Air bagi Tanaman

Enni D. Wahjunie, O. Haridjaja, Soedodo H., dan Sudarsono ✓

Dampak Tsunami Terhadap Sifat-Sifat Tanah Pertanian di NAD dan Strategi Rehabilitasinya

Achmad Rachman, Deddy Erfandi, dan M. Nasil Ali

Mobilitas Sedimen dan Hara pada Sistem Sawah Berteras Dengan Irigasi Tradisional

Sukristiyonubowo

Korelasi Beberapa Sifat Kimia Tanah dengan Serapan Fosfor Padi Sawah pada Tanah Kaolinitik dan Smektitik

M. Masjur dan A. Kasno

Pengaruh Asam Oksalat, Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap Ketersediaan K Tanah, Serapan N, P, dan K Tanaman, serta Produksi Jagung pada Tanah-tanah yang Didominasi Smektit

D. Nursyamsi, K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan

Indikator Iklim Global dan Pengaruhnya Terhadap Kejadian Iklim Ekstrem di Indonesia

E. Surmaini dan E. Susanti



Departemen Pertanian

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

BALAI BESAR PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN SUMBERDAYA LAHAN PERTANIAN

Jurnal

Tanah dan Iklim

Indonesian Soil and Climate Journal

Nomor 28, Desember 2008

ISSN 1410-7244

Dari Redaksi

Terakreditasi berdasarkan Keputusan
Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan
Indonesia No. 1417/D/2006

Ketua pengarah :

Kepala Balai Besar Penelitian dan
Pengembangan Sumberdaya Lahan
Pertanian

Ketua penyunting :

Le Istiqlal Amien

Anggota penyunting :

Abdurachman Adimihardja
Diah Setyorini
D. Subardja
Kasdi Subagyo
Kusumo Nugroho
Santun R.P. Sitorus
Sudarsono

Penyunting pelaksana :

Karmini Gandasmita
Rizatus Shofiyati
Yiyi Sulaeman
Widhiya Adhy

Mitra bestari :

Supiandi Sabiham
A.M. Fagi
Suyamto Hardjosuwirjo

Penerbit :

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan
Sumberdaya Lahan Pertanian

Alamat redaksi :

Jl. Ir. H. Juanda No. 98 Bogor 16123
Telp. (0251) 323012
Fax (0251) 311256
e-mail : csar@indosat.net.id
www.soil-climate.or.id

Frekuensi terbit :

Setahun dua kali

Jurnal Tanah dan Iklim Edisi No. 28 tahun 2008 mengetengahkan 7 judul tulisan yang ditulis oleh peneliti dari bidang tanah dan iklim dari lembaga penelitian dan perguruan tinggi. Dalam edisi ini, topik-topik yang diketengahkan yaitu mengenai: Susunan Mineral dan Sifat Fisiko-Kimia Tanah Bervegetasi Hutan dari Batuan Sedimen Masam di Provinsi Riau; Pergerakan Air pada Tanah dengan Karakteristik Pori Berbeda dan Pengaruhnya pada Ketersediaan Air bagi Tanaman; Dampak Tsunami Terhadap Sifat-Sifat Tanah Pertanian di NAD dan Strategi Rehabilitasinya; Mobilitas Sedimen dan Hara pada Sistem Sawah Berteras Dengan Irigasi Tradisional; Korelasi Beberapa Sifat Kimia Tanah dengan Serapan Fosfor Padi Sawah pada Tanah Kaolinitik dan Smektitik; Pengaruh Asam Oksalat, Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap Ketersediaan K Tanah, Serapan N, P, dan K Tanaman, serta Produksi Jagung pada Tanah-tanah yang Didominasi Smektit; dan Indikator Iklim Global dan Pengaruhnya Terhadap Kejadian Iklim Ekstrem di Indonesia.

Untuk memperkaya khasanah keilmuan di bidang tanah dan iklim, Redaksi mengharapkan partisipasi para pembaca untuk memberikan kontribusi dengan mengirimkan tulisan, komentar, dan saran ke Jurnal Tanah dan Iklim. Sejak tahun 2007, Jurnal Tanah dan Iklim terbit dua kali setahun, dalam bulan Juli dan Desember. Redaksi juga mengajak pembaca sekalian untuk turut menyebarkan hasil penelitiannya melalui jurnal ini sebagai media komunikasi ilmiah dalam bidang ilmu tanah dan agroklimat. Semoga informasi yang kami sajikan pada jurnal ini dapat bermanfaat bagi peningkatan pemahaman kita tentang sumberdaya tanah dan iklim sehingga dapat dipergunakan dengan baik.

Bogor, Desember 2008

Redaksi

Pergerakan Air pada Tanah dengan Karakteristik Pori Berbeda dan Pengaruhnya pada Ketersediaan Air bagi Tanaman

Water Movement in the Soil with Different Pore Characteristics and Its Effect to Crop Water Availability

ENNI D. WAHJUNIE¹, O. HARIDJAJA¹, SOEDODO H.², DAN SUDARSONO³

ABSTRAK

Pengetahuan tentang pergerakan air dalam tanah sangat penting perannya dalam ketersediaan air bagi tanaman. Ketersediaan air bagi tanaman di lahan kering sampai saat ini masih menjadi masalah. Hujan yang merupakan sumber air utama pada lahan kering, datangnya tidak selalu sinkron dengan kebutuhan air tanaman. Untuk mengoptimalkan ketersediaan air bagi tanaman di lahan kering tersebut, diperlukan penelitian tentang hubungan antara pergerakan air dalam tanah dengan sifat-sifat hujan maupun sifat-sifat pori yang mengikat dan menghantarkan air. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pergerakan air pada tanah yang memiliki karakter pori berbeda akibat perbedaan pengelolaan tanah. Penelitian dilakukan pada tiga blok lahan dengan jenis tanah Inceptisols yang telah dikelola dengan akhir periode ditanami kangkung, padi sawah, dan kacang tanah. Penelitian dilakukan di Desa Bojong, Kecamatan Kemang, Kabupaten Bogor pada tahun 2006. Pengamatan dilakukan terhadap kadar air tanah, hujan, dan iklim setiap hari, yang digunakan untuk mengkaji fluks aliran air, laju pergerakan air *transient*, dan distribusi air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluks aliran air dan laju pergerakan air *transient* nyata dipengaruhi oleh jumlah hujan secara kuadrat. Fluks aliran air dalam tanah di lahan bekas kacang tanah lebih besar daripada di lahan bekas kangkung dan sawah, sedangkan pergerakan air *transient* di lahan bekas sawah lebih besar daripada di lahan bekas kangkung dan kacang tanah. Kadar air tanah selama musim tanam di lahan bekas sawah nyata lebih besar dibandingkan dengan lahan yang lain. Jumlah air hujan yang dapat diretensi tanah di lahan bekas kacang tanah lebih tinggi dibanding di lahan yang lain. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan air irigasi bagi tanaman.

Kata kunci : Pergerakan air, Karakteristik pori tanah, Fluks aliran air, Pergerakan air *transient*, Ketersediaan air

ABSTRACT

The understanding of water movement in the soils plays an important role for crop water availability. Up to now, crop water availability in dryland still has a problem. Rainfall is the main source of crop water availability in dryland, but it is unpredictable to cover crop water requirements. To optimize the crop water availability in dryland, the study of the relationship between water movement, rainfall, and soil pores characteristics in the soils is required. This research was aimed to investigate the water movement in the soils with different soil pores due to the difference of soil management. The study was conducted at three blocks of lands with the soil type of Inceptisols, located at Bojong Village, Kemang Sub District, Bogor District in 2006. The soils investigated were abandoned large frog (*Ipomoea reptans*), paddy, and peanuts that reflected soil management. The data

measurements were focused on water content, rainfall, climate data, water flux, transient water movement, and water distribution. The results showed that the water fluxes and the transient water movements were significantly affected by the amount of rainfall. The water fluxes in the abandoned peanuts were significantly higher than those at the other lands, while the transient water movements at abandoned paddy field were significantly higher than those at the land with large frog and peanuts. The soil water content during the growing season at the abandoned paddy field was significantly higher compared to the other lands. The amount of rainfall which are held in the soils during the growing season at the abandoned peanuts was significantly high. The result of this research can be use to estimate crop water requirement for irrigation.

Keywords : Water movement, Soil pore characteristics, Water flux, Transient water movement, Water availability

PENDAHULUAN

Pergerakan air dalam tanah di lahan kering sangat penting perannya dalam pergerakan hara (*nutrient transport*) dan dapat digunakan untuk estimasi ketersediaan air dan udara bagi tanaman. Ketersediaan air bagi tanaman di lahan kering sampai saat ini masih menjadi masalah, terutama akhir-akhir ini berkaitan dengan dampak perubahan iklim global yang berpengaruh terhadap siklus hidrologi. Hujan yang merupakan sumber air utama pada lahan kering, datangnya tidak selalu sinkron dengan kebutuhan air bagi tanaman, sehingga produksi tanaman tidak dapat mencapai optimum. Pada saat hujan besar, sebagian besar air dapat hilang melalui aliran permukaan atau terperkolasi ke zone di bawah perakaran, sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Pada hari-hari tanpa hujan tanaman dapat kekurangan air. Penelitian dalam upaya peningkatan ketersediaan air bagi tanaman lahan

1. Pengajar pada Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, IPB, Bogor.
2. Pengajar pada Departemen Keteknikan Pertanian, IPB, Bogor.
3. Guru Besar pada Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB, Bogor.

kering telah banyak dilakukan melalui perbaikan struktur tanah, pengaturan pola tanam, maupun efisiensi irigasi (Subagyo *et al.*, 2004). Namun usaha-usaha tersebut jarang dilakukan oleh petani. Pada umumnya petani mengelola lahannya sesuai jenis tanaman yang diusahakan, dan mengikuti pola tanam yang mudah dan murah.

Untuk memaksimalkan ketersediaan air bagi tanaman diperlukan data tentang jumlah, intensitas, dan distribusi hujan, besarnya peresapan air (infiltrasi), kemampuan maksimum tanah meretensi air, jumlah air yang hilang dari zone perakaran, kebutuhan air tanaman, dan dinamika kelembaban tanah. Sampai saat ini belum ada penelitian tentang kaitan antara sifat-sifat hujan dengan pergerakan air maupun dinamika kadar air dalam tanah. Dinamika kadar air dalam tanah lahan kering sangat ditentukan oleh pergerakan air, maupun laju perubahan kadar air dalam tanah.

Pergerakan air maupun laju perubahan kadar air dalam tanah sangat ditentukan oleh karakteristik pori tanah yang menyusun struktur tanah, seperti distribusi pori, kontinuitas pori, dan tortuositas pori (Hillel, 1980). Akibat berbagai pengelolaan tanah yang telah dilakukan oleh petani, tanah lahan kering memiliki struktur tanah yang sangat bervariasi, sehingga berpengaruh pada karakteristik porinya. Bagarello *et al.* (2004) menyatakan bahwa perbedaan struktur tanah akibat berbagai pengelolaan, dapat mempengaruhi kemampuan tanah meretensi air maupun pergerakan air baik jenuh maupun tak jenuh dalam tanah. Adapun Perfect *et al.* (2002) menyatakan bahwa laju pergerakan air dapat mempengaruhi distribusi air dan kelarutan hara dalam tanah, sehingga hara terdistribusi secara merata pada zone perakaran. Pergerakan dan distribusi air yang ada dalam tanah juga sangat tergantung pada sifat-sifat hujan yang jatuh (Edwards *et al.*, 1992; Toor *et al.*, 2004).

Penelitian tentang hubungan hujan dengan pergerakan air dalam tanah selama ini masih banyak dilakukan pada skala laboratorium. Pergerakan jenuh dapat terjadi pada saat hujan dengan jumlah dan

intensitas tinggi yang menyebabkan seluruh pori terisi air (Sugita *et al.*, 2004). Namun hujan yang terjadi dalam waktu singkat sering hanya melewati pori-pori makro tanah, melalui proses aliran *preferential* (Stenhuis *et al.*, 1996). Begitu hujan berhenti, atau hanya terjadi hujan ringan yang tidak sampai menjenuhi tanah, pergerakan tak jenuh terjadi ke segala arah mengikuti perbedaan potensial air tanah (Hillel, 1980). Pergerakan air ke atas dapat terjadi pada hari-hari tanpa hujan (Hanks and Ashcroft, 1986). Pengaruh hujan terhadap pergerakan dan distribusi air dalam tanah juga sangat tergantung pada karakteristik pori tanah dalam kaitannya dengan kadar air sebelum hujan dan laju infiltrasi tanah (Shipitalo *et al.*, 1990). Bodhinayake *et al.* (2004) menyatakan bahwa pori tanah yang banyak berkaitan dengan pergerakan air secara cepat adalah pori makro dan meso. Hanya pori-pori makro yang kontinu dan saling bersambungan yang berperan dalam pergerakan air secara cepat (Dunn and Phillips, 1992).

Berdasarkan uraian di atas, maka untuk mengatasi kebutuhan air di lahan kering diperlukan informasi tentang keterkaitan antara curah hujan dengan pergerakan air dan dinamikanya pada tanah yang memiliki karakteristik pori berbeda akibat perbedaan pengelolaan tanah. Informasi ini berguna dalam pengelolaan tanah pada lahan kering, terutama dalam kaitannya dengan konservasi air dan ketersediaannya bagi tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji: 1). Pergerakan air pada tanah dengan karakteristik pori berbeda akibat pengelolaan, 2). Karakteristik pori yang paling mempengaruhi pergerakan air dan dinamika kadar air, serta 3). Ketersediaan air pada lahan kering dengan karakteristik pori berbeda akibat pengelolaan tanah.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan di lapangan, Desa Bojong, Kecamatan Kemang, Kabupaten Bogor mulai bulan Februari sampai dengan Juni 2006, pada tanah Inceptisols (Typic Eutrudepts) yang memiliki karakter

pori berbeda akibat perbedaan pengelolaan tanah pada lahan kering (Tabel 1). Karakteristik tanah dari lokasi penelitian ditampilkan pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 1. Pengelolaan lahan yang dilakukan selama lima tahun sebelum percobaan

Table 1. Land management practices for five years before research

Blok	Pengelolaan lahan selama lima tahun sebelum percobaan
1.	Padi gogo, terung, kacang panjang, oyong, cabe, jagung, dua tahun terakhir kangkung darat, pengolahan tanah sedalam cangkul, pemupukan dengan pupuk kandang $\pm 10 \text{ t ha}^{-1}$.
2.	Padi sawah rotasi dengan kacang tanah dan oyong, terakhir padi sawah. Pada musim kering dilakukan pengolahan tanah sedalam cangkul, pemupukan dengan pupuk kandang $\pm 10 \text{ t ha}^{-1}$.
3.	Rotasi kacang tanah, singkong dan oyong, terakhir kacang tanah. Pengolahan tanah sedalam cangkul, pemupukan dengan pupuk kandang $\pm 10 \text{ t ha}^{-1}$.

Percobaan lapangan

Percobaan ini menggunakan rancangan acak kelompok/blok, dimana pada tiap blok dari ke tiga lahan yang memiliki karakter pori tanah berbeda

dibuat 10 petak pertanaman sebagai ulangan, dengan ukuran tiap petak 5 m x 5 m. Pada seluruh petak ditanami jagung manis dengan pemupukan urea, SP 36, dan KCl masing-masing dengan dosis 300 kg, 200 kg, dan 150 kg per hektar. Selama satu musim tanam dilakukan pengamatan terhadap kadar air, hujan dan iklim setiap hari. Pengukuran kadar air tanah dilakukan dengan *soil moisture meter* setiap hari pada tiap jarak kedalaman tanah 10 cm dari permukaan tanah pada tiap petak lahan. Pengukuran kadar air secara gravimetri (berikut untuk kalibrasi) dilakukan dengan cara mengambil contoh tanah secara komposit dari tiap jarak kedalaman tanah 10 cm dari permukaan tanah pada tiap petak lahan setiap satu minggu sekali. Pengambilan contoh tanah tersebut dengan menggunakan bor berdiameter 2 cm. Penakar hujan otomatis dipasang pada lahan percobaan untuk mengamati hujan periodik, harian, dan intensitas hujan periodik, maupun harian. Data iklim dikumpulkan dari stasiun klimatologi Pangkalan TNI-AU Atang Senjaya Bogor. Selanjutnya data yang diperoleh digunakan untuk penetapan fluks aliran air, laju pergerakan air *transient*, dan distribusi air tiap kedalaman tanah.

Tabel 2. Sifat-sifat fisik tanah pada lahan blok 1, 2, dan 3

Table 2. Soil physics characteristics at block 1, 2, and 3

No.	Blok (kedalaman)	BI	RPT	ISA	DMR	RPDSC	RPDC	RPDL	RPD	RPAT	RP mikro	RP air mobil	RP air imobil
	cm	g cm^{-3}	%						% vol				
1.	1 (0-10)	1,02	61,29	42,92	1,93	4,79	14,21	3,76	22,75	13,13	25,42	27,19	34,11
2.	1 (10-20)	1,00	61,94	43,41	1,95	4,91	15,15	3,20	23,27	12,70	25,97	26,63	35,31
3.	1 (20-30)	1,14	58,35	37,42	1,86	4,50	4,46	4,43	13,40	14,48	30,46	20,23	38,12
4.	1 (30-40)	1,16	57,75	37,55	1,90	3,16	2,98	3,38	9,52	16,71	31,52	14,88	42,87
5.	1 (40-50)	1,15	58,05	37,48	1,88	3,41	3,57	4,13	11,11	15,95	31,00	17,58	40,47
	Rataan	1,09	59,48	39,76	1,90	4,15	8,07	3,78	16,01	14,59	43,47	21,30	38,18
1.	2 (0-10)	1,05	61,64	83,10	3,26	7,19	6,40	2,13	15,72	17,39	28,54	23,11	38,53
2.	2 (10-20)	1,02	62,52	85,68	3,27	9,15	7,69	1,81	18,64	16,81	27,07	23,98	38,54
3.	2 (20-30)	0,99	64,86	33,41	1,76	7,90	9,45	2,22	19,57	18,12	27,88	22,58	42,99
4.	2 (30-40)	0,98	65,29	32,42	1,71	5,41	10,35	3,27	19,02	17,37	28,90	21,45	43,84
5.	2 (40-50)	0,97	65,43	32,88	1,73	6,65	9,91	2,74	19,30	17,74	28,39	22,01	43,42
	Rataan	1,00	63,95	53,50	2,35	7,26	8,76	2,43	18,45	17,48	45,50	22,63	41,46
1.	3 (0-10)	0,96	64,76	46,85	2,34	11,38	10,06	2,35	23,80	15,08	25,88	29,23	35,53
2.	3 (10-20)	0,96	64,50	47,78	2,33	10,53	10,80	2,80	24,12	13,34	27,03	29,36	35,13
3.	3 (20-30)	0,96	66,75	39,45	2,12	13,53	7,10	1,58	22,21	19,49	25,04	24,99	41,76
4.	3 (30-40)	0,95	67,29	40,78	2,18	14,47	6,48	1,43	22,38	19,64	25,28	26,67	40,62
5.	3 (40-50)	0,95	67,02	40,12	2,15	14,01	6,83	1,38	22,22	19,62	25,18	25,84	41,18
	Rataan	0,96	66,06	43,00	2,22	12,78	8,25	1,91	22,94	17,44	43,12	27,22	38,84

Keterangan : BI = bobot isi; RPT = ruang pori total; ISA = indeks stabilitas agregat; RPDSC = ruang pori drainase sangat cepat; RPDC = ruang pori drainase cepat; RPDL = ruang pori drainase lambat; RPAT = ruang pori air tersedia; RP = ruang pori

Analisis data

Perhitungan fluks aliran air dilakukan untuk seluruh zone perakaran (kedalaman 50 cm) maupun tiap zone 10 cm kedalaman tanah, dengan pendekatan neraca air (Wagenet, 1986). Pada lahan kering yang relatif datar, neraca air dapat dihitung sebagai berikut:

$$D = P - ET - \Delta S \quad (1)$$

dimana :

D = drainase air pada kedalaman yang diperhitungkan (mm)

P = Hujan (mm)

ET = Evapotranspirasi (mm)

ΔS = Perubahan cadangan air (mm)

Besarnya drainase (D) dari tiap kedalaman tanah yang diperhitungkan tiap hari merupakan fluks aliran air per hari (Wagenet, 1986). Evapotranspirasi dihitung dengan model Penmann, dan perubahan cadangan air merupakan selisih cadangan air dari suatu hari dikurangi dengan cadangan air hari sebelumnya.

Pergerakan air *transient* diperhitungkan dari perbedaan fluks antara dua titik kedalaman tanah

yang diperhitungkan. Menurut Hanks dan Ashcroft (1986), pergerakan air *transient* merupakan perubahan kadar air setiap saat dan dapat menunjukkan perubahan *storage* selama selang waktu yang diperhitungkan.

$$d\theta dt^{-1} = dfluks dx^{-1} \text{ (cm/cm.waktu) } \quad (2)$$

dimana :

$d\theta dt^{-1}$ = Laju pergerakan air *transient*

$dfluks dx^{-1}$ = Perubahan fluks per satuan jarak

Kebutuhan air irigasi ditetapkan berdasarkan defisit kadar air terhadap kadar air minimum tersedia bagi tanaman, yaitu selisih antara kadar air lapangan terhadap kadar air minimum tersedia bagi tanaman dikalikan dengan kedalaman zone perakaran yang diperhitungkan. (Shaxson and Barber, 2003). Kadar air minimum tersedia bagi tanaman merupakan kadar air pada kondisi 50% air tersedia.

Jumlah air hujan yang dapat diretensi tanah pada zona perakaran dapat diperhitungkan dari jumlah hujan dikurangi dengan air yang terdrainase (fluks aliran positif) pada tiap zone kedalaman tanah yang diperhitungkan. Apabila fluks negatif (aliran ke atas) atau nol, maka seluruh jumlah hujan dapat diretensi oleh tanah.

Tabel 3. Konduktivitas hidrolik jenuh, tak jenuh, kapasitas retensi air maksimum, dan titik layu permanen pada lahan blok 1, 2, dan 3

Table 3. Saturated, unsaturated hydraulic conductivity, maximum water retention capacity, permanent wilting point at block 1, 2, and 3

Blok (kedalaman) cm	Konduktivitas hidrolik jenuh	Konduktivitas hidrolik tak jenuh cm jam ⁻¹	Kapasitas retensi air maksimum % vol	Titik layu permanen
1 (0-10)	0,92	11,03 Ln (θ) + 7,46	38,54	25,42
1 (10-20)	0,92	12,32 Ln(θ) + 8,10	38,67	25,97
1 (20-30)	0,92	11,56 Ln(θ) + 8,32	45,46	30,46
1 (30-40)	0,92	12,87 Ln(θ) + 8,86	48,23	31,52
1 (40-50)	0,92	11,57 Ln(θ) + 8,40	47,18	31,00
2 (0-10)	2,38	11,39 Ln (θ) + 7,89	45,92	28,54
2 (10-20)	2,38	11,65 Ln (θ) + 7,84	43,88	27,07
2 (20-30)	2,38	10,93 Ln(θ) + 7,33	46,00	27,88
2 (30-40)	2,38	12,31 Ln(θ) + 7,79	46,27	28,90
2 (40-50)	2,38	12,31 Ln(θ) + 7,79	46,13	28,39
3 (0-10)	1,87	11,96 Ln (θ) + 7,65	40,96	25,88
3 (10-20)	1,87	12,14 Ln(θ) + 7,72	40,38	27,03
3 (20-30)	1,87	10,99 Ln (θ) + 7,23	44,54	25,04
3 (30-40)	1,87	10,99 Ln(θ) + 7,23	44,91	25,28
3 (40-50)	1,87	12,09 Ln (θ) + 7,47	44,80	25,18

Analisis statistik

1. Untuk melihat pengaruh curah hujan terhadap pergerakan air (fluks) dan laju pergerakan air *transient* dilakukan analisis regresi dan korelasi.
2. Untuk melihat sifat-sifat pori yang paling berpengaruh terhadap pergerakan air dan laju pergerakan air *transient* dilakukan analisis regresi berganda.
3. Untuk melihat perbedaan pergerakan air, laju pergerakan air *transient*, dan kadar air antar tiap blok lahan dilakukan uji beda nilai tengah (uji t).

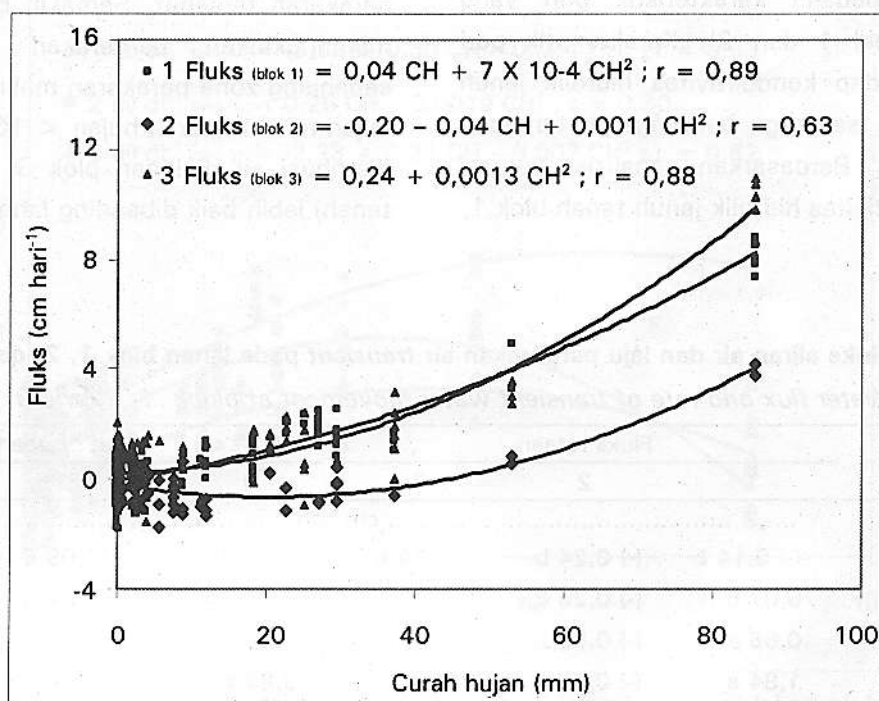
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pergerakan air dalam tanah

Pergerakan air pada zone perakaran sedalam 50 cm, yang ditentukan dalam fluks aliran air, lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1. Fluks aliran air yang melalui zona perakaran pada ketiga blok lahan meningkat secara kuadratik dengan makin besarnya jumlah hujan dengan koefisien korelasi

0,89 pada lahan blok 1; 0,63 pada lahan blok 2; dan 0,88 pada lahan blok 3. Pada jumlah hujan rendah, sebagian besar air membasahi lapisan tanah dan terikat kuat dalam pori mikro tanah. Pada kondisi ini, apabila tanah belum jenuh, terjadi aliran tak jenuh dalam tanah. Hujan-hujan rendah yang terjadi secara berulang dapat menyebabkan aliran air melalui matrik tanah, sehingga membasahi tanah secara berangsur. Pada kejadian hujan besar, kadar air tanah makin tinggi sampai mencapai kapasitas retensi maksimum. Kelebihan air di atas kapasitas retensi maksimum tanah merupakan air yang menyumbangkan pada fluks aliran air pada saat hujan. Semakin besar jumlah hujan, kelebihan air yang keluar dari zona kedalaman tanah tertentu makin besar, sehingga fluks aliran air makin besar. Menurut Sugita *et al.* (2004), hujan besar dapat menyebabkan pergerakan air hanya melalui pori-pori makro tanpa menembus matrik tanah.

Walaupun pola fluks aliran air pada berbagai jumlah hujan antara blok 1, 2, dan 3 sama, tetapi kemiringan kurva maupun jumlah hujan untuk mulai terjadinya fluks aliran air positif (aliran ke bawah)



Gambar 1. Fluks aliran air pada berbagai jumlah hujan di lahan blok 1, 2, dan 3

Figure 1. Fluxes water movement on various amount of rainfall at block 1, 2, and 3

berbeda-beda. Pada hari-hari tanpa hujan, secara rata-rata di lahan blok 1 dan 2 terjadi aliran air ke atas (fluks negatif), sedangkan pada lahan blok 3 terjadi aliran ke bawah (Tabel 4). Hal ini menunjukkan bahwa retensi air yang tinggi pada hujan-hujan sebelumnya di lahan blok 3 dapat menyebabkan terjadinya aliran air gravitasi/drainase pada hari-hari tidak hujan.

Besarnya fluks aliran air pada hujan yang sama berbeda-beda antara ke tiga blok lahan (Tabel 4). Fluks aliran air pada lahan blok 3 (lahan bekas kacang tanah) nyata lebih besar dibanding fluks aliran air di lahan blok 1 dan 2, terutama pada hujan-hujan rendah (curah hujan < 10 mm). Namun pada jumlah hujan yang lebih tinggi (curah hujan > 10 mm), fluks aliran air antara blok 1 dan 3 lahan tidak berbeda nyata, tetapi fluks aliran air kedua blok ini nyata lebih tinggi dibanding lahan blok 2.

Perbedaan fluks aliran air antara tiap blok lahan disebabkan oleh perbedaan pengelolaan tanah dan tanaman pada tiap blok lahan yang telah menyebabkan perbedaan karakteristik pori yang berbeda-beda (Tabel 1 dan 2). Karakteristik pori berpengaruh terhadap konduktivitas hidrolik jenuh maupun tak jenuh, sehingga berpengaruh terhadap fluks aliran air. Berdasarkan analisis regresi berganda, konduktivitas hidrolik jenuh tanah blok 1,

2, dan 3 nyata dipengaruhi oleh ruang pori drainase sangat cepat, ruang pori air imobil, ruang pori air mobil, stabilitas pori, ruang pori drainase cepat, dan ruang pori air tersedia dalam tanah dengan koefisien korelasi sebesar 0,88 ($K_s = -14,36 - 0,09 \text{ RPDSC} + 0,27 \text{ RP air imobil} + 0,25 \text{ RP air mobil} + 0,02 \text{ St. Pori} - 0,06 \text{ RPDC} - 0,01 \text{ RPAT}$; $R = 0,88$). Karakteristik pori secara langsung juga sangat berpengaruh terhadap fluks aliran air. Berdasarkan analisis regresi berganda pengaruh karakteristik pori terhadap fluks aliran air menunjukkan bahwa fluks aliran air sangat dipengaruhi oleh ruang pori drainase cepat, stabilitas pori, ruang pori air mobil, dan ruang pori mikro dengan koefisien korelasi sebesar 0,86 ($\text{Fluks} = -2,93 - 0,06 \text{ RPDC} - 0,01 \text{ St. Pori} + 0,07 \text{ RP air mobil} + 0,08 \text{ RP mikro}$; $R = 0,86$). Di antara ruang pori tersebut, ruang pori air mobil dan ruang pori mikro di lahan blok 3 nyata lebih tinggi dibanding di lahan blok 1 dan 2 (Tabel 2), sehingga meningkatkan fluks aliran air pada lahan blok 3.

Fluks aliran air pada zone perakaran dapat menunjukkan laju distribusi air hujan pada zona perakaran tersebut. Semakin besar fluks aliran air, memungkinkan pergerakan dan distribusi air sepanjang zone perakaran makin lancar. Pada hujan-hujan rendah (curah hujan < 10 mm) memungkinkan distribusi air di lahan blok 3 (lahan bekas kacang tanah) lebih baik dibanding lahan blok 1 dan 2.

Tabel 4. Fluks aliran air dan laju pergerakan air *transient* pada lahan blok 1, 2, dan 3

Table 4. Water flux and rate of transient water movement at block 1, 2, and 3

Curah hujan mm	Fluks rata-rata			d θ dt ⁻¹ rata-rata		
	1	2	3	1	2	3
	cm hari ⁻¹					
0	(-) 0,14 b	(-) 0,24 b	0,19 a	(-) 1,06 y	(-) 0,09 x	(-) 2,31 z
0-10	0,07 b	(-) 0,25 c	0,30 a	0,02 y	1,85 x	(-) 0,97 z
10-20	0,66 a	(-) 0,80 b	1,13 a	2,26 x	3,73 x	0,22 y
20-30	1,84 a	(-) 0,48 c	1,17 b	3,87 x	5,50 x	1,75 y
30-50	2,23 a	0,26 b	2,17 a	5,09 y	8,19 x	1,41 z
> 50	7,33 a	2,33 b	7,47 a	1,28 y	8,37 x	(-) 0,09 y

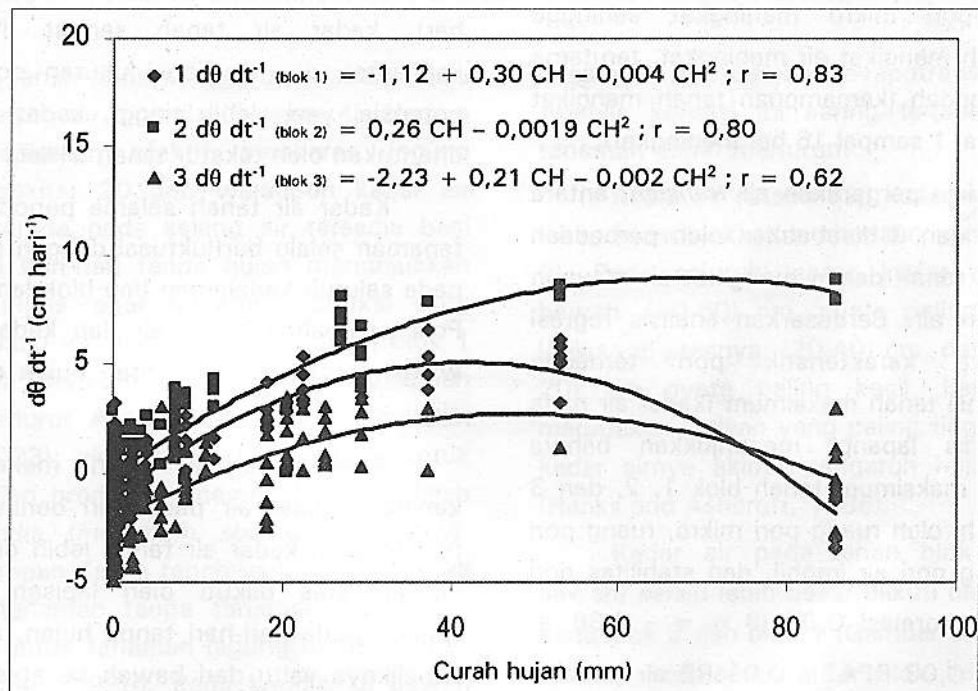
Keterangan : Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada baris yang sama tidak berbeda berdasarkan uji statistik (α 1%).

Pergerakan air *transient* dalam tanah

Pergerakan air *transient* merupakan pergerakan air dalam tanah yang kecepatannya selalu berubah setiap saat. Karena terjadi perubahan kecepatan setiap waktu, maka laju pergerakan air secara *transient* tersebut merupakan perubahan kadar air per satuan waktu (Hanks and Ashcroft, 1986). Pada jarak kedalaman perakaran tertentu, perubahan kadar air per satuan waktu dapat mencerminkan perubahan *storage* setiap saat. Laju pergerakan air *transient* tergantung pada perubahan fluks aliran air dan mencerminkan dinamika kadar air dalam tanah.

Laju pergerakan air *transient* pada lahan blok 1, 2, dan 3 nyata dipengaruhi oleh besarnya hujan (Gambar 2). Laju pergerakan air *transient* pada lahan blok 1, 2, dan 3 meningkat secara kuadratik dengan makin besarnya curah hujan sampai nilai maksimum dan setelah mencapai nilai maksimum menurun kembali, dengan koefisien korelasi masing-masing

0,83; 0,80; dan 0,62. Pada hujan rendah tambahan air hujan meningkatkan potensial air di permukaan tanah, sehingga terjadi perbedaan potensial air yang besar antara permukaan tanah dengan lapisan di bawahnya yang relatif lebih kering. Semakin besar jumlah hujan, perbedaan potensial air tanah antara lapisan tanah atas dengan di bawahnya makin besar yang menyebabkan perbedaan fluks antara kedua lapisan tanah tersebut makin besar, sehingga laju pergerakan air secara *transient* juga makin besar. Dengan hujan yang lebih besar lagi, kadar air lapisan tanah sampai kedalaman tertentu makin besar, sehingga perbedaan potensial air lapisan permukaan dengan di bawahnya makin kecil dan menyebabkan laju pergerakan air *transient* makin rendah (menurun). Apabila tanah telah mencapai kapasitas retensi maksimum, laju penambahan kadar air per satuan waktu mencapai maksimum, dan apabila tanah telah mencapai keadaan jenuh laju penambahan air tidak ada lagi (nol). Laju pergerakan



Gambar 2. Pergerakan air *transient* pada berbagai jumlah hujan di lahan blok 1, 2, dan 3

Figure 2. *Transient water movement on various amount of rainfall at block 1, 2, and 3*

air *transient* pada lahan blok 1 menunjukkan maksimum pada curah hujan paling rendah, diikuti oleh lahan blok 3 dan lahan blok 2 (Gambar 2). Laju pergerakan air *transient* maksimum pada lahan blok 1 tercapai pada curah hujan 37,5 mm, pada lahan blok 2 pada curah hujan 68,4 mm, dan pada lahan blok 3 pada curah hujan 52,5 mm. Keadaan ini membuktikan bahwa kemampuan retensi maksimum tanah di blok 1 (terutama pada kedalaman 0-20) cm paling rendah, sehingga laju pergerakan air *transient* cepat mencapai maksimum.

Pada hujan yang sama mengakibatkan laju pergerakan air *transient* yang berbeda-beda (Tabel 4). Laju perubahan kadar air pada lahan blok 2 nyata lebih tinggi dibanding lahan blok 1 dan 3. Keadaan ini dapat terjadi karena tidak adanya struktur tanah yang baik pada tanah bekas sawah akibat proses pelumpuran, sehingga meningkatkan jumlah pori mikro yang dapat meretensi air. Menurut Sharma dan De Datta (1985) dan Prihar *et al.* (1985), pori-pori makro tanah-tanah yang disawahkan menurun sedangkan pori-pori mikro meningkat sehingga kemampuan tanah mengikat air meningkat, terutama pada potensial rendah (kemampuan tanah mengikat air antara potensial 1 sampai 15 bar meningkat).

Perbedaan laju pergerakan air *transient* antara lahan blok 1, 2, dan 3 disebabkan oleh perbedaan karakteristik pori tanah dalam mengikat air maupun dalam pergerakan air. Berdasarkan analisis regresi berganda antara karakteristik pori terhadap kemampuan retensi tanah maksimum (kadar air pada keadaan kapasitas lapang) menunjukkan bahwa kapasitas retensi maksimum tanah blok 1, 2, dan 3 sangat dipengaruhi oleh ruang pori mikro, ruang pori air tersedia, ruang pori air imobil, dan stabilitas pori dengan koefisien korelasi 0,99 ($\theta_{KL} = -0,38 + 1,04 \text{ RP mikro} - 0,03 \text{ RPAT} - 0,01 \text{ RP air imobil} - 19 \times 10^{-4} \text{ St. Pori}$; $R = 0,99$). Karakteristik pori tanah juga nyata mempengaruhi laju pergerakan air *transient*. Laju pergerakan air *transient* nyata dipengaruhi oleh ruang pori drainase sangat cepat,

ruang pori air imobil, dan ruang pori air mobil dengan koefisien korelasi 0,93 ($d\theta \text{ dt}^{-1} = -1,85 - 0,04 \text{ RPDSC} + 0,04 \text{ RP air imobil} + 0,02 \text{ RP air mobil}$; $R = 0,93$).

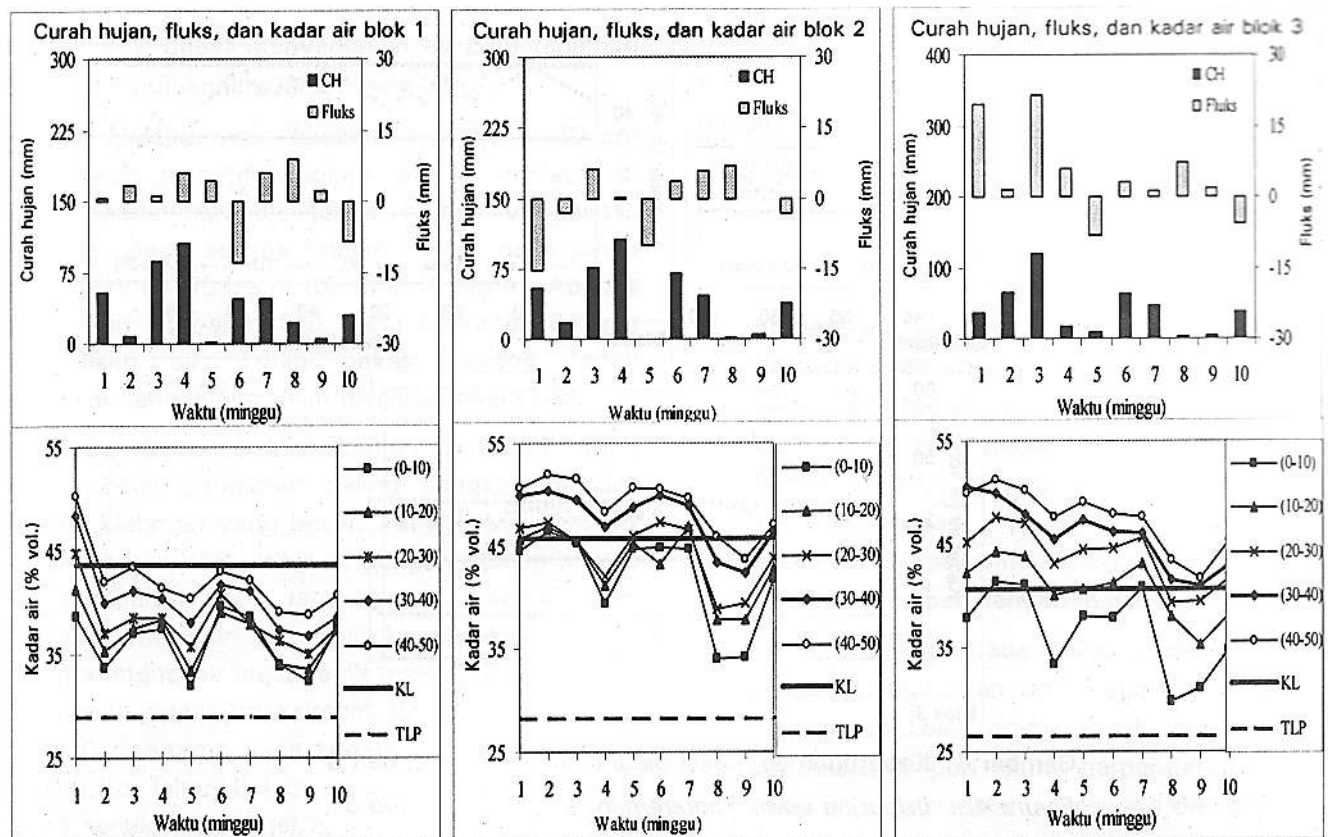
Laju pergerakan air *transient* menunjukkan laju perubahan kadar air tanah, yang pada zona kedalaman tertentu dapat menunjukkan perubahan *storage*. Semakin lambat laju pergerakan air *transient*, tanah makin lambat perubahan kadar airnya, sehingga apabila tanah telah mencapai retensi maksimum akan lebih mengkonservasi air. Hal ini terlihat pada lahan blok 3 (lahan bekas kacang tanah).

Distribusi air dalam tanah

Jumlah, fluktuasi, dan distribusi air yang ada dalam tanah menentukan ketersediannya bagi tanaman selama masa pertumbuhan. Jumlah air yang masuk dan tertinggal dalam tanah ditentukan oleh kemampuan retensi tanah dan pergerakan air dalam tanah. Pada potensial air tanah rendah ($\psi \leq 1$ bar), kadar air tanah sangat ditentukan oleh kapilaritas dan distribusi ukuran pori tanah. Pada potensial yang lebih tinggi, kadar air tanah lebih ditentukan oleh tekstur tanah (Hillel, 1980).

Kadar air tanah selama periode pertumbuhan tanaman selalu berfluktuasi dengan pola yang sama pada seluruh kedalaman tiap blok lahan (Gambar 3). Pola perubahan kadar air tiap kedalaman menurut waktu mengikuti pola curah hujan dan fluks aliran air.

Apabila terjadi hujan maka diikuti oleh kenaikan kadar air pada hari berikutnya, di mana peningkatan kadar air tanah lebih dulu terjadi pada lapisan atas diikuti oleh lapisan di bawahnya. Namun pada hari-hari tanpa hujan, aliran air terjadi sebaliknya yaitu dari bawah ke atas (fluks negatif) melalui pori-pori mikro secara tak jenuh akibat proses evapotranspirasi. Kenaikan kadar air tersebut lebih nyata pada lapisan bawah dibandingkan lapisan atas (Gambar 3).



Gambar 3. Distribusi curah hujan, fluks, dan kadar air tanah pada lahan blok 1, 2, dan 3

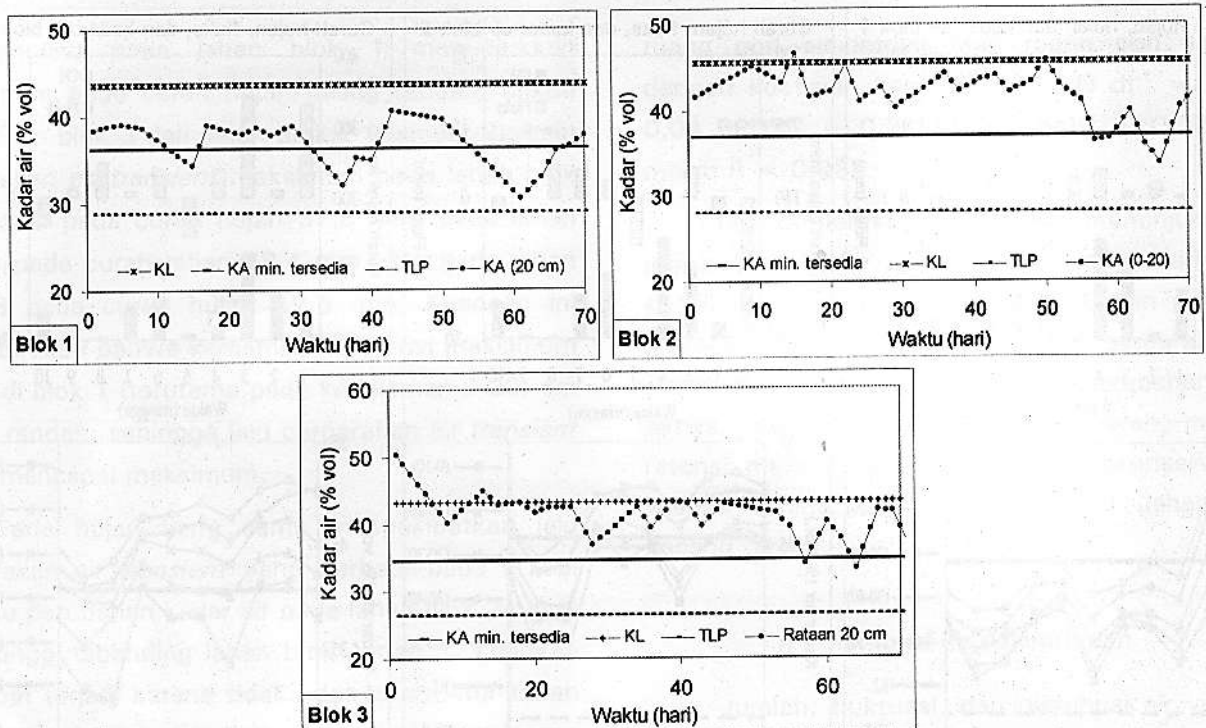
Figure 3. Rainfall distribution, flux, and soil water content at block 1, 2, and 3

Kadar air tanah pada ke tiga blok lahan selalu berada pada selang air tersedia (Gambar 4). Namun mengingat kedalaman efektif perakaran jagung manis hanya sekitar 20 cm, walaupun kadar air tanah masih berada pada selang air tersedia bagi tanaman, pada hari-hari tanpa hujan menunjukkan perlu adanya irigasi agar tercapai produksi yang optimum. Keadaan ini diperlukan pada lahan blok 1 dan sedikit pada lahan blok 2 dan 3 pada kedalaman (0-20) cm. Menurut Allen *et al.* (1998), Shaxson dan Barber (2003); air tersedia yang cukup untuk pertumbuhan dan produksi tanaman jagung adalah 30% air tersedia (*maximum soil water deficit*), jumlah air tersimpan dalam tanah yang dapat segera tersedia bagi tanaman tanpa tanaman mengalami stres), bahkan untuk tanaman jagung manis di atas 50% (Allen *et al.*, 1998). Pada kondisi di bawah *maximum soil water deficit*, tanaman sudah mulai kesulitan dalam menyerap air. Pada keadaan demikian sebagian stomata tanaman menutup, sehingga terjadi evapotranspirasi aktual yang

besarnya di bawah evapotranspirasi potensial. Apabila kondisi ini sering terjadi, maka produksi tanaman dapat menurun.

Kadar air rata-rata tiap kedalaman dari tiga blok lahan menunjukkan perbedaan yang nyata (Gambar 3). Pada seluruh lahan, kadar air tanah lapisan bawah, (40-60) cm, nyata paling besar dibanding lapisan di atasnya, (20-40) cm, dan lapisan atas, (0-20) cm nyata paling kecil. Lapisan permukaan merupakan lapisan yang paling tinggi dalam fluktuasi kadar airnya akibat pengaruh hujan dan evaporasi (Hanks and Ashcroft, 1986).

Kadar air pada lahan blok 2 (lahan bekas sawah) selalu lebih besar diikuti oleh kadar air tanah pada blok 3 dan blok 1 (Gambar 3). Perbedaan kadar air tiap kedalaman antar blok ini disebabkan oleh perbedaan sifat-sifat struktur tanah yang mempengaruhi distribusi pori sehingga berpengaruh pada sifat retensi dan pergerakan air dalam tanah. Seperti telah disebutkan di atas bahwa kemampuan retensi



Gambar 4. Kebutuhan air irigasi pada lahan blok 1, 2, dan 3

Figure 4. Irrigation water requirement at blok 1, 2, and 3

Tabel 5. Jumlah air hujan teretensi dan kebutuhan air irigasi pada lahan blok 1, 2, dan 3

Table 5. Amount of rainfall retained and irrigation water requirement at block 1, 2, and 3

Waktu minggu	Blok 1			Blok 2			Blok 3		
	Σ hujan teretensi mm	% hujan	Defisit air mm	Σ hujan teretensi mm	% hujan	Defisit air mm	Σ hujan teretensi mm	% hujan	Defisit air mm
1	21	39	0,00	43	81	0,00	36	100	0,00
2	7	90	4,25	18	100	0,00	47	72	0,00
3	59	68	3,89	56	74	0,00	87	73	0,00
4	67	66	0,00	71	67	0,00	9	100	0,00
5	7	99	13,75	1	100	0,00	8	97	0,00
6	10	99	20,65	46	65	0,00	44	70	0,00
7	55	65	0,00	28	61	0,00	29	64	0,00
8	23	100	4,33	2	94	0,00	2	100	0,00
9	4	100	58,48	4	90	6,39	4	100	1,06
10	16	55	10,98	33	86	35,99	34	89	2,33
Rataan	26,85	78,13	116,34	30,11	81,82	42,38	30,11	86,52	3,39

maksimum (kapasitas lapang) lahan penelitian nyata dipengaruhi oleh ruang pori mikro, ruang pori air tersedia, ruang pori air imobil, dan stabilitas pori dengan koefisien korelasi 99% ($\theta_{(KL)} = -0,38 + 1,04 \text{ RP mikro} - 0,03 \text{ RPAT} - 0,01 \text{ RP air imobil} - 19 \times 10^{-4} \text{ St. Pori}$; $R = 0,99$).

Berdasarkan jumlah hujan yang dapat teretensi (Tabel 5) dan laju perubahan kadar air (Tabel 4 dan Gambar 2) yang mencerminkan perubahan *storage*,

lahan blok 3 (lahan bekas kacang tanah) memiliki kemampuan meretensi air hujan yang lebih besar dan laju perubahan kadar air yang lebih rendah dibanding lahan bekas kangkung (blok 1) maupun lahan bekas sawah (blok 2). Hal ini menunjukkan bahwa tanah di blok 3 lebih dapat mengkonservasi air.

Secara umum dapat dijelaskan bahwa lahan bekas kacang tanah yang memiliki zone perakaran

paling dalam, dapat menyediakan air bagi tanaman lebih kontinu dibanding lahan yang lain.

Air tersedia yang besar di lapisan > 20 cm yang dapat menyumbangkan air ke lapisan di atasnya pada hari-hari tanpa hujan. Variabilitas kadar air rata-rata selama musim tanam pada lahan blok 3 tidak terlalu besar (Gambar 3 dan 4). Apabila ditinjau dari sifat-sifat fisik yang berkaitan dengan ketersediaan air, lahan bekas kacang tanah merupakan lahan yang telah dikelola secara baik.

Pada lahan bekas kangkung darat yang memiliki zona perakaran paling dangkal memiliki fluktuasi kadar air yang besar. Tanah yang memiliki zona perakaran lebih dangkal, dengan lapisan bawah zona perakaran yang lebih padat kurang dapat menstabilkan kadar air tanah, karena kemampuan dalam meretensi air hujan lebih rendah (Tabel 5) dan kemampuan retensi maksimum tanah paling rendah (Tabel 3), terutama pada kedalaman (0-20) cm. Di samping itu, lahan bekas kangkung memiliki ruang pori air tersedia yang lebih rendah dibanding lahan yang lain (Tabel 2). Pada lahan demikian perlu dirotasikan dengan tanaman berakar lebih dalam untuk memperbaiki struktur tanah agar tercipta distribusi pori yang baik di bawah kedalaman 20 cm, agar pergerakan dan ketersediaan air dan udara dalam tanah lebih lancar.

Pada lahan bekas sawah, walaupun kemampuan retensi airnya tinggi, namun karena pergerakan airnya kurang lancar, perlu penambahan bahan organik pada waktu digunakan untuk tanaman lahan kering. Karena pada musim hujan dirotasikan dengan padi sawah, sebaiknya tidak disarankan untuk ditanami tanaman berakar lebih dalam dari kedalaman lapisan bajak agar tidak merusak lapisan bajak.

Mengingat kedalaman perakaran jagung manis hanya sampai 20 cm dari permukaan tanah, maka untuk mencapai produksi optimum lahan blok 1, dan 2 dan 3 perlu tambahan air irigasi karena terjadi defisit air sampai di bawah kadar air minimum tersedia bagi tanaman. (Gambar 4 dan Tabel 5). Dari Gambar 4 tersebut terlihat bahwa lahan blok 1, 2, dan 3 menunjukkan defisit air yang berbeda. Defisit air tertinggi terjadi pada lahan blok 1, diikuti oleh

lahan blok 2, dan terakhir pada lahan blok 3. Lahan blok 3 menunjukkan paling bisa menjaga kelembaban tanah sepanjang musim pertumbuhan, sehingga hanya sedikit memerlukan air irigasi.

KESIMPULAN

1. Pergerakan air (fluks aliran air maupun laju pergerakan air *transient*) pada tanah lahan kering selain dipengaruhi oleh karakteristik pori, juga dipengaruhi oleh jumlah hujan. Semakin besar jumlah hujan, fluks aliran air makin besar; sedangkan laju pergerakan air *transient* meningkat sampai maksimum, kemudian menurun kembali dengan makin besarnya hujan.
2. Pergerakan air pada tanah dengan berbagai macam pengelolaan tanah dan tanaman sangat dipengaruhi oleh karakteristik pori tanahnya. Karakteristik pori yang berpengaruh terhadap fluks aliran air adalah ruang pori drainase cepat, ruang pori air mobil, dan stabilitas pori, dan ruang pori mikro; sedangkan karakteristik pori yang berpengaruh terhadap laju pergerakan air *transient* adalah ruang pori drainase sangat cepat, ruang pori air mobil, dan ruang pori air imobil.
3. Lahan bekas kacang tanah yang memiliki fluks aliran air paling besar, laju pergerakan air *transient* (dinamika perubahan kadar air) paling kecil dan solum tanah/zona perakaran paling dalam; lebih kontinu menyediakan air bagi tanaman dan membutuhkan air irigasi paling sedikit.
4. Lahan bekas kacang tanah dapat meretensi air hujan paling besar karena banyak memiliki pori-pori mikro, sedangkan lahan bekas kangkung paling sedikit.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirement-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome.

- Bagarello, V., M. Iovino, and D. Elrick. 2004. A Simplified falling-head technique for rapid determination of field - saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:66-73.
- Bodhinayake, W., B. Cheng Si, and C. Xiao. 2004. New method for determining water-conducting macro- and mesoporosity from tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:760-769.
- Dunn, G.H. and R.E. Phillips. 1992. Equivalent diameter of simulated macropore systems during saturated flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:52-58.
- Edwards, W.M., M.J. Shipitalo, W.A. Dick, and L.B. Owens. 1992. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:52-58.
- Hanks, R.J. and G.L. Ashcroft. 1986. *Applied Soil Physics*. Springer-Verlag. Heidelberg.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press. New York.
- Perfect, E.M.C., Sukop, and G.R. Haszler, 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Pp. 696-701.
- Prihar, S.S., B.P. Ghildyal, D.K. Painuli, and H.S. Sur. 1985. Physical properties of mineral soils affecting rice-based cropping systems. Pp 57-70. *In* IRRI (1985). *Soil Physics and Rice* International Rice Research Institute. Los banos, Laguna, Philippines.
- Sharma, P.K. and S.K. De Datta. 1985. Effect of puddling on soil physical properties and processes. Pp. 217-234. *In* IRRI (1985). *Soil Physics and Rice*. International Rice Research Institut. Los Banos, Laguna, Philippines.
- Shaxson, F. and R. Barber. 2003. *Optimizing Soil Moisture for Plant Production*. FAO Soils Bull. 79. <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y4690E00.HTM>.
- Shipitalo, M.J., W.M. Edwards, W.A. Dick, and L.B. Owens. 1990. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1530-1536
- Stenhuis, T.S., C.J. Ritsema, and L.W. Dekker. 1996. Fingered flow in unsaturated soil: From nature to model. Special issue. *Geoderma* 70:83-324.
- Subagyono, K., U. Haryati, dan S.H. Tala'ohu. 2004. Teknologi konservasi air pada pertanian lahan kering. *Dalam* U. Kurnia, A. Rachman, dan A. Dariah (Eds.) *Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Kering Berlereng*. Pusat Litbang Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.
- Sugita, F., T. Kishii, and M. English. 2004. Effects of macropore flow on solute transport in a vadose zone under repetitive rainfall events. *In* *Proceedings of Groundwater Quality 2004, the 4th International Groundwater Quality Conference*, held at Waterloo, Canada, July 2004.
- Torr, G.S., L.M. Condon, H.J. Di, and K.C. Cameron. 2004. Seasonal fluctuations in phosphorus loss by leaching from a grassland soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1429-1436.
- Wagenet, R.J. 1986. Water and solute flux. *In* A. Klute (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Am. Soc. Agron. Inc, Soil Sci. Soc. Am. Inc Madison, Wisconsin USA.