

Pemodelan Debit Air pada Teras Sawah dengan Memperhitungkan Pengatusan Teras Sebelumnya

Rice Field Discharge Modelling by Taking Into Account the Contribution of Previous Terrace Drainage

G. IRIANTO DAN IRSAL LAS¹

ABSTRAK

Pemanfaatan teras sawah untuk memodifikasi karakteristik hidrolis dengan jalan menampung dan mendistribusikan air secara lebih merata telah lama dilakukan. Namun demikian kuantifikasi mekanisme transfer air pada teras sawah sampai saat ini belum diketahui secara pasti. Untuk menjawab masalah tersebut, maka penelitian tentang pemodelan transfer air pada teras sawah dilakukan. Model transfer air pada teras sawah dengan menggunakan pendekatan hukum *reservoir linier* dapat dikaji berdasarkan dua kondisi yang berbeda yaitu: (1) dengan memperhitungkan kontribusi pengatusan teras sebelumnya secara tak terbatas dan (2) menganggap kontribusi teras sebelumnya secara terbatas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model persamaan debit untuk teras sawah ke n berdasarkan hukum *reservoir linier* yang diturunkan secara induktif adalah sebagai berikut:

$$Q_n = Q_0 e^{-Kt} \left(1 + Kt + \frac{K^2 t^2}{2!} + \frac{K^3 t^3}{3!} + \dots + \frac{K^{n-1} t^{n-1}}{(n-1)!} \right)$$

dengan: Q_n debit pada teras ke n (m^3/s), Q_0 debit inisial (m^3/s), k konstanta reservoir (s^{-1}), t waktu (s).

Menurut kaidah hukum fisika, kontribusi air pada teras berikutnya yang merupakan hasil pengatusan (*drainage*) teras sebelumnya perlu diperhitungkan, namun pemodelan debit dibatasi saat hukum *reservoir linier* berlaku. Hal ini disebabkan karena waktu untuk mengatus teras sawah sampai habis (tanpa air) adalah tak terhingga, sehingga pada saat sisa air di teras berada di bawah pipa, penerapan hukum *reservoir linier* untuk pemodelan debit tidak dapat digunakan. Pada saat tersebut besarnya stok tidak dapat diperhitungkan dari luas dan tinggi muka air pada teras, karena ada pengaruh kekasaran permukaan (*surface roughness*). Untuk mencari solusi dari kondisi tersebut, maka pemodelan debit pada teras dibatasi dengan mengasumsikan bahwa air pada teras dianggap habis pada saat tinggi muka air tepat pada setengah dari diameter pipa. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa dengan asumsi tersebut, maka debit pemodelan mendekati debit hasil pengukuran dengan nilai koefisien F (kriteria *Nash* dan *Sutcliffe*) bervariasi dari 0,97-0,98. Berdasarkan hasil tersebut, maka pemodelan debit air pada teras dengan asumsi bahwa air pada teras dianggap habis pada saat tinggi muka air tepat pada permukaan pipa atas dapat diterima.

ABSTRACT

Its been a long time that paddy terraces have been used in order to modify local hydraulic characteristics, aiming thus at a better evenness in water collecting and distribution.

Nevertheless, the quantification of water transfer mechanism in terraces has still to be fully understood. Research on modeling for water transfer has been carried out to answer this issue. The two following reservoir linear laws have been used to represent water transfer in the terrace: (1) taking into account continuous discharge contribution of the precedent terrace and (2) taking into account discontinuous discharge contribution of the precedent terrace. The results of research show that a universal discharge equation for the n^{th} terrace, based on the reservoir linear law derived through inductive method, can be described as:

$$Q_n = Q_0 e^{-Kt} \left(1 + Kt + \frac{K^2 t^2}{2!} + \frac{K^3 t^3}{3!} + \dots + \frac{K^{n-1} t^{n-1}}{(n-1)!} \right)$$

where : Q_n is the discharge from the n^{th} terrace (m^3/s), Q_0 the initial discharge (m^3/s), k is a reservoir constant (s^{-1}), and t is the time(s).

According to the physical law, the inflow drained from the previous terrace has to be taken into account, but in this case, discharge modeling is reduced to the time when linear reservoir law still applies. This is because time taken for the terrace to be fully drained-dry would be infinite: thus when the water level is under the drain level axis, the linear reservoir law does not apply anymore. At this time, the main part of the stock can not be computed using surface and water level, because of local surface roughness. To find a solution, the debit was modeled by assuming that water on the terrace was fully drained when the water surface reaches exactly half the diameter of the drain pipe. Results of such a model show that the debit thus evaluated approach the debit measured with a coefficient F (criterion of Nash and Sutcliffe) variegating between 0.97 and 0.98. With such results this model can be accepted, assuming as a basic hypothesis that the terrace is dry when water its surface reaches half of the drain pipe diameter.

Keywords: Water transfer, Terrace, linear reservoir, Discharge

PENDAHULUAN

Latar belakang

Dipandang dari segi volume hujan tahunan, semestinya air di daerah tropika mampu memenuhi kebutuhan manusia, baik untuk dikonsumsi

¹ Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor

langsung maupun untuk kepentingan lainnya. Namun di lapangan kenyataannya sangat berbeda. Bahkan ketersediaannya dalam jumlah dan mutu yang memadai merupakan masalah strategis yang mendesak untuk ditangani pada saat ini maupun masa mendatang, tidak saja oleh negara-negara berkembang, melainkan negara yang berteknologi maju sekalipun (Ismail, 1998). Meningkatnya frekuensi dan wilayah yang terkena banjir di musim hujan dan mengalami kekeringan di musim kemarau merupakan salah satu fakta bahwa masalah air cenderung semakin kompleks dan memerlukan penanganan khusus.

Teras sawah irigasi merupakan salah satu jenis penggunaan lahan yang mampu berfungsi sebagai media produksi sekaligus menampung dan menyimpan air serta didistribusikan secara lebih merata, sehingga dampak negatif akibat kelebihan air pada musim hujan dapat dikurangi dan sebaliknya pada musim kemarau risiko kekeringan dapat dikurangi (Irianto *et al.*, 1997). Di beberapa Negara Asia seperti: Indonesia, Cina, Thailand, Vietnam, Laos dan sebagainya teras menempati areal sampai dengan 20% dari luas daerah aliran sungai (Irianto *et al.*, 1999b). Dengan demikian keberhasilan dalam pemodelan debit pada teras dengan menggunakan kaidah hukum fisika memungkinkan untuk dapat diaplikasikan di negara-negara tersebut.

Di daerah aliran sungai (DAS) Kali Garang, Semarang, Indonesia, teras menempati luasan: 20,23%, 18,98%, dan 28,14% berturut-turut untuk sub-DAS Kali Garang Hulu (79,4 km²), sub-DAS Kali Kripik (16,59 km²) dan sub-DAS Kali Sikopek (15,35 km²) dari total DAS Kali Garang (190 km²) (Perez *et al.*, 1997). Sehubungan dengan proporsinya yang cukup besar, maka teras dapat dimanfaatkan untuk memodifikasi proses transfer hujan aliran permukaan, sehingga debit yang dihasilkan pada musim penghujan tidak menimbulkan banjir, sedangkan di musim kemarau akan mampu memberikan pasokan air yang memadai.

Mengingat pentingnya DAS Kali Garang, maka Pemerintah melalui Dinas Pekerjaan Umum Pengairan Propinsi Tingkat I Jawa Tengah memasang alat duga muka air di DAS Kali Garang (di Panjangan), dua alat duga muka air masing-masing di sub-DAS Kali Garang Hulu (di Patemon) dan sub-DAS Kali Kreo (di Kali Pancur) (Irianto *et al.*, 1999b). Kekurangannya, alat yang dipasang belum dilengkapi stasiun hujan otomatis, sehingga belum dapat memberikan gambaran hubungan proses transfer hujan menjadi aliran permukaan dengan baik. Kendala lainnya adalah interval pengamatannya dua jam, sehingga keragaman hujan (dalam hal ruang dan waktu) yang sangat besar di daerah tropika belum dapat direpresentasikan dengan baik.

Sampai saat ini pemanfaatan teras sawah lebih ditekankan pada fungsinya dalam menyangga stabilitas produksi padi, sementara itu fungsi lainnya seperti: (1) Menampung volume dan mendistribusikan aliran permukaan, (2) menurunkan kecepatan aliran permukaan dan erosi belum diketahui mekanismenya. Akibatnya, strategi pengelolaan aliran permukaan dan pencegahan erosi sampai saat ini masih dilakukan dengan membangun waduk/bendungan besar yang memerlukan tenaga, waktu, dan biaya besar.

Berdasarkan kajian pustaka, hasil penelitian teras, terutama di lahan kering saat ini masih terbatas pada aspek konservasi tanah dan air. Kajian yang dilakukan lebih terfokus pada jumlah tanah yang tererosi dan volume aliran permukaan yang terjadi akibat berbagai penerapan konservasi tanah dan air (Neibling and Thompson, 1992, Pruski *et al.*, 1997). Wu *et al.* (1997) mencoba melakukan penelitian tentang pengaruh hamparan teras pada lahan sawah terhadap perubahan karakteristik debit, namun demikian belum dapat menjelaskan mekanisme fisik transfer air pada teras suksesif. Kajian yang dilakukan lebih terfokus pada hamparan teras sebagai suatu *reservoir* alami, sehingga mekanisme transfer air pada teras tunggal maupun suksesif belum dapat direpresentasikan.

Teras sawah secara suksesif akan mengalirkan airnya dari teras pertama menuju teras kedua dan seterusnya. Secara fisik waktu untuk mengatus (*drainage*) air pada teras sangat lama (tak terhingga), akibat adanya kekasapan permukaan (*surface roughness*) pada teras. Untuk itu pemodelan debit pada teras dapat dilakukan dengan dua pendekatan yaitu: (1) menganggap waktu pengatusan teras tak terbatas dan (2) waktu pengatusan teras terbatas. Hipotesis kedua diambil dengan mengasumsikan bahwa pada saat air pada teras sudah di bawah pipa pembuangan, maka volume air pada teras dianggap sudah habis.

Penelitian bertujuan untuk: (1) memodel proses transfer hujan-aliran permukaan pada teras sawah suksesif dan (2) mengkaji pengaruh teras sawah terhadap karakteristik debit teras.

BAHAN DAN METODE

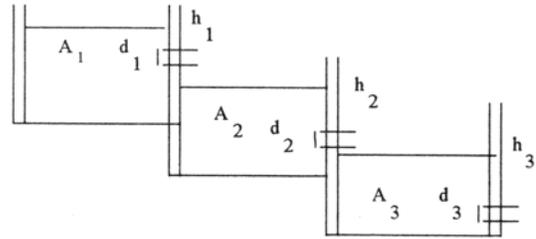
Daerah aliran sungai (DAS) Kali Garang merupakan salah satu DAS prioritas yang perlu segera ditangani, karena hampir setiap tahun terjadi masalah banjir (musim hujan) dan kekeringan (musim kemarau). Bagian hulu DAS ini merupakan pemasok utama sumber air bersih Kota Semarang yang berpenduduk ± 2 juta jiwa. DAS ini terdiri atas tiga sub-DAS penting yaitu DAS Kali Garang Hulu, DAS Kali Kreo dan DAS Kali Sikopek.

Penelitian ini dilakukan mulai tahun 1996-1998 di sub-DAS Kali Kripik, DAS Kali Garang. Tulisan ini dibatasi pada pemodelan transfer air pada teras dalam kasus teras identik, artinya ukuran teras dan parameter hidroliknya diasumsikan sama.

Pemodelan transfer hujan-aliran permukaan

Model hidrolik teras

Model ini diturunkan dari hukum debit menurut persamaan hidrolika dan hukum debit menurut *reservoir linier*. Berikut ini disajikan gambaran hubungan antara satu dengan lainnya serta penetapan parameternya.



Gambar 1. Teras sawah suksesif
Figure 1. Succesif rice field terrace

Tiga parameter penting yang menentukan karakteristik teras yaitu luas teras (A_i), tinggi muka air di teras h_i (*hydraulic head*) dan d_i (diameter pipa). Pipa drainase ini dipilih dengan pertimbangan bahwa debit yang keluar akan lebih mudah dipantau. Sedangkan drainase dalam bentuk saluran terbuka tidak digunakan karena di lapangan ukurannya tidak stabil. sehingga debit yang dihasilkan akan sulit dipantau. Pada penelitian ini drainase alami tidak diperhitungkan karena sangat beragam tergantung kondisi lingkungannya (jenis tanah, lokasi dan kebiasaan petani). Komponen rembesan horizontal diabaikan pada penelitian ini, karena besarnya jauh lebih kecil dibandingkan debit terasnya.

Kendala penerapan hukum hidrolik klasik untuk menghitung debit

Tahap pertama pada pemodelan ini ialah menerapkan hukum hidrolik klasik untuk menghitung debit yang keluar dari teras melalui pipa, dengan hipotesis bahwa ukuran teras yang ada identik, sehingga parameter hidroliknya (A , h , d) dianggap sama. Penggunaan hipotesis ini perlu dalam rangka penyederhanaan sistem. Untuk sembarang teras, persamaan hidrolik klasik untuk menghitung debit yang keluar dari sebuah reservoir melalui sebuah pipa adalah sebagai berikut:

$$Q = ms\sqrt{2gh} \tag{3.1}$$

dengan:

Q : debit (m^3s^{-1}) ;

m : koefisien umumnya dipilih antara 0,5-0,6, tergantung jenis pipa dan rasio diameter dan panjang pipa;

s : luas pipa (m^2), g gravitasi ($9,78 ms^{-2}$);

h : tinggi air sesaat yang dihitung dari tengah pipa sampai permukaan air .

Untuk mendapatkan hubungan Q (debit) dengan waktu (t), maka diambil persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$-Q_1 dt = Adh_1 \quad (3.2)$$

Persamaan 3.1 dapat ditulis juga:

$$Q_1 = k\sqrt{h_1} \text{ dengan } k = ms\sqrt{2g}$$

$$-kh_1^{0,5} dt = Adh$$

$$-kdt = Ah_1^{-0,5} dh$$

$$\int_{h_0}^h h^{-0,5} dh = \frac{k}{A} \int_{t=0}^t dt$$

$$-kt = 2A(h_1^{0,5} - h_0^{0,5})$$

$$h_1^{0,5} = h_0^{0,5} - \frac{k}{2A} t$$

Oleh karena $Q_1 = kh_1^{0,5}$, maka persamaan debit untuk teras 1 sebagai-fungsi waktu dapat ditulis:

$$Q_1 = k\left(h_0^{0,5} - \frac{k}{2A} t\right) \quad (3.3)$$

Untuk teras kedua persamaan kontinuitasnya dapat ditulis sebagai berikut:

$$(Q_1 - Q_2)dt = Adh_2$$

$$\left[k\left(h_0^{0,5} - \frac{k}{2A} t\right) - Q_2\right]dt = Adh_2$$

$$\left[k\left(h_0^{0,5} - \frac{k}{2A} t\right) - kh^{0,5}\right]dt = Adh_2$$

Persamaan yang terakhir ini tidak dapat diselesaikan karena parameter h_2 dan t tidak dapat dipisahkan dan ordernya berbeda, sehingga integralnya tidak dapat diselesaikan. Meskipun secara teoritis dan praktis hukum hidrolis klasik dapat digunakan untuk menghitung debit dari suatu teras tanpa kontribusi air dari teras sebelumnya, namun dalam hal teras suksesif hukum tersebut tidak dapat digunakan. Bertitik tolak dari masalah tersebut, maka dicoba untuk memodel sistem teras suksesif dengan mengganti hukum hidrolis klasik dengan hukum *reservoir linier*.

Model reservoir linier dan penerapannya dalam teras bertingkat

Menurut Chow (1964) *reservoir* dikatakan linier fiktif apabila debit yang keluar melalui *reservoir* (dapat berupa teras, kolam, waduk) berbanding lurus dengan stoknya. Secara matematik hubungan tersebut disajikan sebagai berikut:

$$Q = KS$$

dengan: K konstanta *reservoir*, S stok air pada teras. Dalam hal teras berbentuk prisma vertikal, maka berlaku hubungan :

$$S = Ah$$

Lebih jauh Q dapat ditulis:

$$Q = KA h$$

Untuk menyatakan Q dalam fungsi waktu, maka pertama kali perlu disajikan dahulu persamaan kontinuitas pada teras pertama sebagai berikut:

$$-Q_1 dt = Adh \quad (3.5)$$

$$-KAh_1 dt = Adh_1$$

$$\frac{dh}{h_1} = -Kdt$$

$$[\ln h]_{h_0}^h = -K[dt]_{t_0}^t$$

$$\frac{h_1}{h_0} = e^{-Kt}$$

$$h_1 = h_0 e^{-Kt}$$

dan

$$Q_1 = KAh_1$$

Selanjutnya persamaan Q_1 dapat ditulis:

$$Q_1 = KAh_0 e^{-Kt} \quad (3.6)$$

Selanjutnya kita dapat menurunkan persamaan debit dari teras kedua.

Dalam hal teras identik/dimensinya sama (Gambar 1), maka parameter K , A dan h_0 dianggap sama untuk semua teras. Persamaan kontinuitas pada teras kedua dapat ditulis:

$$(Q_1 - Q_2)dt = Adh$$

dengan Q_1 debit dari teras pertama, dan Q_2 debit dari teras kedua.

Atau dapat pula ditulis:

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dh}{dt} \quad (3.7)$$

$$Q_0 e^{-Kt} - KAh = A \frac{dh}{dt} \quad (3.8)$$

Apabila diasumsikan: $h = y$ dan $t = x$, maka diperoleh:

$$\frac{Q_0}{A} e^{-Kx} - Ky_2 = \frac{dy}{dx} \quad (3.9)$$

Untuk menyelesaikan persamaan 3.9, menurut Piscounov (1969) perlu diasumsikan sebagai berikut:

$$Y_2 = uv$$

dimana :

$$\frac{dy}{dx} = v \frac{du}{dx} + u \frac{dv}{dx}$$

Dengan substitusi y_2 dan $\frac{dy}{dx}$ dalam persamaan (3.9), diperoleh:

$$\frac{Q_0}{A} e^{-Kx} - Kuv = v \frac{du}{dx} + u \frac{dv}{dx}$$

dimana:

$$\frac{Q_0}{A} e^{-Kx} - \frac{du}{dx} v = u \left(Kv + \frac{dv}{dx} \right) \quad (3.10)$$

Penyelesaian persamaan 3.10 dilakukan dengan mengasumsikan bahwa persamaan ruas kanan yang di dalam kurung sama dengan nol, konsekuensinya persamaan 3.10 ruas kanannya juga sama dengan nol. Asumsi pertama dapat ditulis:

$$\frac{dv}{dx} = Kv, \text{ atau, } \frac{dv}{v} = Kdx, \text{ dan : } \ln(v) = -Kx, \Rightarrow v = e^{-Kx} \quad (3.11)$$

Apabila nilai v digantikan pada ruas kanan persamaan 3.10 dan diaplikasikan hipotesis kedua, maka akan diperoleh:

$$\frac{Q_0}{A} e^{-Kx} - e^{-Kx} \frac{du}{dx} = 0$$

$$\frac{Q_0}{A} e^{-Kx} = \frac{du}{dx} e^{-Kx}$$

Apabila du/dx dipisahkan akan diperoleh :

$\frac{du}{dx} = \frac{Q_0}{A} e^{-Kx} e^{+Kx} \Rightarrow \frac{du}{dx} = \frac{Q_0}{A}$, sehingga solusinya menjadi :

$$u = \frac{Q_0 x}{A} + c$$

Sebagaimana asumsi awal : $y_2 = uv$, maka diperoleh:

$$y_2 = \frac{Q_0 x}{A} e^{-Kx} + Ce^{-Kx}$$

Apabila dikembalikan ke asumsi awal bahwa (h_2 sama dengan y dan t sama dengan x), maka, untuk $t = 0, h = h_0$, sehingga diperoleh:

$$h_0 = C$$

maka h_2 dapat dinyatakan : $h_2 = \frac{Q_0}{A} t e^{-Kt} + h_0 e^{-Kt}$

Sehubungan dengan:

$$Q_2 = KA h_2$$

$$Q_2 = KA \left(\frac{Q_0}{A} t e^{-Kt} + h_0 e^{-Kt} \right)$$

atau lebih jauh dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$Q_2 = Q_0 e^{-Kt} (Kt + 1) \tag{3.12}$$

Dengan cara yang sama persamaan kontinuitas pada teras ketiga dapat ditulis:

$$Q_2 - Q_3 = A \frac{dh}{dt} \tag{3.13}$$

Selanjutnya apabila diketahui bahwa $Q_3 = KA h_3$, maka debit dari teras ketiga dapat ditulis:

$$Q_3 = Q_0 e^{-Kt} \left(\frac{K^2 t^2}{2} + Kt + 1 \right) \tag{3.14}$$

Secara analogi persamaan debit pada teras keempat dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_4 = Q_0 e^{-Kt} \left(\frac{K^3 t^3}{6} + \frac{K^2 t^2}{2} + \frac{Kt}{1} + 1 \right) \tag{3.15}$$

Selanjutnya untuk teras ke n dapat ditulis:

$$Q_n = Q_0 e^{-Kt} \left(1 + \frac{Kt}{1!} + \frac{K^2 t^2}{2!} + \frac{K^3 t^3}{3!} + \dots + \frac{K^{(n-1)} t^{(n-1)}}{(n-1)!} \right) \tag{3.16}$$

Atau dapat juga ditulis:

$$Q_n = Q_0 e^{-Kt} \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Kt)^i}{i!} \right] \tag{3.17}$$

Untuk membandingkan debit hasil pemodelan pada tiap-tiap teras, maka dilakukan pengukuran debit langsung dari masing-masing teras di lapangan. Caranya dengan jalan menampung ke dalam ember dan selanjutnya diukur dengan gelas ukur dengan ketelitian alat 20 ml.

Selanjutnya kriteria Nash dan Sutcliffe (Pillion, 1992) digunakan untuk mengetahui akurasi hasil pemodelan secara kuantitatif seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$F = 1 - \frac{\sum_1^N (Q_{Simulasi} - Q_{Pengukuran})^2}{\sum_1^N (Q_{Simulasi} - \bar{Q}_{Pengukuran})^2} \tag{3.18}$$

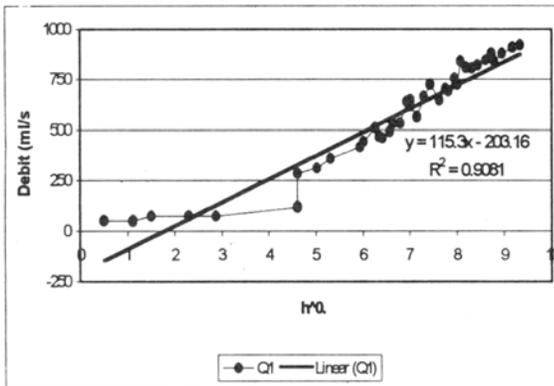
Dengan : F kriteria Nash dan Sutcliffe, N jumlah observasi, $Q_{simulasi}$ debit simulasi (m^3/s), $Q_{pengukuran}$ debit pengukuran (m^3/s), $\bar{Q}_{Pengukuran}$ debit pengukuran rata-rata (m^3/s).

Nilai maksimal untuk F adalah 1 artinya hasil simulasi sempurna dibandingkan pengukurannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penetapan konstanta *reservoir* (K)

Konstanta *reservoir* (K) pada penelitian ini ditetapkan berdasarkan persamaan 3.4. Dengan menggunakan data debit dan tinggi muka air (h) pada teras hasil pengukuran, maka besarnya K dapat ditetapkan. Berikut ini disajikan salah satu contoh penetapan K pada teras pertama (Gambar 2).



Gambar 2. Grafik hubungan antara debit dan tinggi muka air pada teras pertama

Figure 2. Relation between discharge and water level on the first terrace

Sesuai dengan hukum *reservoir linier*; maka kecenderungan (*trend*) hubungan antara debit dan tinggi muka air pada teras adalah linier. Dengan demikian tangen sudut dari persamaan linier tersebut adalah KA (konstanta *reservoir* dikalikan luas teras). Apabila luas teras (A) diketahui melalui pengukuran di lapangan, maka besarnya nilai K dapat dihitung. Penetapan nilai K untuk teras selanjutnya dapat dilakukan dengan cara yang sama. Berdasarkan hasil perhitungan ternyata besarnya K untuk masing-masing teras cenderung tetap. Hal ini menunjukkan bahwa variasi sifat fisik

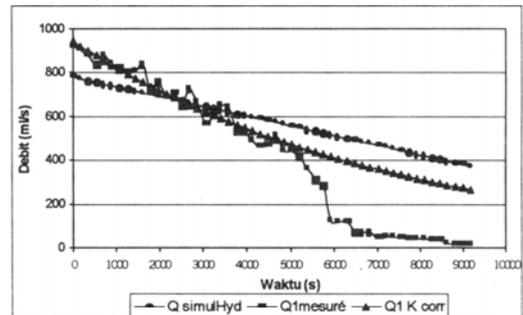
tanah dan kekasapan permukaan teras antar teras sangat kecil untuk ketiga teras yang dikaji. Perbandingan ini akan sangat menarik apabila dilakukan dengan teras lain yang letaknya di luar areal penelitian.

Pemodelan debit

Pembahasan hasil penelitian ini lebih difokuskan pada keberhasilan pemodelan transfer hujan-aliran permukaan pada teras pertama, kedua dan ketiga dan dibandingkan dengan hasil pengukurannya.

Teras pertama

Sehubungan pada teras pertama masih dimungkinkan penerapan hukum hidrolis dan *reservoir linier*, maka hasil pemodelan dengan kedua model secara bersama dibandingkan dengan hasil pengukurannya (Gambar 3).



Gambar 3. Debit pengukuran (Q1 measure) dan simulasi menurut hukum *reservoir linier* (Q1 K corr) dan hukum hidrolis klasik (QsimulHyd) dari teras pertama

Figure 3. Discharge measurement (Q1 measure) and simulation according to the linear reservoir law (Q1K corr) and the classic hydraulic law (QsimulHyd) from the first terrace

Terlihat bahwa penggunaan hukum *reservoir linier* untuk mensimulasi debit pada teras pertama jauh lebih baik dibandingkan dengan hukum hidrolis klasik. Penyebabnya setelah beberapa saat pengatusan teras, volume air yang ada pada teras tidak berbanding lurus dengan kedalamannya

karena adanya permukaan dasar teras yang tidak horizontal. Dengan demikian hasil debit dengan menggunakan persamaan hidrolis klasik cenderung lebih besar dibandingkan dengan kondisi lapangannya. Sebaliknya dengan *reservoir linier*, adanya variasi volume air akibat adanya kekasapan permukaan (*surface roughness*) teras diperhitungkan dengan baik melalui parameter K (tetapan *reservoir*). Simulasi debit yang dihasilkan terlihat lebih mendekati dibandingkan dengan hasil pengukurannya. Setelah $t > 5.760$, maka hasil simulasi debit jauh lebih tinggi dibandingkan pengukurannya, karena stok air (luas dikalikan tinggi air pada teras) yang digunakan untuk memodel debit dari teras jauh lebih besar dibandingkan kondisi riilnya akibat adanya pengaruh kekasapan permukaan (*surface roughness*). Untuk itulah, maka pemodelan dibatasi sampai pada saat tinggi air setengah dari diameter pipa. Pada saat itu peranan kekasapan permukaan terhadap debit masih kecil.

Adanya penurunan debit teras hasil pengukuran secara drastis pada menit 5.760, menunjukkan bahwa pada saat itu pengaruh kekasapan permukaan teras meningkat secara tajam dibandingkan waktu sebelumnya. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya perbedaan antara debit hasil simulasi dan pengukuran pada akhir pengatusan (Albertson and Simon, 1964). Adanya kekasapan permukaan teras, karena petani tidak mungkin membuat permukaan teras rata secara sempurna dengan meratakan secara manual. Apabila permukaan teras sawah licin, maka pemodelan dapat dilakukan sampai air selesai, karena stok air dapat dihitung dengan lebih mudah.

Secara kuantitatif hasil simulasi debit dengan menggunakan *reservoir linier* menurut kriteria Nash dan Sutcliffe adalah 0,92, sedangkan dengan menggunakan hukum *reservoir linier* hanya 0,54 saja. Perbedaan ini menunjukkan kelebihan model *reservoir linier* yang sangat signifikan dibandingkan hukum hidrolis klasik dalam mensimulasi debit dari teras.

Teras kedua

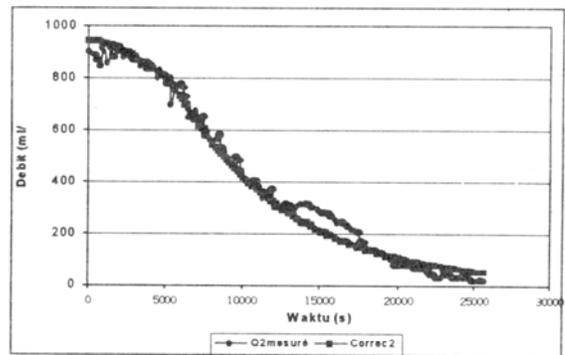
Pada teras kedua, simulasi debit dilakukan hanya dengan menggunakan persamaan debit menurut hukum *reservoir linier* seperti terlihat pada Gambar 3. Sehubungan dengan adanya kontribusi debit dari teras pertama ke teras kedua pada saat pengatusan, maka persamaan debit pada teras kedua dibagi menjadi dua bagian: (1) pada saat teras pertama memberikan kontribusi debit pada teras kedua dan (2) saat kontribusi teras pertama berhenti atau dengan kata lain teras pertama sudah selesai diatus.

Berdasarkan pendekatan tersebut maka persamaan debit menurut hukum *reservoir linier*, tahap pertama adalah sebagai berikut:

$$Q_2 = Q_0 e^{-Kt} (Kt + 1)$$

Sedangkan pada saat kontribusi teras pertama berhenti, maka debit yang terukur hanya berasal dari teras kedua dan persamaannya menjadi:

$$Q_2 = Q_{0(t=5760s)} e^{-K(t-5760)} \tag{3.19}$$



Gambar 4. Debit pengukuran (*Q2 measure*) dan simulasi dari teras kedua menurut hukum *reservoir linier* (*Corrc2*) dengan memperhitungkan sumbangan debit dari teras pertama

4. Discharge measurement (*Q2 measure*) and simulation (*Corrc2*) for the second terrace, according to the linear reservoir law taking into account contribution of the discharge from the first terrace

Terlihat pada Gambar 4, bahwa hasil simulasi debit dengan menggunakan hukum *reservoir linier* pada teras kedua dibandingkan hasil pengukurannya memberikan hasil yang sangat baik. Pentahapan pemodelan berdasarkan ada dan tidaknya kontribusi teras pertama mampu mendekati hasil pengukurannya. Hasil perhitungan kriteria Nash dan Sutcliffe pada teras kedua sebesar 0,98. Artinya model yang dihasilkan mampu menjelaskan 98% proses transfer air pada teras kedua. Lebih jauh lagi angka yang tinggi tersebut diperoleh melalui perbandingan dengan hasil pengukuran di lapangan yang sarat dengan faktor-faktor yang sulit dikontrol.

Adanya variasi kecil di awal dan menjelang akhir periode pengatusan diduga akibat keterbatasan ketelitian alat yang digunakan. Namun demikian hasil pemodelan ini telah mampu menggambarkan debit yang keluar dari teras dengan sangat baik ditinjau dari bentuk kurva secara keseluruhan maupun kriteria kuantitatifnya (Nash dan Sutcliffe). Hal ini menunjukkan bahwa proses fisik transfer air pada teras sudah dapat diterangkan dengan hukum-hukum fisika dengan baik.

Teras ketiga

Pada teras ketiga, persamaan debit menurut hukum *reservoir linier* dibagi menjadi tiga tahap yaitu: (1) ada kontribusi air dari teras pertama dan kedua, (2) kontribusi air dari teras kedua saja dan, (3) hanya dari teras ketiga saja. Secara rinci persamaannya disajikan sebagai berikut:

- A. Persamaan debit pada teras ketiga saat ada kontribusi air dari teras pertama dan kedua.

$$Q_3 = Q_0 e^{-Kt} \left(\frac{K^2 t^2}{2} + Kt + 1 \right)$$

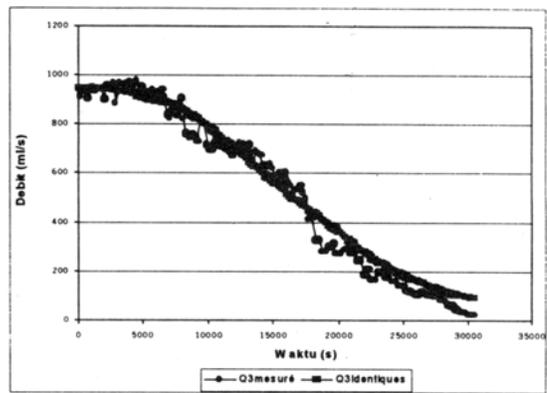
- B. Setelah teras pertama selesai diatus (5.760 menit), maka debit pada teras ketiga terdiri atas kombinasi debit teras kedua dan teras ketiga dan persamaannya menjadi:

$$Q_3 = Q_{0(t=5760)} e^{-K(t-5760)} (K(t - 5760s) + 1) \quad (3.20)$$

- C. Selanjutnya setelah kontribusi air dari teras pertama dan kedua berhenti, maka debit yang terukur pada teras ketiga hanya berasal dari teras ketiga saja dan persamaannya menjadi:

$$Q_3 = Q_{0(t=19860)} e^{-K(t-19860)} \quad (3.21)$$

Hasil simulasi debit dengan ketiga macam persamaan tersebut disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Debit pengukuran (Q3 measure) dan simulasi dari teras ketiga menurut hukum *reservoir linier* (Q3 identiques) dengan memperhitungkan kontribusi teras pertama dan kedua

Figure 5. Discharge measurement (Q3 measure) and simulation of the third terrace, according to the linear reservoir law (Q3 identiques) taking into account contribution of the discharge from the first and second terrace

Terlihat pada Gambar 5, bahwa pemodelan dengan menggunakan hukum *reservoir linier* juga memberikan hasil yang sangat memuaskan pada teras ketiga. Hal ini menunjukkan bahwa model ini selain mampu memperhitungkan adanya kekasapan permukaan pada teras juga dapat mengintegrasikan ada dan tidaknya kontribusi dari teras yang berada di atasnya (sebelumnya). Nilai F (Nash dan Sutcliffe) pada teras ini sebesar 0,97 memberikan keyakinan pada kita bahwa model debit dari teras bertingkat yang diturunkan berdasarkan hukum *reservoir linier* sangat memuaskan.

Untuk menguji lebih jauh model yang dihasilkan, maka dilakukan verifikasi ilmiah persamaan umum debit dari n teras. Ada dua cara untuk melakukannya yaitu: (1) secara matematik dan (2) secara fisik. Secara matematik untuk n menuju ∞ , maka nilai persamaan yang di dalam kurung menurut turunan berseri (*development in series*) sama dengan e^{Kt} , sehingga Q_n sama dengan Q_0 . Dengan kata lain, apabila teras berjumlah ∞ , dan didrainase dari teras pertama menuju kedua dan seterusnya, maka debit pada teras ke n akan sama dengan debit inisialnya. Sedangkan secara fisik di lapangan validasi dapat dilakukan dengan mengambil t menuju ∞ (didrainase terus-menerus), maka nilai e^{-Kt} sama dengan nol, sehingga Q_n sama dengan nol. Artinya apabila teras diatur dengan waktu tak terbatas, maka debit pada setiap teras, termasuk teras ke n akan menjadi nol. Hasil ini menunjukkan persamaan umum debit yang dihasilkan telah tervalidasi.

Pengaruh infiltrasi, evaporasi dan hujan

Untuk memperhitungkan pengaruh infiltrasi, evapotranspirasi dan hujan, dalam proses pemodelan debit sesaat, maka dilakukan pengamatan tinggi muka air di teras dengan kondisi pipa corongan ditutup, sehingga penurunan muka air teras diasumsikan karena evapotranspirasi dan infiltrasi. Selanjutnya besarnya evapotranspirasi dihitung dengan persamaan Lugeon (Ministère de l' Agriculture. 1963).

$$E = 0,398n(Fe - Fa) \frac{273+t}{273} \left(\frac{760}{B - Fe} \right) \quad (3.22)$$

dengan : E laju evaporasi per hari (mm); Fe tekanan uap air jenuh (mm Hg); Fa tekanan uap air jenuh rata-rata (mm Hg); B tekanan barometrik rata-rata (mm Hg); t suhu maksimum rata-rata ($^{\circ}C$) dan n jumlah hari.

Selanjutnya tekanan uap air jenuh dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Duprè (Duchesne, 1995):

$$\log(Fe (T)) = (17,433 - 2735/T - 3,868 \log T) \quad (3.23)$$

dengan T suhu udara (Kelvin) dan $Fe(T)$ dinyatakan dalam *atmosphèr (76 cm Hg)*.

Dengan E dapat dihitung, maka infiltrasi dapat dihitung dari selisih penurunan muka air dikurangi evaporasi. Untuk mengintegrasikan hujan ke dalam persamaan kontinuitas, maka cara yang paling sederhana dapat dilakukan dengan mengasumsikan intensitas hujan konstan, sehingga integrasinya ke dalam persamaan umum debit dari n teras lebih mudah diturunkan.

Hubungan antara peubah dengan persamaan kontinuitasnya dapat disajikan sebagai berikut:

$$EAdt + IAdt + Qdt = -Adh + iAdt \quad (3.24)$$

dengan i intensitas hujan (mm/hari), E evaporasi (mm/hari) I infiltrasi (mm/hari).

Dengan asumsi tersebut, maka persamaan 3.24 dapat ditulis menjadi:

$$-i + E + I + Kh = -\frac{dh}{dt}$$

$$dh = -K \left(h + \frac{I}{K} + \frac{E}{K} - \frac{i}{K} \right) dt$$

Melalui perubahan variabel dh dapat ditulis juga menjadi:

$$dh' = -Kh' dt$$

dengan

$$h' = h + \frac{I}{K} + \frac{E}{K} - \frac{i}{K}$$

Solusi persamaan 3.24 untuk kasus teras identik dengan memperhitungkan intensitas hujan (i) dapat ditulis menjadi:

$$Q_n = Q_0 \exp^{-Kt} \left[\frac{K^{n-1} t^{n-1}}{(n-1)} + \left(\frac{K^{n-2} t^{n-2}}{(n-2)} + \frac{K^{n-3} t^{n-3}}{(n-3)} + 1 \right) \left[1 - \frac{i}{Kh_0} \right] \right] + Ai \quad (3.25)$$

Dengan cara yang sama dapat dilakukan integrasi pengaruh evapotranspirasi (E), infiltrasi (I) dan intensitas hujan (i).

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil validasi debit dari teras pertama, kedua, ketiga dan dibandingkan dengan hasil pengukurannya disimpulkan bahwa hukum *reservoir linier* dapat digunakan untuk memodel persamaan debit dengan hasil yang sangat memuaskan ($F=0,92-0,98$). Sedangkan hukum hidrolis klasik selain hanya bisa digunakan untuk memodel debit dari teras pertama, juga hasil modelingnya berbeda jauh dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangannya ($F=0,54$). Keunggulan model *reservoir linier* dibandingkan hukum hidrolis klasik antara lain terletak pada parameter K (konstanta *reservoir*) yang dapat memperhitungkan perubahan volume air di teras akibat pengaruh kekasaran permukaan, termasuk sifat fisik tanahnya.
2. Validasi matematik dan fisik dari model debit teras ke n menunjukkan bahwa proses transfer air pada teras dapat dijelaskan menurut kaidah hukum-hukum fisika, sehingga model yang dihasilkan bersifat deterministik. Artinya model tersebut dapat diterapkan untuk mensimulasi debit di areal yang ada berteras tanpa melakukan kalibrasi apabila nilai K telah diketahui konstan.
3. Integrasi infiltrasi, evapotranspirasi dan intensitas hujan dapat dengan mudah dikombinasikan dengan persamaan umum debit dari n teras. Hal ini berarti hasil simulasi debit dari n teras dapat ditingkatkan akurasi tanpa mengalami kesulitan dalam integrasi matematikanya.

SARAN

Untuk mengkuantifikasi pengaruh teras terhadap karakteristik hidrologi DAS, maka perlu

dilakukan pemodelan dengan menggunakan kombinasi model hidrolis teras berdasarkan hukum *reservoir linier* dengan model hidrologi DAS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas kerjasama yang baik antara Tim CIRAD (Prpto, Mila dan Sigit) serta Tim .Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor. Untuk semua itu kami mengucapkan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- Albertson, M.I and D.B. Simon. 1964.** Fluid mechanic. *In* Chow (Ed.), Handbook of Applied Hydrology, A Compendium of Water Resources Technology. McGraw-Hill Book Company. New York, United State.
- Chow. V.T 1964.** Runoff. *In* Chow (Ed.), Handbook of Applied Hydrology, A Compendium of Water Resources Technology. McGraw-Hill Book Company. New York, United State.
- Duchesne, J. 1995.** *Cours de thermodynamique.* ENSA de Rennes.
- Irianto, G., J. Duchesne and P. Perez. 1997.** H₂O (hydrogramme unitaire universale): A transfer function model using fractal characteristics of the hydrographic network. p.470-478. *In* McDonald, A.D. and McAleer, M. (Eds.), Proceedings of Modsim 97 (Hobart, 8-11 December 1997). MSSA Canberra, Australia.
- Irianto, G., P. Perez and J. Duchesne. 1999a.** Influence of irrigated terraces on the hydrological response of small basin I: Calibration of the hydraulic model. p. 189-193 *In* Part 1, Proceeding of International Congress on Modelling and Simulation; Modelling the Dynamics of Natural Agriculture, Tourism and Socio-economic Systems. Les Oxley (Ed.). Hamilton, New Zealand, 6th-9th December 1999.
- Irianto, G., P. Perez and J. Duchesne. 1999b.** Influence of irrigated terraces on the hydrological response of small basin ii: Calibration of the hydrological model. p.

- 194-199 *In* Part I, Proceeding of International Congress on Modelling and Simulation; Modelling the Dynamics of Natural Agriculture, Tourism and Socio-economic Systems. Les Oxley (*Ed.*). Hamilton, New Zealand, 6th-9th December 1999.
- Ismail, S. 1998.** Managing water resources sustainably: challenges and solutions for the new millennium. *La houille blanche*. 2: 11-13.
- Ministère de l'Agriculture. 1963.** Retenues colinéaires. La documentation Française. Paris. 135p.
- Neibling, W .H. and A.L. Thompson. 1992.** Terrace design effects inter-terrace sheet and rill erosion. *American Society of Agriculture Engineers*. 35:1473-1481.
- Perez, P., Gatot Irianto, and T. Prasetyo. 1997.** Kali Garang Pilot Project, Research Highlights. CIRAD and CSAR, Bog'or, 21 p.
- Pilion, L. 1992.** Transfert de: la recharge pluviométrique dans un modèle de gestion de nappe : Application au modèle *SIDRA*. Mémoire D.A.A Physique des Surfaces Natureles et Génie Hydrologique, ENSAR. 97p + Annexe.
- Piskounov, N. 1969.** Calcul de différentiel. et intégral. Tome II, 3^{ème} édition et complétée, Edition Mir, Moscou.461p.
- Pruski, F.F., P.A. Ferreira, M.M. Ramos and P.R. Cecon. 1997.** Model to design level terraces. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 1(123):8-12.
- Wu, R.S., W.R. Suc and J.S. Chang. 1997.** A simulation model for investigating the effects of rice paddy fields on runoff system. p.1 :422-427 *In* McDonald, A.D. and McAleer, M (*Eds.*), Proceedings of Modsim 97 (Hobart, 8-11 December 1997). MSSA Canberra, Australia.