

**PEMODELAN DEBIT ALIRAN PERMUKAAN BERDASARKAN
APLIKASI KONSEP HORTON DAN HIDROGRAF SATUAN PADA
DAS MIKRO KERTEK WONOSOBO, JAWA TENGAH**

**(Discharge Run Off Simulation Model Based on Application of Horton's Concept and
Unit Hydrograf on Kertek Micro Watershed , Wonosobo, Central Jawa)**

Budi Kartiwa dan Nani Heryani

Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi

ABSTRACT

Discharge simulation model based on application of Horton's runoff concept for production function and unit hydrograf concept for transfer function were discussed in this paper. There are two methods to calculate Horton's parameter : (1) measurement of infiltration in the field, and (2) parameter optimization based on trial and error analysis on discharge model. Measurement of probability density function (p) from drainage network map has been done to get base hydrograf as a component on transfer function modelling. Discharge simulations on 75 rainfall-discharge episode in Kertek micro watershed (36.17 ha) in December 2000 until December 2001 had been done to test the model. The result of the analysis showed that 31 discharge simulations have a value of efficiency coefficient more than 60 percent.

Key word: Horton's parameter, probability density function, production function, transfer function

ABSTRAK

Makalah ini membahas usulan model simulasi debit berdasarkan aplikasi konsep aliran permukaan menurut Horton untuk fungsi produksi dan konsep hidrograf satuan untuk fungsi transfer. Untuk memperoleh parameter Horton, telah dilakukan dua metode: (1) pengukuran infiltrasi di lapang, serta (2) optimasi parameter berdasarkan analisis *trial and error* pada model debit. Sedangkan untuk mendapatkan hidrograf dasar sebagai komponen dalam pemodelan fungsi transfer, telah dilakukan pengukuran fungsi kerapatan peluang (p) dari peta jaringan drainase. Untuk menguji model, telah dilakukan simulasi debit aliran permukaan terhadap 75 episode hujan-debit DAS Mikro Kertek (36.17 ha) periode Desember 2000 s/d Desember 2001. Dari hasil analisis, didapatkan 31 simulasi debit dengan nilai koefisien efisiensi F di atas 60 persen.

Kata kunci: parameter Horton, fungsi kerapatan peluang, fungsi produksi, fungsi transfer

PENDAHULUAN

Transformasi hujan menjadi debit di titik pelepasan (*outlet*) suatu DAS (Daerah Aliran Sungai) merupakan sebuah proses sangat kompleks. Untuk membuat skema proses tersebut, para hidrolog membaginya menjadi dua bagian: fungsi produksi (*production function/loss function*) dan fungsi transfer (*transfer function*).

Penyerahan naskah: Oktober 2001

Diterima untuk diterbitkan: Desember 2003

Fungsi produksi menyatakan transformasi curah hujan bruto menjadi curah hujan neto (*effective rainfall*) melalui berbagai tahapan proses diantaranya: intersepsi oleh tajuk tanaman, penyimpanan oleh cekungan, evaporasi dan infiltrasi. Dalam pemodelan hujan-debit, semua proses tersebut di atas dianggap sebagai kehilangan input hujan (Cudennec, 1994). Sedangkan fungsi transfer adalah transformasi curah hujan neto menjadi hidrograf debit. Dalam proses ini, hidrograf debit dihitung berdasarkan akumulasi hujan neto yang berasal dari setiap titik di permukaan DAS yang mencapai titik pelepasan DAS menurut fungsi jarak.

Untuk memodel fungsi produksi, akan dibahas aplikasi konsep aliran permukaan menurut Horton (1933). Dalam konsep ini, aliran permukaan diasumsikan dapat terjadi pada saat intensitas hujan telah melampaui kapasitas infiltrasi dan terjadi di seluruh permukaan DAS. Menurut Beven *et al.*, (1979), penerapan konsep aliran permukaan Horton pada pemodelan debit hanya relevan pada daerah yang memiliki intensitas hujan tinggi (daerah tropis). Sedangkan untuk memodel fungsi transfer, akan dibahas aplikasi konsep hidrograf satuan (*unit hydrograph*). Hidrograf satuan adalah suatu hidrograf tipikal dari suatu basin yang merupakan penjumlahan hidrograf-hidrograf dasar. Hidrograf dasar sendiri adalah gambaran teoritik kurva aliran permukaan DAS kecil dan kedap yang mendapatkan input curah hujan yang seragam (Sherman, 1932). Dalam konsep Sherman, hidrograf dasar diturunkan dari hidrograf debit pengukuran dengan memperhitungkan masukan hujan.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Penelitian dilakukan di DAS Mikro Kertek (36.17 ha), Desa Pagerejo, Kec. Kertek, Kab. Wonosobo, Jawa Tengah. Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi data curah hujan dan data debit selang 6 menit periode Desember 2000 s/d Desember 2001, data pengukuran infiltrasi, peta topografi dan peta jaringan drainase skala 1:1000. Peta lokasi penelitian dan peta DAS Mikro Kertek disajikan pada Gambar 1 dan Gambar lampiran 1.

Model Simulasi Debit

Pemodelan Fungsi Produksi

Pemodelan fungsi produksi DAS Mikro Kertek dilakukan berdasarkan aplikasi konsep aliran permukaan menurut Horton. Konsep Horton menyatakan kapasitas infiltrasi sesaat sebagai fungsi waktu menurut persamaan:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

- $f(t)$: kapasitas infiltrasi pada waktu t (mm/menit)
- f_0 : kapasitas infiltrasi awal (mm/menit)
- f_c : kapasitas infiltrasi final (mm/menit)
- k : konstanta (menit⁻¹)
- t : waktu (menit)



Gambar 1. Lokasi penelitian di DAS Mikro Kertek, Wonosobo, Jawa Tengah

Dengan mengintegrasikan persamaan di atas, akan kita dapatkan persamaan untuk menghitung volume infiltrasi (F) pada waktu t :

$$F(t) = f_c \cdot t + (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt})/k$$

Untuk mempermudah perhitungan pada pemodelan fungsi produksi, kita harus mengintegrasikan persamaan infiltrasi sesaat Horton kedalam persamaan di atas sehingga akan diperoleh model matematik yang menghubungkan antara kapasitas infiltrasi sesaat (f) dengan volume infiltrasi (F):

$$f(t) = f_0 - k [F(t) - f_c \cdot t]$$

Persamaan ini dapat menghitung kapasitas infiltrasi sesaat pada semua kondisi baik tanah telah jenuh atau belum sebagai fungsi dari jeluk air yang sudah terinfiltrasi sebelumnya. Berdasarkan persamaan di atas, intensitas hujan neto dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_n(t) = P_b(t) - \{f_0 - k[F(t) - f_c.t]\}$$

Pemodelan Fungsi Transfer
Penurunan Hidrograf Dasar

Berbeda dengan konsep Sherman, yang menurunkan hidrograf dasar dari hidrograf debit pengukuran, dalam makalah ini akan diusulkan metode alternatif penurunan hidrograf dasar dari pengukuran panjang jaringan drainase. Berdasarkan data panjang jaringan drainase untuk setiap titik perwakilan di dalam DAS, dapat dibuat kurva fungsi kerapatan peluang (*probability density function*) yang selanjutnya dapat dianggap sebagai hidrograf dasar.

Untuk menghitung fungsi kerapatan peluang (ρ), terlebih dahulu harus dilakukan spasialisasi DAS menjadi satuan-satuan piksel menggunakan metode grid. Selanjutnya dilakukan pengukuran jarak dari setiap titik pusat piksel tegak lurus kontur hingga pertemuan dengan jaringan drainase (aliran artifial pada lereng (*hillslope*), di sebut L0) dan berlanjut sampai titik pelepasan mengikuti aliran sungai (di sebut L-1, L-2 dan seterusnya sesuai orde sungai).

Sebelum membuat kurva ρ perlu ditetapkan terlebih dahulu selang isokron. Isokron adalah titik-titik di permukaan DAS yang memiliki waktu tempuh sama. Untuk DAS Mikro Kertek, selang isokron ditetapkan 6 menit sesuai dengan selang waktu pengukuran debit dan hujan. Untuk menghitung interval isokron sebagai fungsi jarak tempuh, digunakan persamaan :

$$\Delta I(L) = \bar{V}.t$$

dimana:

- $\Delta I(L)$: interval isokron sebagai fungsi jarak tempuh (m)
- \bar{V} : kecepatan rata-rata aliran (m/detik)
- t : selang waktu pengamatan (360 detik)

Selanjutnya fungsi kerapatan peluang (ρ) dihitung dengan rumus:

$$\rho_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

dimana :

- ρ_i : fungsi kerapatan peluang isokron ke-i [ρ_i setara dengan $\rho(t)$, dalam hal ini $\rho(t)$ berhubungan dengan t (selang waktu pengamatan debit yakni 6 menit)]
- N_i : jumlah jaringan drainase yang terdapat dalam isokron ke-i

Jaringan drainase menunjukkan lintasan air dalam daerah aliran sungai. Jumlah jaringan drainase yang direpresentasikan melalui fungsi kerapatan jaringan drainasenya dapat digunakan sebagai acuan dalam memodifikasi karakteristik hidrologi DAS. Selain itu juga diperlukan dalam rekonstruksi debit untuk pemanfaatan sumber daya air dalam suatu DAS.

Perhitungan debit simulasi

Debit simulasi dihitung melalui rumus sebagai berikut:

$$Q_{sim} = A \cdot P_n(t) * \rho(t)$$

- dimana : Q_{sim} : debit simulasi (m³/detik)
 A : luas DAS (m²)
 $P_n(t) * \rho(t)$: produk konvolusi antara intensitas hujan neto dan fungsi kerapatan peluang

Jika komposisi (suksesi) hujan neto terdiri dari $P_{n0}, P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nN}$ dan komposisi fungsi kerapatan peluang terdiri dari $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M$, maka produk konvolusi $(P_n * \rho)_k$ menjadi:

$$(P_n * \rho)_k = \sum_{j=\max(0, k-M)}^{j=\min(k, N)} P_{n_j} \cdot \rho_{k-j} \quad \text{untuk } k = 0, 1, 2, \dots, M+N$$

Untuk melihat perbedaan antara debit pengukuran dengan debit simulasi, dilakukan perhitungan koefisien efisiensi (F_{eff}) dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{eff} = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{sim} + Q_{obs})^2}$$

- dimana : F_{eff} : Koefisien efisiensi (-0 < F_{eff} <= 1; 1 berarti pemodelan sempurna)
 Q_{sim} : Debit simulasi
 Q_{obs} : Debit pengukuran dengan rerata $\overline{Q_{obs}}$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Infiltrasi

Berdasarkan hasil pengukuran dengan menggunakan *double ring infiltrometer*, diperoleh parameter Horton untuk beberapa tipe penggunaan lahan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter infiltrasi beberapa tipe penggunaan lahan di DAS Mikro Kertek

Tipe Penggunaan Lahan	Parameter Horton		
	fo (mm/menit)	Fc (mm/menit)	k (menit ⁻¹)
- Pekarangan	4.3	1.9	0.189
- Jagung 1	9.1	5.2	0.040
- Singkong	14.1	8.4	0.169
- Teh	16.2	8.7	0.116
- Jagung 2	35.3	14.8	0.636

Keterangan: Jagung1 ditanam di lahan pekarangan (mewakili sebagian kecil jenis tanah), Jagung 2 ditanam pada jenis tanah yang mendominasi DAS.

Berdasarkan data tersebut, dilakukan analisis hujan neto untuk beberapa episode hujan-debit. Hasil analisis menunjukkan bahwa laju infiltrasi selalu lebih tinggi dibanding dengan intensitas hujan. Dengan demikian, konsep aliran permukaan Horton tidak dapat diaplikasikan untuk mensimulasi debit. Ada beberapa hipotesis berkaitan dengan hasil yang diperoleh, diantaranya:

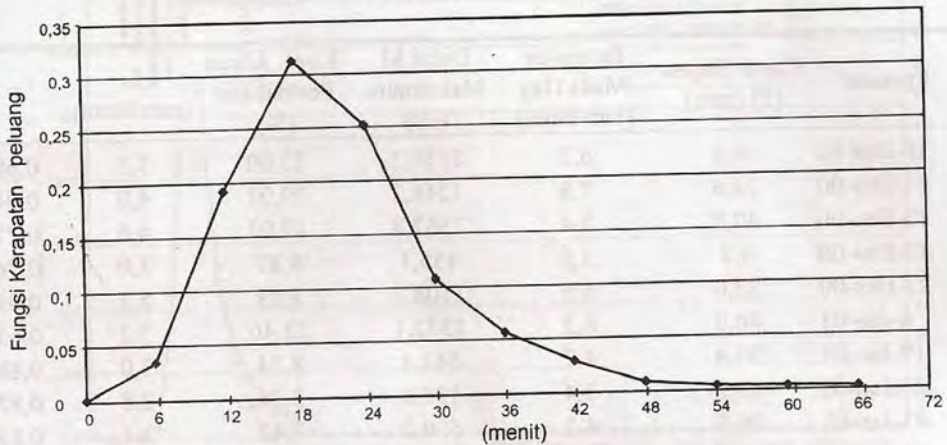
- 1) Pengukuran infiltrasi dengan metode submersi (ring infiltrometer) akan menghasilkan data relatif lebih tinggi dibanding dengan metode dispersi (simulator hujan). Hal ini dikarenakan selama pengukuran infiltrasi dengan ring infiltrometer, selalu terdapat lapisan air dengan ketinggian konstan pada permukaan tanah. Adanya tekanan lapisan air tersebut akan menambah kecepatan laju infiltrasi. Cerdaa (1995) memperoleh bahwa laju infiltrasi yang diukur dengan ring infiltrometer 8 kali lebih tinggi dibanding metode dispersi pada intensitas hujan 55 mm/jam..
- 2) Permukaan DAS memiliki kondisi fisik yang sangat beragam sehingga hasil pengukuran infiltrasi pada skala titik tidak secara mudah dapat langsung diaplikasikan ke dalam skala DAS. Sebagai contoh, pengaruh kemiringan lereng tidak diperhitungkan pada saat pengukuran infiltrasi dengan ring infiltrometer, sedangkan terdapat hubungan yang signifikan antara kemiringan lereng dengan laju infiltrasi. Semakin tinggi tingkat kemiringan lereng, infiltrasi menurun, sebaliknya aliran permukaan meningkat.

Untuk mendapatkan parameter Horton yang dapat diaplikasikan kedalam model fungsi transfer, telah dilakukan uji *trial and error* parameter dalam fungsi produksi. Parameter Horton yang diperoleh dari pengukuran *ring infiltrometer* lebih tinggi dibandingkan hasil *uji trial and error*, variasi nilai *fo* disajikan pada Tabel 2.

Hidrograf Dasar DAS Mikro Kertek

Berdasarkan pengukuran panjang jaringan drainase artifisial pada lereng (L0) dan panjang jaringan sungai, dapat dihitung kurva fungsi kerapatan probabilitas untuk DAS Mikro Kertek seperti yang disajikan pada Gambar 2. Karena terdapat karakteristik permukaan yang berbeda, maka kecepatan aliran ditetapkan berbeda pada lereng dan sungai. Berdasarkan hasil pengukuran aliran sungai Kertek, ditetapkan kecepatan aliran rata-rata sebesar 1.00 m/s. Sedangkan menurut hasil penelitian Dunne (1978) menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada lereng berkisar antara 0.03 dan 0.15 m/s bergantung kepada kemiringan lahan dan tebal aliran. Berdasarkan kondisi lereng DAS mikro Kertek, maka aliran pada lereng ditetapkan sebesar 0.10 m/s.

Dari hasil pengujian didapatkan sebanyak 31 episode dengan koefisien efisiensi di atas 60 persen, nilai $k = 0.01 \text{ menit}^{-1}$, $f_c = 0.05 \text{ mm/6menit}$ dan f_o bervariasi antara 2.3 hingga 7.9 mm/6 menit. Hasil pengukuran parameter Horton (f_o , f_c dan k) dengan uji *trial and error* lebih realistis dibandingkan dengan hasil pengukuran apabila dipergunakan dalam simulasi debit. Ada perbedaan konteks antara parameter Horton yang diukur dengan *ring infiltrometer* dengan parameter hasil optimasi. Parameter yang diukur hanya mewakili satu titik di dalam DAS, sedangkan parameter optimasi merupakan parameter rata-rata yang merepresentasikan kondisi keseluruhan DAS.



Gambar 2. Kurva Fungsi Kerapatan Peluang DAS Mikro Kertek

Berbeda dengan nilai k dan f_c yang selalu sama untuk setiap episode, nilai f_o dari optimisasi model selalu berubah. Hal ini menunjukkan bahwa parameter f_o yang diperoleh dari optimisasi model debit ini sangat tergantung dengan kondisi kelengasan tanah sebelum terjadinya hujan dan juga karakteristik hujan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun telah didapatkan beberapa simulasi debit dengan tingkat kualitas yang nyaris sempurna (12% episode dengan nilai F lebih dari 90%), secara umum dapat dikatakan bahwa model yang diusulkan ternyata masih memiliki beberapa keterbatasan karena dari keseluruhan episode hujan-debit yang dianalisis, hanya diperoleh 41% episode dengan nilai F yang memadai.

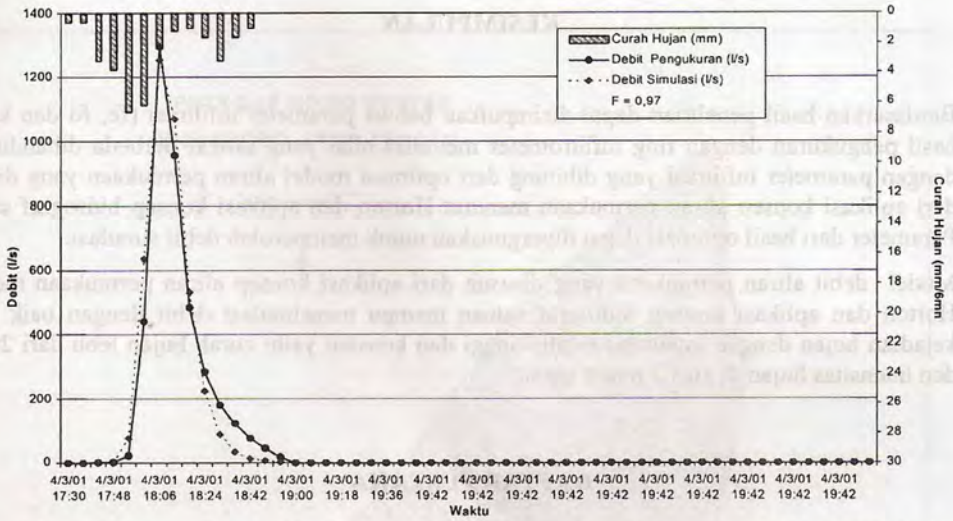
Simulasi Debit Aliran Permukaan

Untuk memperoleh parameter model fungsi produksi, telah dilakukan simulasi debit terhadap 75 episode hujan-debit dengan menetapkan beberapa nilai f_o dan k melalui uji *trial and error* (Tabel 2).

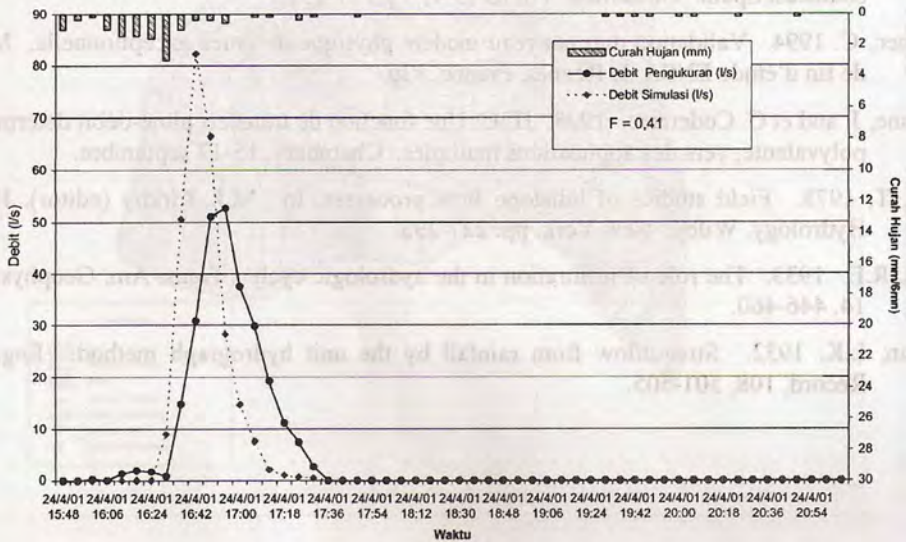
Berdasarkan pengamatan histogram hujan, dapat disimpulkan bahwa model akan mampu mensimulasi debit aliran permukaan dengan baik, apabila intensitas hujan untuk episode terpilih relatif tinggi dan konstan. Untuk kondisi sebaliknya, umumnya hasil simulasi akan menunjukkan puncak debit lebih besar dan kurva resesinya akan menurun lebih cepat dibandingkan dengan debit pengukuran. Gambar 3 dan 4 masing-masing menunjukkan hasil simulasi debit untuk episode hujan dengan intensitas tinggi dan intensitas rendah.

Tabel 2. Karakteristik Hujan, Debit dan parameter Horton DAS Mikro Kertek

No.	Episode	Curah Hujan (P) (mm)	Intensitas Maks (Ix) (mm/6min)	Debit M Maksimum (l/s)	Koef. Aliran Permukaan (%)	fo (mm/6mm)	F
1.	10-Des-00	64,6	6,2	2150,3	23,00	3,5	0,69
2.	11-Des-00	24,6	7,6	1248,2	19,01	4,0	0,94
3.	11-Des-00	47,8	8,4	1562,8	17,03	4,6	0,77
4.	12-Des-00	9,2	3,6	455,1	9,87	3,0	0,76
5.	22-Des-00	32,0	6,8	1108,7	8,29	5,3	0,91
6.	6-Jan-01	40,0	6,2	1372,1	23,46	3,2	0,63
7.	19-Jan-01	30,4	4,2	541,4	8,34	3,0	0,88
8.	20-Jan-01	19,2	3,4	196,0	3,74	2,8	0,82
9.	21-Jan-01	30,8	4,2	550,2	8,42	3,3	0,83
10.	23-Jan-01	30,0	3,6	1008,7	12,83	2,5	0,83
11.	25-Jan-01	39,0	6,8	2275,0	35,20	3,1	0,67
12.	7-Feb-01	22,6	8,8	1119,7	12,50	6,1	0,93
13.	8-Feb-01	51,6	4,4	792,6	12,60	2,9	0,72
14.	25-Feb-01	34,8	6,0	984,8	11,62	4,3	0,92
15.	4-Mar-01	33,0	6,6	1337,2	11,86	4,5	0,97
16.	19-Mar-01	9,0	6,8	194,3	6,38	6,2	0,70
17.	22-Mar-01	30,4	6,2	1180,7	12,67	3,7	0,91
18.	27-Mar-01	56,4	5,8	1427,9	14,01	3,6	0,88
19.	28-Mar-01	28,0	5,4	1770,2	31,20	2,5	0,87
20.	28-Mar-01	16,8	3,6	559,1	11,96	2,3	0,75
21.	29-Mar-01	27,6	8,8	1648,5	16,26	4,4	0,72
22.	12-Apr-01	37,4	4,2	506,3	7,23	3,1	0,63
23.	15-Apr-01	10,8	3,6	107,4	2,24	3,4	0,93
24.	17-Jul-01	27,4	5,2	153,5	2,27	4,7	0,75
25.	28-Sep-01	63,6	10,8	729,0	5,87	7,9	0,63
26.	3-Okt-01	42,0	5,4	548,0	5,54	3,5	0,86
27.	6-Okt-01	31,4	5,6	541,4	6,41	4,7	0,92
28.	20-Okt-01	39,0	3,8	650,5	11,77	2,4	0,71
29.	15-Nop-01	26,8	6,8	845,2	12,04	4,3	0,92
30.	24-Nop-01	23,4	6,2	1078,7	15,00	4,5	0,80
31.	25-Nop-01	56,8	7,8	2336,4	23,73	4,0	0,79



Gambar 3. Debit Pengukuran dan Simulasi DAS Mikro Kertek Episode 4 Maret 2001 ($P=33,0$; $I_x=6,6$; $f_0=4,5$).



Gambar 4. Debit Pengukuran dan Simulasi DAS Mikro Kertek Episode 24 April 2001 ($P=13,4$; $I_x=3$; $f_0=2,8$)

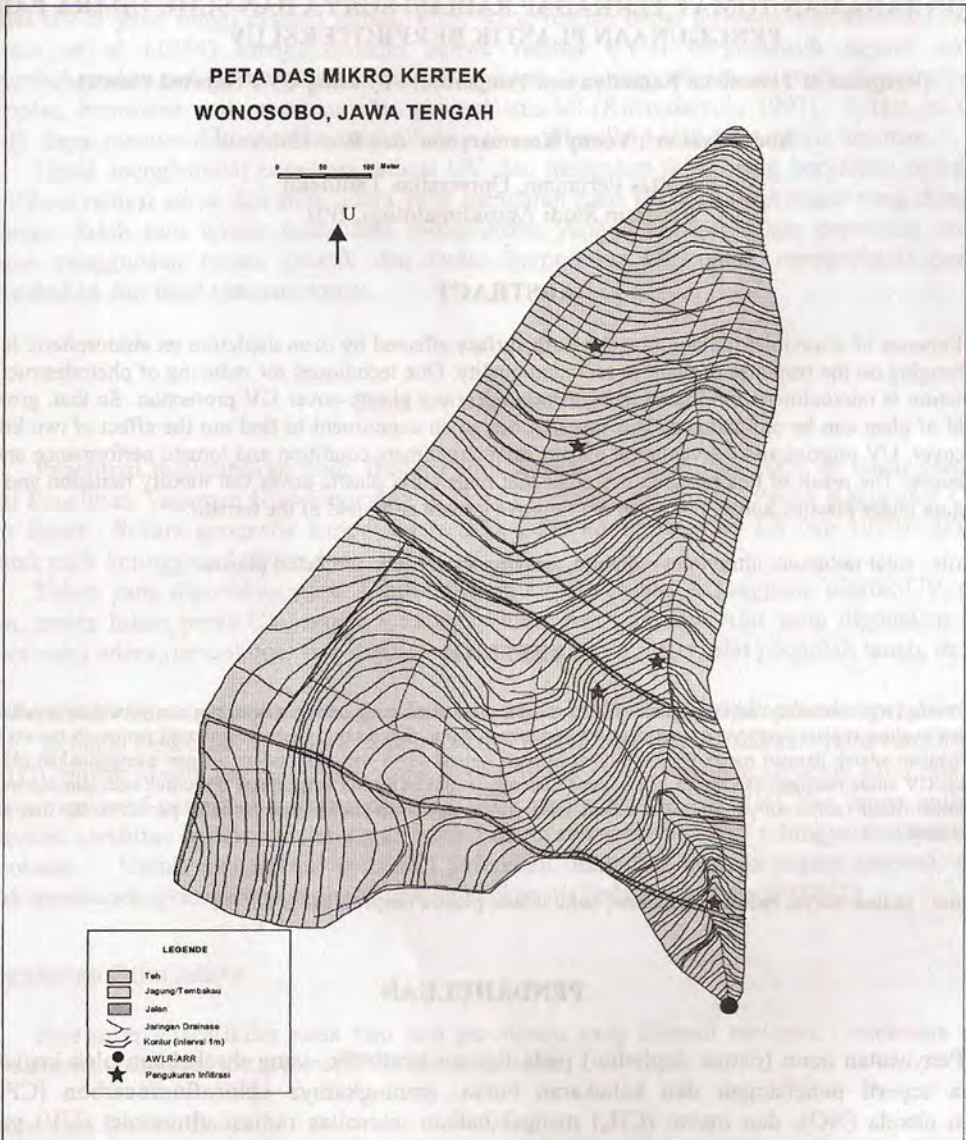
Ketidakmampuan model mensimulasi debit dengan baik untuk episode hujan kecil, terkait dengan salah satu asumsi konsep Horton yang menyatakan bahwa aliran permukaan terjadi pada seluruh permukaan DAS. Untuk kejadian hujan dengan intensitas rendah, kondisi ini sangat sulit terpenuhi. Umumnya aliran permukaan hanya terjadi di beberapa bagian DAS terutama pada kawasan yang dekat dengan jaringan drainase.

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa parameter infiltrasi (f_c , f_o dan k) dari hasil pengukuran dengan ring infiltrometer memiliki nilai yang sangat berbeda dibandingkan dengan parameter infiltrasi yang dihitung dari optimasi model aliran permukaan yang disusun dari aplikasi konsep aliran permukaan menurut Horton dan aplikasi konsep hidrograf satuan. Parameter dari hasil optimasi dapat dipergunakan untuk memperoleh debit simulasi.
2. Model debit aliran permukaan yang disusun dari aplikasi konsep aliran permukaan menurut Horton dan aplikasi konsep hidrograf satuan mampu mensimulasi debit dengan baik untuk kejadian hujan dengan intensitas relatif tinggi dan konstan yaitu curah hujan lebih dari 20 mm dan intensitas hujan di atas 2 mm/6 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1997. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences*. 24 : 1.
- Cerdàa, A. 1995. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope condition in southeast Spain. *Geoderma*. Vol 69 (3-4). Pp 217-232.
- Cudennec, C. 1994. Validation dun nouveau modèle physique de crues exceptionnelle. *Mémoire de fin d'étude ENSA de Rennes, France*. 83p.
- Duchesne, J. and et C. Cudennec. 1998. H2U: Une fonction de transfert pluie-debit deterministe et polyvalente; vers des applications multiples. *Chambery*. 15-17 septembre.
- Dunne, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes. In : M.J. Kirkby (editor). *Hillslope Hydrology*. Wiley. New York. pp. 227-293.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*. 14. 446-460.
- Sherman, L.K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method. *Eng. News-Record*, 108, 501-505.



Keterangan: Nilai interval kontur adalah 1 meter, sedangkan tinggi kontur dihitung relatif terhadap outlet sungai yang dianggap nol

Gambar Lampiran 1. Peta DAS Mikro Kertek