

PENGGABUNGAN METODE O' DONNEL DAN MUSKINGUM-CUNGE UNTUK PENELUSURAN BANJIR PADA JARINGAN SUNGAI

Sobriyah*) dan Sudjarwadi**)

ABSTRACT

Muskingum method of flood routing has some weaknesses. First, to define the value of routing parameters (C_i) are difficult and require upstream and downstream hydrographs at the same time. Second, the lateral inflow has not yet been included. Cunge (1969) developed modification of Muskingum method by adding the physical aspect of stream, therefore it only requires upstream hydrograph. It is also not consider the lateral inflow. O'Donnel (1985) developed another modification of Muskingum method to get C_i value by matrix system and add the lateral inflow. Khan (1993) developed another modification Muskingum method on the stream with some branch, without considering the location of the join between the main stream and the branch. The model in this research combines O'Donnel-Muskingum-Cunge methods that can be applied on river system with branches and only require upstream hydrograph. The model is tested through historical data of Goseng catchment area and the result is satisfactory.

PENDAHULUAN

Penelusuran banjir merupakan hitungan hidrograf banjir di suatu lokasi sungai yang didasarkan pada hidrograf banjir di lokasi lain. Hidrograf banjir dapat ditelusuri lewat palung sungai dengan tujuan : (1) mengetahui hidrograf banjir suatu lokasi yang tidak mempunyai pengamatan muka air, (2) peramalan banjir jangka pendek, (3) perhitungan hidrograf banjir hilir berdasar hidrograf hulu.

Salah satu metode penelusuran banjir secara hidrologi adalah metode Muskingum, yang dikembangkan pertama kali oleh US Army Corp of Engineer dan Mc. Carthy, 1935 (dalam Chow, 1964) untuk penelusuran banjir di sungai Muskingum di negara bagian Ohio, Amerika Serikat. Metode ini menerapkan parameter tampungan (K) dan faktor pembobot X dengan cara konvensional, baru kemudian menetapkan parameter penelusuran (C_i). Dalam penelusuran ini dianggap tidak ada aliran lateral yang masuk.

Cunge, 1969 (dalam Raudkivi, 1979) mengembangkan metode Muskingum untuk penggal sungai tanpa aliran lateral, tetapi mendapatkan nilai parameter penelusuran (C_i) secara langsung. Metode ini membutuhkan data hidrograf *inflow* dan data fisik penggal sungai yang ditinjau.

O' Donnel (1985) mengembangkan penelusuran banjir metode Muskingum untuk penggal sungai tanpa atau dengan adanya aliran lateral dan mendapatkan nilai parameter penelusuran (C_i) secara langsung dengan prosedur matrik. Dalam menentukan nilai C_i ,

metode ini tetap membutuhkan data hidrograf *inflow* dan *outflow*. Ponce (1989) memberikan analisa untuk metode Muskingum-Cunge yang lebih sederhana dibanding dalam Raudkivi (1979). Khan (1993) mengembangkan metode Muskingum untuk sungai yang mempunyai banyak anak sungai. Dalam tulisan ini akan dikembangkan penelusuran banjir dengan metode yang merupakan kombinasi dari O'Donnel dan Muskingum-Cunge untuk jaringan sungai.

Metode Muskingum

Penelusuran banjir metode Muskingum telah diketahui dengan baik, namun akan dijelaskan secara singkat sebagai langkah awal dalam pengembangan pada tulisan ini.

Dalam metode Muskingum, debit *inflow* dan *outflow* pada penggal sungai yang ditinjau (gambar 1) dijelaskan dalam persamaan kontinuitas sbb :

$$I = O + \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

dan dalam persamaan tampungan empirik S dinyatakan sebagai berikut :

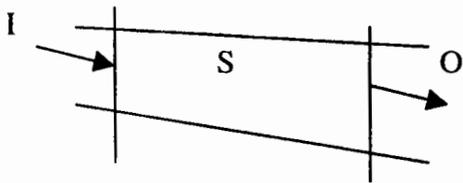
$$S = K [XI - (1 - X) O] \quad (2)$$

dengan :

- I = debit *inflow*,
- O = debit *outflow*,
- S = tampungan,
- K = koefisien tampungan,
- X = faktor pembobot.

*) Sobriyah, Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil FT-UNS

**) Prof. Ir. Sudjarwadi, M.Eng., Ph.D., Guru Besar Jurusan Teknik Sipil FT-UGM

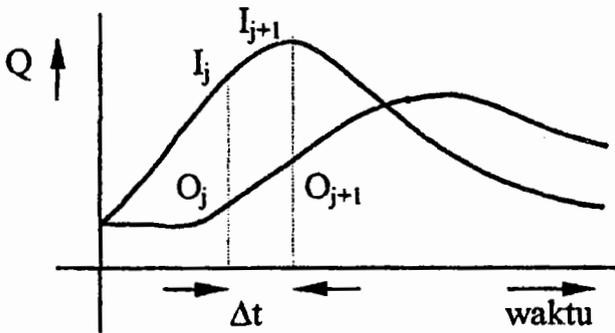


Gambar 1. *Inflow*, tampungan dan *outflow* pada suatu penggal sungai

Persamaan (1) dan (2) dalam bentuk *finite difference* untuk interval waktu Δt , seperti ditunjukkan pada gambar 2, adalah sebagai berikut :

$$O_{j+1} = C_1 I_j + C_2 I_{j+1} + C_3 O_j \quad (3)$$

Persamaan (3), menghitung *outflow* pada akhir interval waktu berdasar *inflow* dan *outflow* pada awal interval dan *inflow* pada akhir interval. Hubungan antara *inflow* dan *outflow* pada *routing* suatu penggal sungai ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Hubungan *inflow* dan *outflow* pada suatu penggal sungai

Koefisien C dalam persamaan (3) diperoleh dari persamaan sbb. :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\Delta t - 2KX}{\Delta t + K(1-X)} \\ C_2 &= \frac{\Delta t - 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)} \\ C_3 &= \frac{-\Delta t - 2K(1-X)}{\Delta t + 2K(1-X)} \\ C_1 + C_2 + C_3 &= 1.0 \end{aligned} \quad (4)$$

Nilai K dan X ditentukan dari data *inflow* dan *outflow* yang masing-masing diamati pada waktu yang

bersamaan. Kedua nilai ini diperoleh dengan metode coba-coba secara grafis (Linsley dkk., 1975; Viesman dkk., 1977; Soemarto, 1987, Ponce, 1989), yaitu penggambaran grafik yang menyatakan hubungan antara S (tampungan) dengan $[X I - (1-X) O]$. Berbagai nilai X dimasukkan sedemikian rupa sehingga didapat garis yang mendekati garis lurus untuk suatu nilai X. Nilai X inilah yang dipilih, sedang nilai K diperoleh dari kemiringan garis tersebut. Pada dasarnya metode Muskingum menggunakan parameter K, X, dan C_i yang diperoleh tidak secara langsung dan tidak memandang adanya aliran lateral.

PENGEMBANGAN METODE MUSKINGUM

Cunge, 1969 (dalam Raudkivi, 1979)

Cunge (1969), menganalisis metode Muskingum dan mengembangkannya. Dinyatakan bahwa pelemahan gelombang banjir yang diperoleh dari metode Muskingum ditimbulkan dari persamaan *finite difference* yang menggantikan persamaan differensial parsial.

Dari persamaan (1) dan (2) diperoleh :

$$K(d/dt)(XQ_j + (1-X)Q_{j+1}) = Q_j - Q_{j+1} \quad (5)$$

dengan :

Q_j = debit *inflow*

Q_{j+1} = debit *outflow*

Dalam bentuk *finite difference* ditulis dengan :

$$\begin{aligned} (K\Delta t)(XQ_j^{n+1} + (1-X)Q_{j+1}^{n+1} - XQ_j^n - (1-X)Q_{j+1}^n) = \\ 0.5(Q_j^{n+1} - Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^n - Q_{j+1}^n) \end{aligned} \quad (6)$$

Jika $K = (\Delta x/v)$ sesuai ketentuan, kemudian persamaan (6) adalah bentuk *finite difference* dari persamaan gelombang kinematik :

$$(\partial Q / \partial t) + v(\partial Q / \partial x) = 0 \quad (7)$$

Cunge menunjukkan (Q_j^n) di dalam batasan ekspansi Taylor dan menunjukkan pula bahwa persamaan (6) juga merupakan sebuah bentuk *finite difference* yang mewakili :

$$(\partial Q / \partial t) + v(\partial Q / \partial x) = \mu(\partial^2 Q / \partial x^2) \quad (8)$$

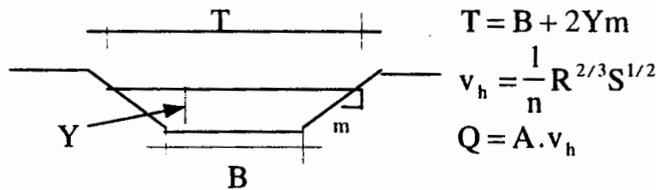
$$\mu = (1/2 - X)v\Delta x$$

$$X = 1/2 - \frac{\alpha \bar{Q}p}{L v \Delta x} \quad (9)$$

dengan :

- L = panjang dari jangkauan yang dibagi ke dalam sub-sub jangkauan Δx ,
- Q_p = rata-rata debit puncak yaitu nilai rata-rata Q_p pada *up stream* dan akhir *down stream* pada suatu jangkauan penelusuran,
- V = kecepatan gelombang banjir = L/T_p ,
- L = panjang total alur sungai,
- T_p = waktu perjalanan puncak debit dari hulu sampai ke hilir.

Jika data hidrograf pengamatan di hulu dan di hilir tersedia, maka nilai T_p dapat ditetapkan. Tetapi bila tidak tersedia data hidrograf pengamatan di hilir, maka kecepatan gelombang banjir dapat didekati dengan persamaan Kleitz Seddan (Chow, 1959).



Kecepatan gelombang banjir didekati dengan persamaan Kleitz Seddan

$$v = \frac{1}{T} \frac{\partial Q}{\partial Y} \quad (10)$$

$$v = \frac{5}{3} v_h - \frac{4}{3} \frac{v_h}{T} R \sqrt{1 + m^2}$$

Nilai \bar{Q}_p dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\bar{Q}_p = Q_p - 1/2 Q^* \quad (11)$$

$$Q^* = \frac{\alpha p}{(L/T_p)^3} Q_p \left| \frac{d^2 Q_p}{dt^2} \right|$$

$$\alpha p = \frac{1}{2} (L/B) (1/S_0)$$

$$\frac{d^2 Q_p}{dt^2} = \frac{Q_{-1} + Q_1 - 2Q_p}{(\Delta t)^2}$$

$\Delta t = 1/5$ waktu puncak

Jika $Q^* \leq 0,1 Q_p$; $v = L/T_p$

$Q^* > 0,1 Q_p$;

maka Q^* ditentukan lagi dengan Q^* baru yaitu :

$$Q^* \text{ baru} = Q_p (1 - \exp(-Q^*/Q_p))$$

$$v = (L/T_p) - (2 \alpha p / L^2) \cdot Q^* \text{ baru}$$

Nilai K dan X dihitung dengan rumus sbb. :

$$K = (\Delta x / v)$$

$$X = 1/2 - (\alpha p / L \Delta x) (\bar{Q}_p / X)$$

Setelah nilai K dan X dihitung, maka hidrograf debit pada akhir jangkauan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n + C_4 \quad (12)$$

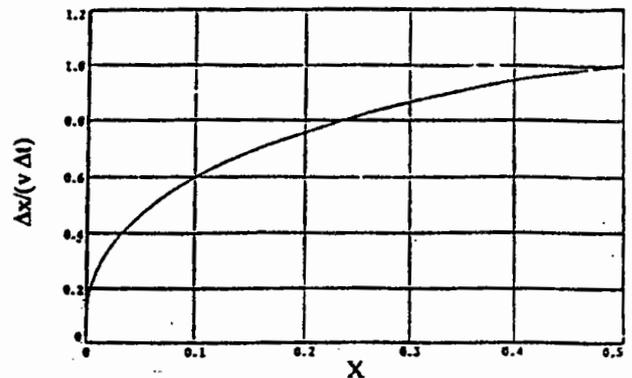
dengan :

$$C_1 = \frac{KX + 1/2 \Delta t}{K(1-X) + 1/2 \Delta t} \quad (12a)$$

$$C_2 = \frac{1/2 \Delta t - KX}{K(1-X) + 1/2 \Delta t} \quad (12b)$$

$$C_3 = \frac{K(1-X)1/2 \Delta t}{K(1-X) + 1/2 \Delta t} \quad (12c)$$

Panjang dari sub jangkauan Δx dan Δt yang terpilih, memberi nilai $\Delta x/(v \Delta t)$ yang harus terletak di bawah kurva seperti ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Kurva $\Delta x/(v \Delta t)$

O'Donnel (1985)

Jika tidak ada aliran lateral, integrasi persamaan (1) untuk seluruh waktu yang dibutuhkan untuk penelusuran banjir pada penggal sungai yang ditinjau akan menghasilkan :

$$\int I dt = \int O dt \quad (13)$$

Persamaan (3), dalam bentuk diskrit, digantikan dengan bentuk penjumlahan sebagai berikut :

$$\sum I = \sum O \quad (14)$$

Jika ada n interval waktu (Δt), maka dapat ditulis n persamaan dari persamaan (3) sbb :

$$\begin{aligned} O_2 &= C_1 I_1 + C_2 I_2 + C_3 O_1 \\ O_3 &= C_1 I_2 + C_2 I_3 + C_3 O_2 \\ &\vdots \\ O_{n+1} &= C_1 I_n + C_2 I_{n+1} + C_3 O_n \end{aligned} \quad (15)$$

Jadi ada n persamaan dengan C_1 , C_2 dan C_3 yang tidak diketahui. Nampak disini bahwa jumlah persamaannya berlebih jika $n > 3$. Oleh karena itu untuk memperoleh nilai C_i dapat diselesaikan secara langsung dan efisien dengan prosedur matrik. Dalam bentuk matrik, persamaan (15) dapat ditulis sbb. :

$$|O_{j+1}| = |I_j \ I_{j+1} \ O_j| \cdot |C_i| \quad (16)$$

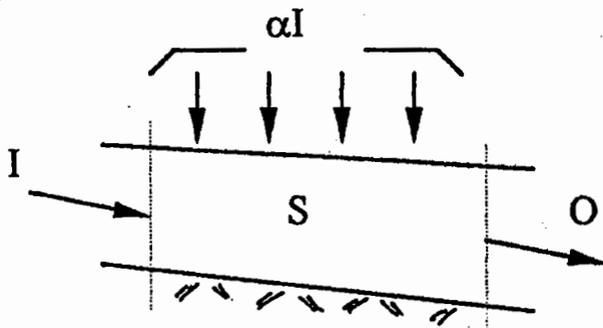
$|P| = |I_j \ I_{j+1} \ O_j|$, merupakan matrik segi empat dengan n baris dan 3 kolom. Kedua sisi persamaan (16) dikalikan dengan $|P|^T$ memberikan persamaan sbb.

$$|P|^T \cdot |O_{j+1}| = |P|^T \cdot |P| \cdot |C_i| \quad (17)$$

$|Q| = |P|^T \cdot |O_{j+1}|$ adalah sebuah vektor dengan 3 elemen dan $|R| = |P|^T \cdot |P|$ adalah sebuah matrik bujur sangkar 3×3 . Jadi dengan adanya data hidrograf *inflow* dan *outflow* nilai C_i dapat dicari dengan

$$|C_i| = |R|^{-1} \cdot |Q| \quad (18)$$

Jika ada aliran lateral, dapat dimodelkan secara sederhana dengan menganggap bahwa laju aliran lateral sebanding dengan laju *inflow* (I). Aliran lateral ini diasumsikan sebesar αI , sebagai ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. *Inflow*, tampungan, *outflow* dan aliran lateral pada suatu penggal sungai

Persamaan kontinuitas (1) dan tampungan (2) kemudian menjadi :

$$I(1 + \alpha) = O + dS / dt \quad (19)$$

dan

$$S = K\{X(1 + \alpha)I + (1 - X)O\} \quad (20)$$

Jika $d_1 = C_1(1 + \alpha)$, $d_2 = C_2(1 + \alpha)$ dan $d_3 = C_3$ maka persamaan 3 dapat ditulis sbb. :

$$O_{j+1} = d_1 I_j + d_2 I_{j+1} + d_3 O_j \quad (21)$$

dengan penyelesaian cara matrik parameter d_i dapat dicari, kemudian nilai α dapat juga diperoleh.

Muskingum-Cunge (dalam Ponce, 1989)

Ponce, 1989, memberikan cara penyelesaian metode Muskingum-Cunge yang cukup sederhana sbb. :

$$O_{j+1} = C_1 I_j + C_2 I_{j+1} + C_3 O_j$$

dengan parameter penelusuran adalah sbb. :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{v(\Delta t / \Delta x) + 2X}{2(1 - X) + v(\Delta t / \Delta x)} \\ C_2 &= \frac{2(1 - X) - v(\Delta t / \Delta x)}{2(1 - X) + v(\Delta t / \Delta x)} \\ C_3 &= \frac{v(\Delta t / \Delta x) - 2X}{2(1 - X) + v(\Delta t / \Delta x)} \end{aligned} \quad (22)$$

Persamaan (22) sama dengan persamaan (4), yaitu dengan menetapkan nilai $K = \Delta x / v$, dengan $v =$ kecepatan gelombang kinematik. Dengan demikian K adalah waktu perjalanan yang dibutuhkan gelombang banjir pada jarak Δx , dengan kecepatan gelombang kinematik v . Pada model linier v konstan.

Pada kenyataannya, diffusi numerik dapat digunakan untuk mensimulasikan diffusi fisik dan gelombang banjir. Dengan ekspansi fungsi diskrit $Q(j\Delta, n\Delta t)$ dalam deret Taylor, koefisien diffusi numerik skema Muskingum adalah :

$$v_n = v \Delta x (0.5 - X) \quad (23)$$

dengan :

$$v_n = \text{koefisien diffusi numerik skema Muskingum.}$$

Persamaan (23) menunjukkan bahwa (1) untuk $X = 0.5$ maka tidak ada diffusi numerik, (2) untuk $X > 0.5$

koefisien difusi numerik negatif, (3) untuk $\Delta x = 0$ koefisien difusi numerik = 0.

Difusi hidrolik dipengaruhi oleh karakteristik aliran dan saluran yang didefinisikan sbb. :

$$v_h = \frac{Q}{2TS_0} = \frac{q_0}{2S_0} \quad (24)$$

dengan :

- $q_0 = Q/T =$ debit aliran per unit lebar saluran
- $Q =$ debit saluran
- $T =$ lebar atas saluran
- $S_0 =$ kemiringan dasar saluran

Untuk mendapatkan persamaan yang dapat memperkirakan nilai X , maka dianggap difusi hidrolik sama dengan difusi numerik, $v_n = v_h$, maka diperoleh persamaan sbb. :

$$X = 0.5 \left(1 - \frac{q_0}{S_0 v \Delta x} \right) \quad (25)$$

Angka *courant* (cr) ditetapkan sebagai hasil dari perkalian antara kecepatan gelombang kinematik dan $\Delta t/\Delta x$.

$$cr = v \Delta t/\Delta x \quad (26)$$

Angka Reynold cell (D) ditetapkan sebagai berikut :

$$D = \frac{q_0}{S_0 v \Delta x} \quad (27)$$

sehingga akan didapatkan :

$$X = 0.5 (1-D) \quad (28)$$

Substitusi persamaan (26) dan persamaan (28) ke dalam persamaan (22) diperoleh persamaan penelusuran sbb. :

$$C_1 = \frac{1+cr-D}{1+cr+D}$$

$$C_2 = \frac{1-cr+D}{1+cr+D} \quad (29)$$

$$C_3 = \frac{-1+cr+D}{1+cr+D}$$

Penetapan kecepatan gelombang dapat dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$v = \beta v_r \quad (30)$$

dengan :

- $\beta =$ konstanta (untuk aliran turbulen $\beta = 5/3$)
- $v_r =$ kecepatan aliran rata-rata

Kecepatan gelombang dapat juga dihitung dengan rumus Kleitz Seddan seperti uraian pada metode Cunge (dalam Raudkivi) di atas.

PENGEMBANGAN MODEL DALAM PENELITIAN INI

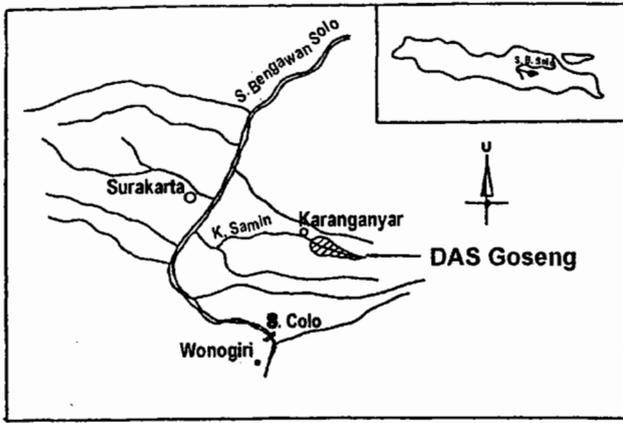
Model Hasil Kombinasi O'Donnel dan Muskingum Cunge

Pada penelitian ini dicoba penerapan Kombinasi O'Donnel dan Muskingum Cunge pada suatu jaringan sungai. O'Donnel menganggap bahwa routing banjir pada suatu penggal sungai, jika ada aliran lateral yang masuk, pertambahan aliran lateral sebesar αI dapat langsung dijumlahkan pada aliran masukan (I) sehingga menjadi $I(1 + \alpha)$. Analog dengan anggapan ini, hidrograf aliran sungai bagian hilir dari pertemuan sungai dengan anak sungai, sama dengan penjumlahan hidrograf aliran sungai dan anak sungai pada titik pertemuan tersebut. Rumus-rumus yang digunakan sama dengan penelusuran banjir cara Muskingum-Cunge pada suatu penggal sungai. Model penelusuran banjir yang dikembangkan ini membutuhkan data sebagai berikut :

- a. Peta topografi Daerah Aliran Sungai (DAS), untuk mendapatkan sistem jaringan sungai yang akan dianalisis, panjang dan kemiringan rerata sungai dan anak-anak sungainya,
- b. Data geometri sungai dan anak – anak sungai pada titik-titik tinjauan,
- c. Data aliran anak-anak sungai yang berasal dari sub DAS – sub DAS yang masuk ke jaringan sungai.
- d. Jika data aliran dari sub DAS – sub DAS tidak diperoleh, maka dibutuhkan data hujan pada suatu kejadian yang dikehendaki.

Terapan Model yang Dikembangkan

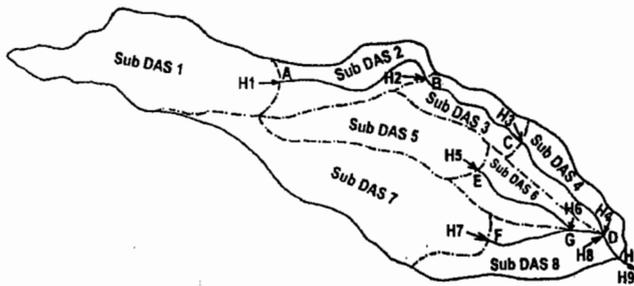
Penggabungan model O'Donnel dan Muskingum Cunge ini dicoba penerapannya pada DAS Goseng, yang merupakan sub DAS Bengawan Solo, terletak di $7^{\circ}39'32'' - 7^{\circ}45'08''$ LS dan $110^{\circ}59'02'' - 111^{\circ}2'15''$ BT. Letak DAS Goseng ditunjukkan pada gambar 6. Luas DAS Goseng = $5,96 \text{ km}^2$. Pada DAS ini hanya terdapat satu stasiun hujan otomatis (ARR).



Gambar 6. Peta letak DAS Goseng

a. Langkah Pokok Hitungan

Untuk menentukan langkah-langkah hitungan penelusuran banjir pada DAS Goseng terlebih dahulu dibuat skema jaringan sungai yang ada seperti ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Skema jaringan sungai DAS Goseng

Berhubung tidak adanya stasiun AWLR pada anak-anak sungai yang memberi masukan pada jaringan sungai, maka dilakukan pengalihragaman hujan menjadi aliran dari sub DAS-sub DAS yang ada. Hitungan ini dapat dilakukan dengan metode yang telah dikenal, misalnya metode Rasional dan sistem grid (Sobriyah dan Sudjarwadi, 1998) yang dapat menghasilkan hidrograf aliran di titik-titik A sampai G. Berdasarkan hasil hitungan ini, penelusuran pada suatu sistem sungai, sebagai ditunjukkan pada gambar 7, dapat dilakukan sebagai berikut :

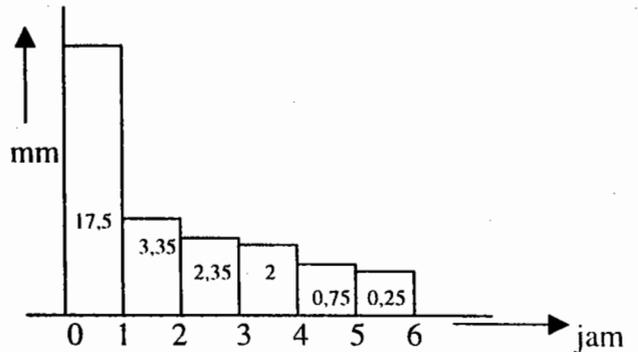
- 1). Hidrograf aliran dari sub DAS 1 (H1) menelusur dari titik A ke titik B menghasilkan hidrograf H1'. Sampai titik B, ada masukan hidrograf aliran dari sub DAS 2 (H2), kemudian kedua hidrograf ini dijumlahkan, menghasilkan hidrograf H2'.
- 2). Penelusuran banjir hidrograf H2' dari titik B ke titik C menghasilkan hidrograf H2'' yang

mendapat masukan aliran dari sub DAS 3 (H3). Hasil penjumlahan H2'' dan H3 mendapatkan hidrograf H3'.

- 3). Penelusuran banjir hidrograf H3' dari titik C ke titik D menghasilkan H3''.
- 4). Penelusuran banjir pada anak sungai yang lain dimulai dari hidrograf sub DAS 5 (H5), dari titik E ke titik G yang menghasilkan hidrograf H5'
- 4). Hidrograf sub DAS 7 (H7) menelusur dari titik F ke titik G, menghasilkan hidrograf H7'. Di titik G hidrograf H6 (hidrograf aliran dari sub DAS 6) dijumlahkan dengan H5' dan H7', menghasilkan hidrograf H7''.
- 5). Hidrograf H7'' kemudian menelusur dari titik G sampai ke titik D, menghasilkan hidrograf H8'. Di titik D, hidrograf H8' mendapat masukan hidrograf H8 (dari sub DAS 8), H4 (dari sub DAS 4) dan hidrograf H3''. Keempat hidrograf ini dijumlahkan menghasilkan hidrograf H8''.
- 6). Penelusuran hidrograf H8'' dari titik D ke titik H merupakan penelusuran yang terakhir dari sistem sungai ini dengan hasil hidrograf H9 yang merupakan *outflow* pada jaringan sungai tersebut dengan kejadian hujan terpilih.

b. Hasil Hitungan

Untuk penerapan model ini dipilih kejadian hujan pada tanggal 20 November 1983 dengan distribusi hujan yang ditunjukkan pada gambar 8 sbb.:



Gambar 8. Distribusi hujan pada tanggal 20 November 1983

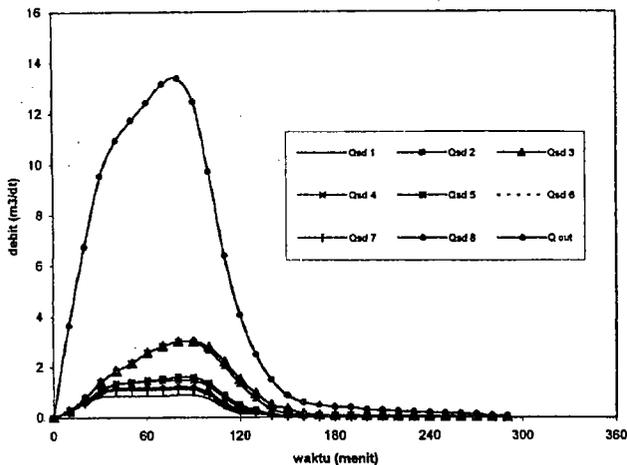
Hasil perhitungan metode Rasional dan sistem grid dari sub DAS – sub DAS dan penelusuran banjir metode penggabungan O'Donnel dan Muskingum Cunge di DAS Goseng ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Hidrograf aliran sub DAS – sub DAS di DAS Goseng

T Mnt	Qsd 1 m ³ /dt	Qsd 2 m ³ /dt	Qsd 3 m ³ /dt	Qsd 4 m ³ /dt	Qsd 5 m ³ /dt	Qsd 6 m ³ /dt	Qsd 7 m ³ /dt	Qsd 8 m ³ /dt	Q out M ³ /dt
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.254	0.282	0.282	0.254	0.282	0.254	0.254	0.254	3.639
20	0.282	0.654	0.775	0.624	0.775	0.582	0.582	0.582	6.754
30	0.834	1.114	1.395	1.0825	1.395	0.986	0.986	0.986	9.538
40	0.853	1.337	1.838	1.307	1.838	1.112	1.084	1.166	10.931
50	0.857	1.403	2.150	1.374	2.150	1.116	1.088	1.176	11.725
60	0.863	1.466	2.561	1.436	2.561	1.122	1.094	1.182	12.424
70	0.866	1.526	2.822	1.469	2.822	1.126	1.097	1.186	13.158
80	0.890	1.606	3.004	1.493	3.004	1.155	1.127	1.215	13.392
90	0.876	1.592	3.002	1.464	2.988	1.130	1.102	1.190	12.470
100	0.753	1.344	2.796	1.245	2.656	0.941	0.912	1.002	9.730
110	0.390	0.887	2.211	0.787	2.004	0.543	0.513	0.572	6.405
120	0.164	0.500	1.522	0.401	1.333	0.297	0.268	0.320	4.053
130	0.139	0.303	0.956	0.231	0.767	0.194	0.165	0.217	2.492
140	0.083	0.147	0.510	0.126	0.321	0.095	0.093	0.118	1.491
150	0.056	0.092	0.348	0.085	0.173	0.067	0.066	0.077	0.865
160	0.041	0.067	0.160	0.066	0.111	0.047	0.047	0.057	0.591
170	0.037	0.061	0.118	0.06	0.095	0.043	0.043	0.052	0.499
180	0.035	0.051	0.088	0.051	0.088	0.040	0.040	0.042	0.418
190	0.027	0.045	0.085	0.045	0.085	0.032	0.032	0.035	0.396
200	0.020	0.038	0.081	0.038	0.081	0.025	0.025	0.026	0.312
210	0.014	0.031	0.075	0.030	0.075	0.019	0.019	0.019	0.285
220	0.009	0.025	0.067	0.024	0.067	0.014	0.014	0.015	0.246
230	0.008	0.024	0.064	0.021	0.064	0.013	0.012	0.014	0.225
240	0.005	0.020	0.057	0.017	0.057	0.012	0.008	0.010	0.189
250	0.0	0.017	0.049	0.012	0.049	0.011	0.007	0.010	0.166
260		0.015	0.039	0.010	0.039	0.009	0.006	0.008	0.152
270		0.013	0.034	0.008	0.034	0.007	0.005	0.007	0.130
280		0.011	0.029	0.007	0.028	0.006	0.0	0.006	0.080
290		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.064
300									0.038
310									0.032
320									0.032
330									0.011
340									0.006
350									0.0

Qsd 1 = debit aliran dari sub DAS 1.

Hasil perhitungan memberikan volume total aliran yang masuk ke jaringan sungai dari sub DAS-sub DAS = 77949,55 m³. Volume aliran keluaran di titik tinjau = 75080,13 m³. Perbedaan volumenya = 3.68 %. Hidrograf aliran dari sub DAS-sub DAS dan hidrograf keluaran di titik tinjau ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Hidrograf dari sub DAS-sub DAS dan hidrograf keluaran di titik tinjau

PEMBAHASAN

Metode Muskingum (yang secara luas telah digunakan, mempunyai kelebihan dalam pemakaiannya, yaitu tidak membutuhkan data geometri sungai, yang kadang-kadang belum tersedia, terlebih untuk anak-anak sungai yang relatif kecil. Jika data ini akan diukur langsung di lapangan akan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Data yang dibutuhkan hanya hidrograf aliran di hulu dan di hilir. Data ini untuk menentukan nilai parameter C_i , yang diperoleh tidak secara langsung, namun menetapkan koefisien tampungan (K) dan faktor pembobot (X) terlebih dahulu dengan cara *trial and error*. Selanjutnya jika C_i telah diperoleh, nilai ini dapat untuk memperkirakan hidrograf di hilir jika hidrograf di hulu diketahui. Pengaruh aliran lateral pada penggal sungai yang ditinjau, tidak dipandang.

Cunge, 1969 (dalam Raudkivi, 1979) mengembangkan metode Muskingum dengan memasukkan prinsip hidrolika dalam analisisnya. Metode Muskingum-Cunge membutuhkan data hidrograf aliran di hulu dan data geometri penggal sungai yang ditinjau. Metode ini tidak hanya menghasilkan hidrograf aliran di akhir penggal sungai yang ditinjau, tetapi dapat menghasilkan hidrograf

aliran di titik-titik yang ditetapkan dalam penggal sungai tersebut. Namun metode ini juga belum memandang adanya aliran lateral.

O'Donnel (1985), mengembangkan metode Muskingum untuk mendapatkan nilai parameter C_i secara langsung dengan cara matrik. Metode ini cukup memudahkan pemakai karena tidak usah melakukan *trial and error* dalam menentukan K dan X , tetapi langsung menghitung nilai C_i , terlebih jika dilakukan dengan program komputer. Pada metode ini, aliran lateral telah dimodelkan secara sederhana dengan memperkirakan bahwa laju aliran lateral sebanding dengan laju *inflow* (I), yaitu sebesar αI . Selanjutnya perhitungan nilai C_i analog dengan penelusuran banjir tanpa adanya aliran lateral. Metode Muskingum-O'Donnel tidak memasukkan parameter geometri sungai, sehingga membutuhkan data hidrograf aliran di hulu dan hilir penggal sungai yang ditinjau. Hasil perhitungan adalah hidrograf aliran di hilir sehingga tidak dapat memperkirakan hidrograf aliran di titik-titik di sepanjang penggal sungai yang ditinjau.

Ponce (1989), mengembangkan metode Muskingum-Cunge dengan prinsip yang sama, namun memberikan analisa yang cukup sederhana sehingga memudahkan pemakai. Dalam metode ini tidak ada persyaratan bahwa $\Delta x/(v\Delta t)$ harus terletak dibawak kurva hubungan antara $\Delta x/(v\Delta t)$ dan X sehingga nilai C_i dapat langsung dihitung. Data yang digunakan adalah hidrograf aliran di hulu dan geometri sungai. Hasil perhitungannya adalah hidrograf aliran di hilir maupun di titik-titik di sepanjang penggal sungai yang ditinjau.

Penelitian ini menganalisis penelusuran banjir pada jaringan sungai dengan mengkombinasikan metode Muskingum-Cunge dan O'Donnel. Jadi parameter geometri sungai dimasukkan dalam analisis dan tidak memerlukan hidrograf aliran di hilir. Oleh karena itu metode ini dapat dipergunakan untuk penelusuran banjir dengan masukan hidrograf aliran yang dihasilkan dari sub DAS-sub DAS yang masuk anak-anak sungai, penelusuran banjir di anak-anak sungai baru kemudian masuk sungai utama, penelusuran di sungai utama yang akhirnya memberikan hidrograf aliran di titik yang ditinjau.

Hasil analisis menunjukkan bahwa penelusuran banjir dengan penggabungan metode O'Donnel dan Muskingum Cunge pada jaringan sungai DAS goseng memberikan hasil yang cukup baik. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan antara volume total hidrograf masukan dari sub DAS-sub DAS dan volume hidrograf keluaran cukup kecil, yaitu sebesar 3,68 %.

Waktu puncak antara hidrograf aliran dari sub DAS-sub DAS dan hidrograf keluaran hampir sama. Hal ini diperkirakan karena kemiringan sungai yang terjal yaitu antara 0,01 – 0.0294 dan sungainya cukup pendek, dengan panjang total 6,07 km.

KESIMPULAN

1. Model penelusuran banjir pada system sungai yang merupakan kombinasi dari metode Muskingum-Cunge dan O'Donnel dapat diterapkan pada kondisi DAS Goseng dengan hasil yang cukup memuaskan.
2. Perbedaan volume *inflow* total dari anak-anak sungai dan *outflow* cukup kecil, yaitu sebesar 3,68%.
3. Keuntungan dari Model ini tidak memerlukan data hidrograf di hilir dan sudah mempertimbangkan data geometri sungai, sehingga lebih mendekati kenyataan di lapangan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini mendapat dukungan data dari Balai Teknologi Pengelolaan DAS Bengawan Solo di Pabelan Surakarta. Untuk itu kami mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Pimpinan BTP DAS Bengawan Solo dan seluruh staf di bagian Hidrologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Chow, V.T., 1959, *Open Channel Hydraulics*, Mc.Graw Hill Book Company, New York.
- Chow, V.T., 1964, *Handbook of Applied Hydrology*, Mc.Graw Hill Book Company, New York.
- Khan M.H., 1993, *Muskingum Flood Routing Model for Multiple Tributaries*, Water Resources Research, Vol. 29, No. 4, hal 1057 - 1062.
- Linsley R.K., Kohler and Paulhus, 1982, *Hydrology for Engineers*, Mc. Graw-Hill, New York.
- O'Donnel T., 1985, *A Direct Three-parameter Muskingum Procedure Incorporating Lateral Inflow*, Hydrological Sciences Journal, Vol. 30, No. 4, hal 479 - 496.
- Ponce V. M., 1989, *Engineering Hydrology Principles and Practices*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Raudkivi, A.J., 1979, *Hydrology*, Pergamon Press, New York.
- Sobriyah dan Sudjarwadi, 1998, *Unjuk Hasil Model Hujan Aliran berbasis Rumus Rasional dan Sistem Grid*, PIT dan Konggres HATHI, Bandung
- Soemarto, CD., 1987, *Hidrologi Teknik*, Usaha Nasional, Surabaya
- Viessman W., Knapp J.W., and Harbaugh T.E., 1977, *Introduction to Hydrology*, Harper & Row Publishers, New York.