

**SIMULASI NUMERIK GERAKAN LENGAS TAK JENUH
DALAM TANAH PADA SISTEM IRIGASI TETES**
(NUMERICALLY SIMULATED UNSATURATED MOISTURE MOVEMENT
IN THE SOIL OF DRIP SYSTEM)

Muhammad Aqil¹⁾, Sigit Supadmo, Arief²⁾, Budi Rahardjo²⁾

ABSTRACT

The soil of coastal plain is characterized by sandy soil texture, salinity problem, low water capacity, high percolation rate and high soil temperature during day time. Due to those constraints, therefore much water is needed to be favorable to plant growth. Objective of the research is dealing with the application of numerical method to simulate heat and mass flow of water which is affected by soil moisture availability. A core of soil sample with size 50 cm x 50 cm x 50 cm is used as a physical model. The research has been scheduled from 1997 to 1998. Under high initial moisture content the simulation shows that there is similarity between predicted and observed value of soil moisture content with the correlation value more than 90% (t-test value 95%). However, the simulation is under estimate for low initial moisture content and high temperature. For the model applications, the factor's which influence on moisture movement in the soil was collected and rearranged in exponential equation: $\theta_v = 103,496 \cdot Q_{irr}^{0,015} \cdot T^{0,061} \cdot t^{0,235} \cdot x^{-0,161} \cdot z^{-2,842}$. From the model found that to keep soil moisture content in favorable condition ($\theta_v = 0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), the discharge design of drip irrigation needed was 3.2 cm³/sec with 2 hours duration of irrigation. The discharge designed based on water needed for evaporation and heat flushing so that moisture in the root zone was maintained.

Key words: Numerical method, Unsaturated conditions, Sandy soil, Drip irrigation, soil moisture movement

PENDAHULUAN

Lahan berpasir terhampar luas di wilayah Pantai Selatan Jawa sejak beberapa tahun terakhir ini dikelola secara aktif oleh masyarakat untuk kegiatan budidaya pertanian (Sutikno, 1998). Lahan berpasir tersebut mempunyai karakteristik agroklimat yang khas yaitu intensitas radiasi surya tinggi, sifat fisik tanah yang buruk serta panas lingkungan mikro yang ekstrim yang sangat potensial menimbulkan cekaman fisik tanah, nutrisi perubahan lingkungan yang sangat mempengaruhi proses fisiologi tanaman.

Menurut Noborio, *et al.* (1996) kisaran suhu di atas 42°C dapat mempengaruhi proses fisiologis tanaman, dan pada suhu di atas 50°C dapat mengakibatkan dena turasi pada tanaman yang sifatnya *irreversible* yang dapat mematikan tanaman. Untuk meminimumkan cekaman, petani di lahan pantai biasanya menyiram tanamannya pada siang hari dengan tujuan untuk menggelontar panas dalam tanah sehingga tidak menimbulkan sekaman

terhadap tanaman. Namun demikian petani menghadapi kendala dalam pelaksanaannya yaitu air tersedia dalam jumlah sedikit sementara petani tidak dapat menentukan secara pasti kebutuhan air untuk penyiraman.

Bertitik tolak dari fenomena tersebut maka kajian numerik ini dilakukan untuk mempelajari dan mengkaji fenomena pergerakan massa air dalam tanah melalui pemodelan pergerakan lengas pada tanah pasiran yang diberi sistem irigasi tetes. Dari hasil kajian tersebut diharapkan diperoleh model untuk menduga penyebaran lengas dalam tanah yang selanjutnya dijadikan dasar dalam analisis lanjutan untuk menentukan debit dan lama waktu pemberian air yang tepat untuk diterapkan petani di lahan pantai melalui sistim penyiraman semi otomatis (irigasi tetes) sebagai pengganti sistim penyiraman manual dengan memanfaatkan jaringan irigasi (bak renteng) yang telah dimiliki petani, sehingga beban kerja petani dapat dikurangi.

METODOLOGI

Pergerakan massa air dalam tanah pasiran yang sifatnya *incompressible* mengikuti prinsip aliran tak tunak (*unsteady*) dan *non uniform*. Ketidaktunakannya disebabkan oleh adanya pergerakan air ke bawah dan ke samping. Untuk menganalisa fenomena ini digunakan persamaan kontinuitas (konservasi massa) dalam media porus yang dikombinasikan dengan persamaan yang diturunkan dari hukum Darcy (Hanks and Aschroft, 1976; Selim and Kirkham, 1973) sebagai berikut:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \cdot V; \text{ dan } V = -k \frac{\partial \theta}{\partial l} \tag{1}$$

$$\text{dimana } \frac{\partial \theta}{\partial l} = \frac{d(\psi_p + \psi_s)}{dl} \tag{2}$$

Dimana:

- θ = Lengas tanah volumetrik (cm³/cm³)
- t = Waktu (detik)
- V = Kecepatan aliran (cm/detik)
- L = Panjang kolom tanah (cm)
- ∇ = Vektor operator
- ϕ = Potensial total

¹⁾ Alumni Fakultas Teknologi Pertanian UGM

²⁾ Staf Fakultas Teknologi Pertanian UGM

Representasi rumusan model diilustrasikan:

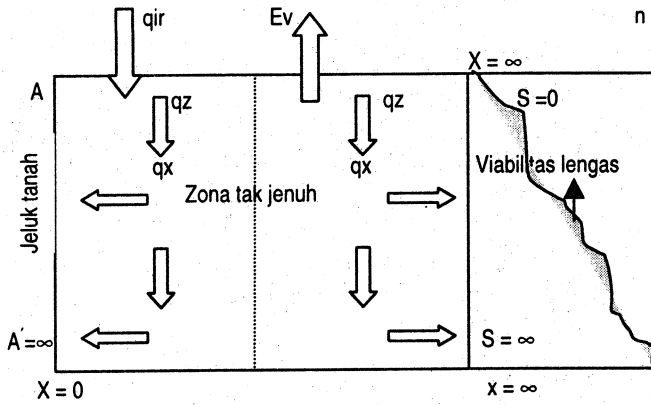


Figure 1. Moisture movement in the soil

Sebagai bentuk penyederhanaan model maka diasumsikan: tidak terjadi histerisis dalam hubungan konduktivitas hidrolis dan difusivitas dengan lengas tanah; pengaruh pH dan garam-garaman terhadap difusivitas tanah diabaikan; sumber panas internal dalam tanah diasumsikan tidak ada; serta perpindahan panas dalam tanah hanya terjadi secara konduksi.

Penyusunan Persamaan Gerakan Massa dan Panas Dalam Tanah

a. Persamaan pergerakan massa

Persamaan kontinuitas dua dimensi dalam media porus dinyatakan:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

Apabila dinyatakan dalam flux density maka persamaan (3.21) menjadi:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = -\left(\frac{\partial J_w}{\partial x} + \frac{\partial J_w}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$J_w = -K \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (3) dan (4) diperoleh:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Diskritisasi persamaan (5) akan menghasilkan persamaan pergerakan air secara lateral sebagai berikut:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Dengan menggunakan aturan rantai maka gradiennya dapat dinyatakan:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_v} \cdot \frac{\partial \theta_v}{\partial x} \right) \quad (7)$$

Dengan menggantikan nilai $K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_v}$ dengan $D(\theta)$

maka persamaan akhir aliran ke arah horisontal sebagai fungsi difusitas dinyatakan:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta_v}{\partial x} \right) \quad (8)$$

Untuk analisis gerakan massa air ke arah vertikal dalam tanah pengaruh potensial tekanan tanah harus diperhitungkan, sehingga persamaan (6) dapat dituliskan:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_v} \cdot \frac{\partial \theta_v}{\partial z} + K(\theta) \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Dengan memasukkan nilai difusitas maka persamaan (9) dapat dituliskan:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta_m}{\partial z} + K(\theta) \frac{\partial \psi_z}{\partial z} \right) \quad (10)$$

Pada aliran vertikal $\frac{\partial \psi_z}{\partial z} = 1$ sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta_v}{\partial x} + K(\theta) \right) \quad (11)$$

Kombinasi persamaan (8) dengan persamaan (11) merupakan persamaan gerakan air dua dimensi ke dalam tanah

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta_v}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (12)$$

Dimana :

$D(\theta)$ = Difusivitas lengas tanah (cm²/detik)

$K(\theta)$ = Konduktivitas lengas tanah (cm²/detik)

X = Aliran ke arah horisontal (cm)

z = Aliran ke arah vertikal (cm)

b. Persamaan pergerakan panas

Proses pergerakan air ke dalam tanah tidak jauh biasanya diikuti dengan perpindahan panas dengan sifat gerakan tak tunak dan tidak seragam mengikuti variasi radiasi netto (Hanks, R.J. and Aschroft, 1976). Dengan asumsi tidak ada panas bangkitan dari dalam maka persamaan akhir konduksi panas dua dimensi dalam tanah menjadi:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{D(T)} \frac{\partial T}{\partial T} \quad (13)$$

dimana :

$D(T)$ = Difusivitas termal (cm²/detik °C)

T = Suhu (°C)

Kombinasi persamaan (12) dan (13) akan menghasilkan hubungan antara pergerakan massa dan panas dalam tanah dua dimensi sebagai berikut:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x} D(\theta) \frac{\partial (\theta)_v}{\partial x} \right) \quad (14)$$

Dengan melihat fenomena model maka kondisi awal dan kondisi batas yang sesuai adalah:

$$\theta_v = \theta_0 \text{ pada } 0 < x < \infty, 0 < z < \infty, t = 0 \quad (15)$$

$$\theta_v(x, z, t) = \theta_{ve} \text{ pada } z = \infty, x = \infty, t > 0 \quad (16)$$

Persamaan (14) merupakan persamaan diferensial *non linier* yang sulit dipecahkan secara analitik (Resman *et al.*, 1971). Dengan mempertimbangkan kondisi awal dan kondisi batas yang dibuat maka penyelesaian dilakukan dengan menggunakan metode beda hingga (*finite difference*) skema eksplisit iterasi memusat terhadap sumbu waktu t .

$$\left(D(\theta'_{i,j}) \frac{\theta'_{i+1,j} - 2\theta'_{i,j} + \theta'_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(D(\theta'_{i,j}) \frac{\theta'_{i,j+1} - 2\theta'_{i,j} + \theta'_{i,j-1}}{\Delta z^2} \right) - \left(\frac{K(\theta'_{i,j+1}) - K(\theta'_{i,j-1})}{2\Delta z} \right) - \left(D(T'_{i,j}) \frac{T'_{i+1,j} - 2T'_{i,j} + T'_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(D(T'_{i,j}) \frac{T'_{i,j+1} - 2T'_{i,j} + T'_{i,j-1}}{\Delta z^2} \right) = \frac{\theta'_{i,j} - \theta'_{i,j}}{\Delta t} \quad (17)$$

Apabila nilai $\Delta x = \Delta z$ maka solusi akhir dari prediksi kandungan lengas tanah dengan pemecahan beda hingga skema eksplisit adalah:

$$\theta'_{i,j}{}^{t+\Delta t} = \theta'_{i,j} + \left(D(\theta'_{i,j}) \frac{\theta'_{i+1,j} + \theta'_{i-1,j} + \theta'_{i,j+1} + \theta'_{i,j-1} - 4\theta'_{i,j}}{\Delta x^2} - \frac{K(\theta'_{i,j+1}) - K(\theta'_{i,j-1})}{2\Delta x} \right) - \left(D(T'_{i,j}) \frac{T'_{i+1,j} + T'_{i-1,j} + T'_{i,j+1} + T'_{i,j-1} - 4T'_{i,j}}{\Delta x^2} \right) \Delta t \quad (18)$$

Diagram alir proses pendugaan gerakan lengas dalam tanah disajikan pada Gambar 2.

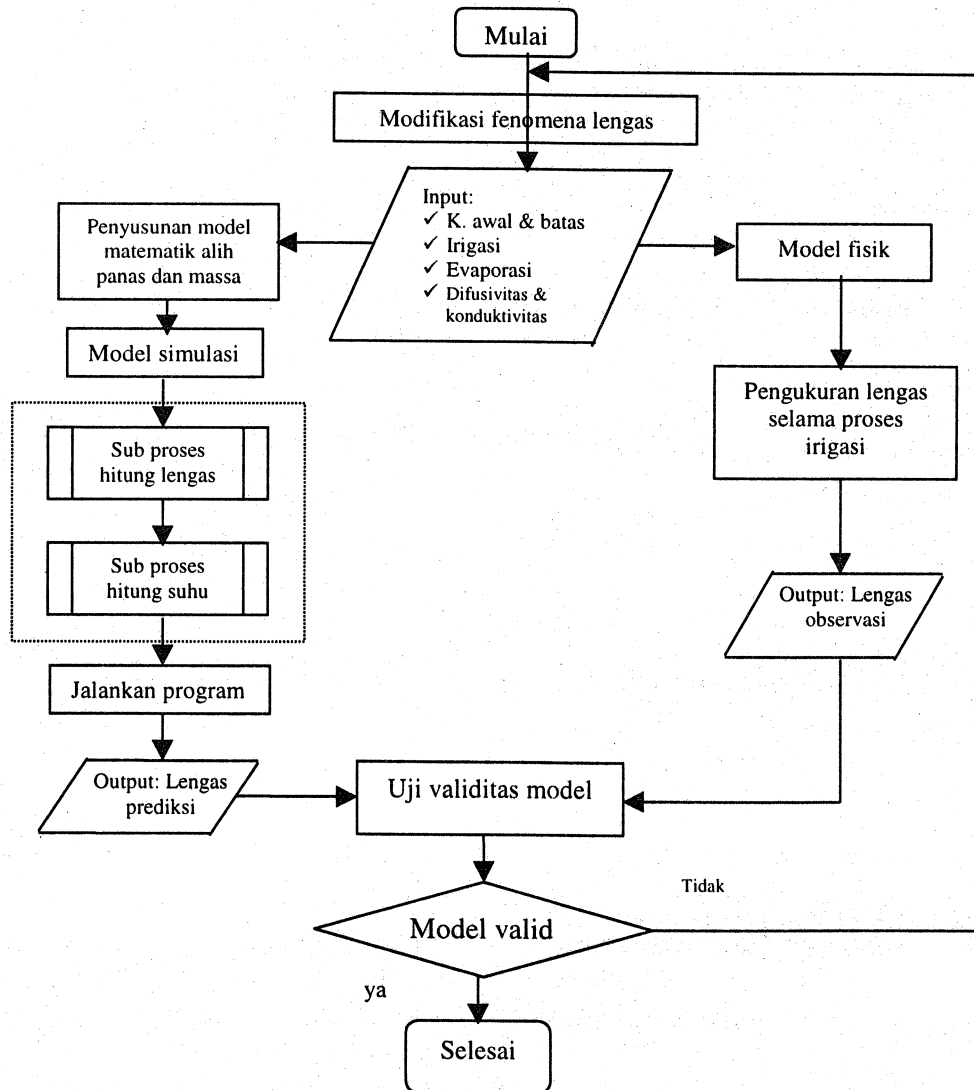


Figure 2. Flow diagram of heat and mass movement model

Sebagai pembandingan model maka dilakukan pengujian lapangan di lahan pesisir Pantai Pandansimo Kabupaten Bantul DIY. Penelitian dilakukan dengan mengukur secara langsung kandungan lengas tanah dan suhu tanah dengan menggunakan *gypsum block* dan *thermocouple*. Selanjutnya dibuat model fisik daerah aliran air yang berbentuk segi empat dengan dimensi panjang, lebar dan kedalaman masing-masing 50 x 50 x 50 cm (Gambar 2). Setelah daerah aliran ditentukan maka dilakukan pengamatan penyebaran air pada dua variasi debit yaitu 0,576 l/jam dan 2,250 l/jam. Peralatan pendukung penelitian adalah *thermocouple*, *digitator*, *gypsum block*, *multi tester*, perkakas laboratorium, selang penetes berikut alat pengatur laju aliran dan seperangkat komputer untuk pengolahan data serta pembuatan program komputer. Parameter pengamatan meliputi gerakan air tidak jenuh dalam tanah, pola penyebaran air dalam tanah, jarak yang dicapai oleh pemberian air serta suhu tanah.

Uji validasi model dilakukan dengan analisis regresi linier dan *t-test* pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

$$Y = a + bx \quad (19)$$

$$r_t = \frac{\sum(xy) - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}} \quad (20)$$

$$t_{hit} = \frac{r_t \sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-r^2)}} \quad (21)$$

$$|t_{hit}| \geq t_{tbl} \quad (22)$$

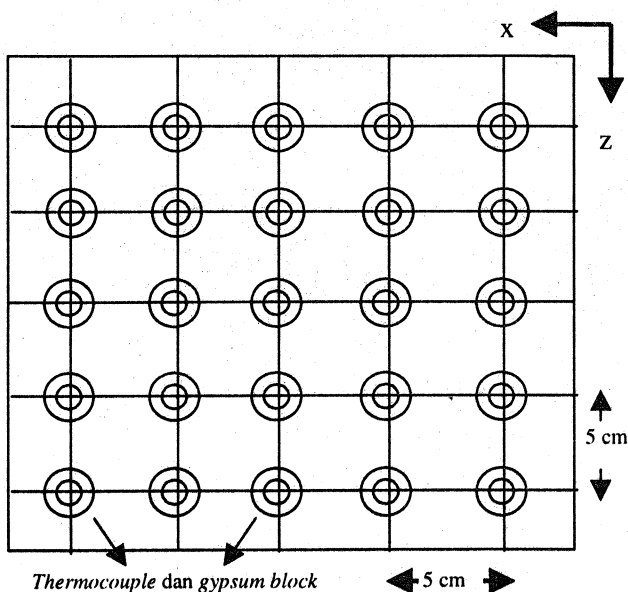
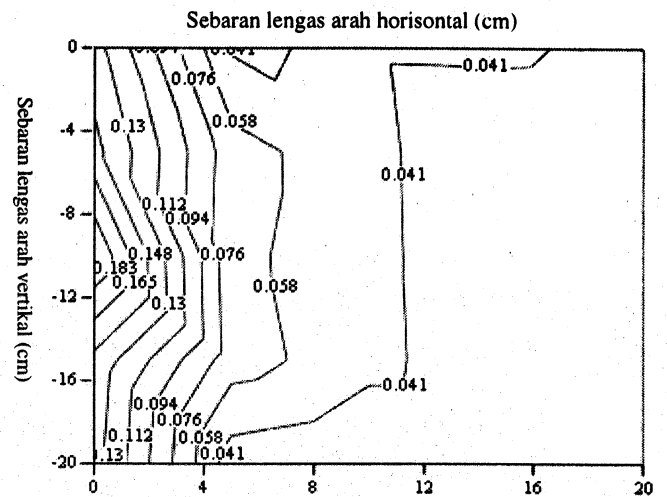


Figure 3. Lay out of sensor placement

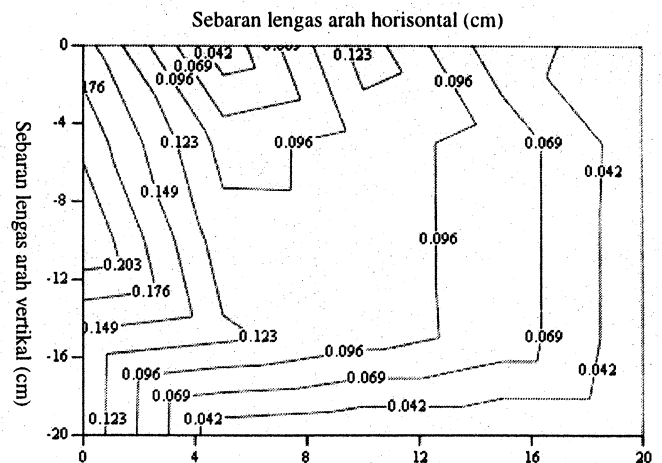
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar lengas dan suhu awal rata-rata yang terindera dalam pendugaan penyebaran lengas dan suhu tanah masing-masing 0,023 cm³/cm³ dan 38,6 °C. Berdasarkan kondisi awal tersebut kemudian dilakukan pendugaan penyebaran lengas yang hasilnya disajikan dalam bentuk plot kontur seperti terlihat pada Gambar 3. Nilai lengas pada kondisi awal ternyata sangat mempengaruhi hasil pendugaan. Nilai kondisi awal yang besar dengan suhu yang rendah memberikan hasil pendugaan yang hampir sama, sedangkan pada nilai lengas kondisi awal yang kecil dengan suhu yang relatif tinggi memberikan hasil pendugaan yang nilainya lebih rendah (*under estimate*) dibandingkan nilai aktual.



KA1

Figure 4. Moisture variability at discharge of 0,576 l/hr and 60 minutes duration



KA2

Figure 5. Moisture variability at discharge of 0,576 l/hr and 120 minutes duration

Selain dipengaruhi oleh kondisi awal pengamatan, adanya perbedaan nilai kadar lengas pendugaan dengan pengamatan juga disebabkan karena rentang waktu hitungan yang diberikan terlalu besar serta distribusi suhu

yang tidak linier akibat adanya proses perpindahan panas *non-conductive* dalam tanah yang bervariasi sifat termal tanah terhadap perubahan lengas tanah.

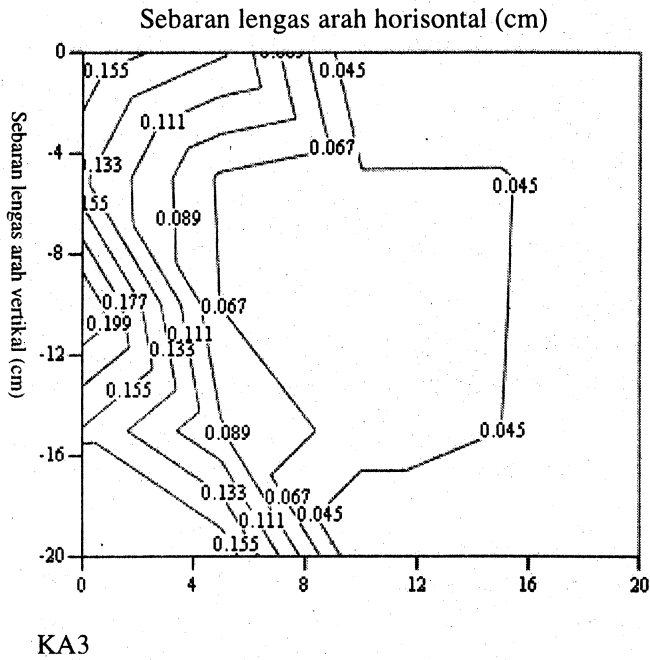


Figure 6. Moisture variability at discharge of 2,25 l/hr and 120 minutes duration

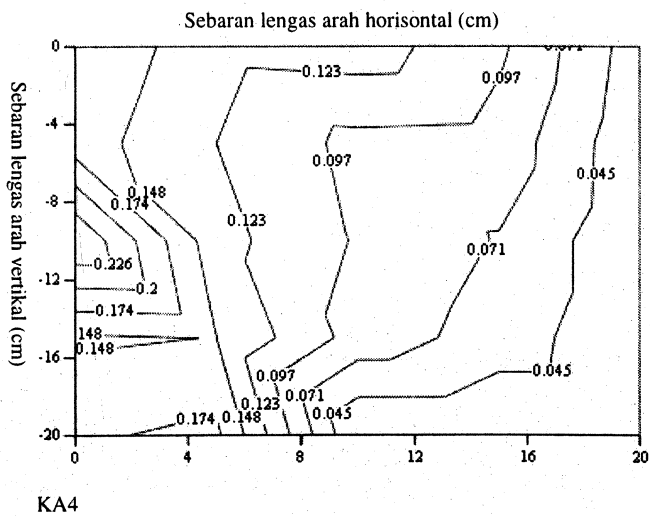


Figure 7. Moisture variability at discharge of 2,25 l/hr and 120 minutes duration

Berdasarkan Gambar di atas terlihat bahwa semakin lama pemberian air maka kecenderungan penyebaran air makin luas. Hal ini disebabkan karena semakin lama pemberian air maka kuantitas air yang dialirkan juga semakin besar sehingga muka pembasahan (*wetting front*) juga semakin panjang. Fenomena yang sama juga terlihat pada muka pembasahan yang terjadi selama proses irigasi berlangsung, dimana pertambahan jarak pada satu jam pertama pembasahan lebih besar dibandingkan pertambahan jarak pembasahan pada satu jam berikutnya. Hal ini dikarenakan semakin lama pengaliran semakin banyak pula pori-pori tanah yang harus diisi air dan

semakin luas daerah yang dibasahi sehingga pertambahan kadar lengas menjadi lebih lambat.

Hasil pengamatan juga memperlihatkan adanya kecenderungan pergerakan air yang sangat cepat ke arah vertikal. Hal ini dikarenakan buruknya kondisi fisik tanah pasiran, dimana dengan persentase pasir >90%, pori mikro 2,04% dan pori makro 20,32% mengakibatkan daya menahan air tanah sangat kecil sehingga pengaruh gaya gravitasi sangat besar. Sementara itu gerakan lengas ke arah horizontal lebih lambat karena lemahnya pengaruh gaya matriks tanah. Fenomena ini terlihat pada plot kontur penyebaran lengas yang memperlihatkan peningkatan laju aliran yang tidak mempengaruhi gerakan lengas ke arah horizontal.

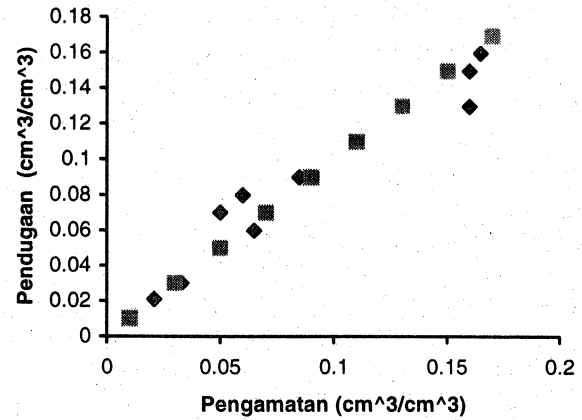


Figure 8. Validation test between observation and prediction at discharge rate of 0,576 l/hr

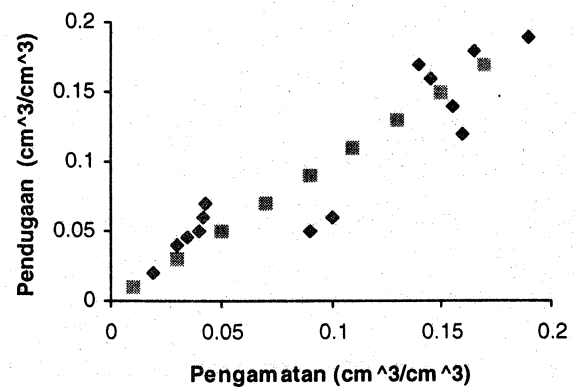


Figure 9. Validation test between observation and prediction at discharge rate of 0,576 l/hr

Uji validitas model dilakukan dengan regresi linier pada debit 0,576 l/jam dan 2,25 l/jam (Gambar 8 dan Gambar 9) diperoleh hubungan antara lengas pengamatan dengan pendugaan sebagai berikut :

$$\theta_{v-pred} = 0,032 + 0,954 \cdot \theta_{v-obs} ; R^2 = 0,915$$

pada $Q = 0,576$ l/jam

$$\theta_{v-pred} = 0,0029 + 0,997 \cdot \theta_{v-obs} ; R^2 = 0,998$$

pada $Q = 2,25$ l/jam

Uji lanjutan yang dilakukan dengan *t-test* diperoleh nilai *t*-hitung yang berada pada kisaran nilai *t*-tabel sehingga tidak ada alasan untuk menolak hasil pendugaan pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

Agar nilai pendugaan gerakan lengas lebih praktis maka dilakukan penyusunan ulang nilai lengas yang diperoleh melalui komputasi numerik berbantuan komputer dengan variabel lain yang turut mempengaruhi pergerakan air dalam tanah, seperti debit aliran, lama pemberian air, suhu, gerakan air ke arah vertikal serta gerakan air ke arah horisontal. Hubungan yang diperoleh dari penyelesaian secara serentak variabel adalah hubungan eksponensial: $\theta_v = 103,496 \cdot Q_{irr}^{0,015} \cdot T^{0,061} \cdot t^{0,235} \cdot x^{-0,161} \cdot z^{-2,842}$ (ralat rerata 6,4%). Dengan mengasumsikan penyebaran lengas ke arah vertikal 16 cm dengan suhu tanah 30°C maka untuk menjaga kondisi lengas pada kapasitas lapang ($\theta_v = 0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) maka debit irigasi yang diperlukan adalah $3,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dengan durasi irigasi 2 jam. Debit rancangan tersebut didasarkan pada kebutuhan air untuk evaporasi dan pengelontoran panas sehingga variabilitas lengas disekitar daerah perakaran tetap terjaga.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan ujicoba model didapatkan indikasi bahwa model pendugaan penyebaran lengas pada irigasi tetes yang mengkombinasikan persamaan aliran air dalam tanah dengan persamaan kontinuitas dapat digunakan untuk menaksir penyebaran lengas dalam tanah, dengan persamaan yang dibentuk adalah: $\theta_v = 103,496 \cdot Q_{irr}^{0,015} \cdot T^{0,061} \cdot t^{0,235} \cdot x^{-0,161} \cdot z^{-2,842}$. Uji validitas menunjukkan model dapat digunakan untuk menduga penyebaran lengas tanah dengan rerata korelasi di atas 90% dengan nilai *t*-hitung berkisar antara 0,003-0,1 dan *t*-tabel antara -2,09 - 2,09 pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

Berdasarkan model didapatkan laju pemberian air irigasi yang sesuai adalah $3,2 \text{ cm}^3/\text{det}$ dengan durasi irigasi 2 jam.

DAFTAR PUSTAKA

- Ewing, L.K, Vandelhove, H. Dale, B.W. Charles, and Lembke, D. Wellter., 1985. Numerically Simulated Unsaturated Flow for Sand Filter Design. ASAE Journal.
- Globus, A.M and G.W. Gee., 1995. Method to Estimate Water Diffusivity and Hydraulic Conductivity of Moderately Dry Soil. Soil Science Society of American Journal.
- Hanks, R.J and G.L. Aschroft., 1976. Physical Properties of Soils. Logan Utah State University.
- Kirkham, D and W.L. Powers, 1972. Advanced Soil Physics. Wiley Interscience New York
- Nielsen, D.R., M.Th. Van Genuchten and J.W. Biggar, 1986. Water Flow and Solute Transport Processes in the Unsaturated Zone. Water Resources Research Vol 22.
- Noborio, K.J, Mc. Innes and J.L. Heilman., 1996. Two Dimesional Model for Water, Heat and Solute in Furrow Irrigated Soil. Soil Science Journal.
- Remson, I., G.H. Hornberger and F.J.Moiz, 1971. Numerical Methods in Subsurface Hydrology. Wiley-Interscience, New York
- Sutikno, 1998. Model Konservasi Terpadu dan Pemanfaatan Mikorisa Sebagai Upaya Pengamanan dan Peningkatan Produktivitas Lahan Berpasir di Wilayah Pantai Selatan DIY. Laporan Riset Unggulan Terpadu III Bidang Teknologi Perlindungan Lingkungan. Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.