

MODEL PEMBATAAN BEBAN PENCEMAR UNTUK PENGELOLAAN KUALITAS SUNGAI CITARUM

Oleh : Eko Harsono, Tuahta Tarigan dan Hendro Wibowo *)

Abstrak

Daerah tangkapan (DAS) Citarum hulu mempunyai luas sekitar 177.100 ha, meliputi kota Bandung dan kabupaten Bandung yang terletak di danau tua. Sungai Citarum selain kegunaannya sebagai buangan limbah pabrik dan penduduk disekitar sungai, juga berfungsi sebagai penggerak listrik dan perikanan (jarring apung) di waduk Saguling dihilinya. Oleh karena kompleksnya pemanfaatan sungai ini, maka diperlukan suatu pendekatan pengelolaan di DAS Citarum tersebut. Penelitian ini tujuannya adalah untuk memperbaiki kualitas sungai Citarum dengan pendekatan simulasi model, yaitu simulasi-simulasi pengelolaan DAS Citarum. Penetapan model dengan tiga sub-model yaitu, hidrograf aliran, debit beban (COD, BOD, T-N, T-P, and NH_3), dan polutograf aliran dengan model tangki. Model dikalibrasi dari debit serta kualitas air harian sungai Citarum yang terukur di stasiun Nanjung. Dari model kelihatan hidrograf dan polutograf aliran, cenderung sama antara model dengan pengukuran, sehingga model layak untuk pendugaan pemasukan beban yang kualitas sungai masih baik pada debit minimum. Dari hasil simulasi agar kualitasnya tetap terjaga, maka beban masukan dari industri terutama tekstil dan pemukiman sebaiknya dikurangi (treatment) sekitar 85 % untuk COD, BOD dan T-P dan 45 % untuk NH_3 dan T-N untuk pemukiman pada kejadian debit minimum

Katakunci: Kualitas air, Debit beban, Model, Hydrograf dan Polutograf

1. PENDAHULUAN

Daerah aliran sungai (*Watershed*) Citarum terletak di danau tua Bandung meliputi kota Bandung dan kabupaten Bandung. Dari DAS tersebut terdapat Sungai Citarum yang mengalir melewati kota dan kabupaten Bandung dan merupakan sumber utama waduk Saguling, Cirata dan Jatiluhur (digunakan untuk pembangkit tenaga listrik, perikanan dan jasa tirta). Sungai Citarum hulu merupakan sumber air potensial yang sangat penting bagi perkembangan kota dan kabupaten Bandung. Sungai ini juga digunakan sebagai penerima buangan limbah penduduk, industri dan pertanian (non-point sources), seperti organik karbon dan nitrogen. Sehingga dari buangan tersebut terganggunya flora dan fauna karena menurunnya oksigen terlarut (DO) di badan sungai¹⁾, konsentrasi DO kurang dari 2 mg/L akan menghambat pertumbuhan bakteri dan akan terjadi proses oksidasi yaitu NH_3 menjadi NO_2 dan NO_3 . Situasi ini akan menyebabkan kemungkinan terjadinya pencemaran NH_3 melebihi dari nilai BOD dan COD.

Walaupun telah ditetapkan dengan program kali bersih (PROKASIH) sejak tahun

1989, bahwa sungai Citarum telah ditetapkan peruntukkannya sebagai perikanan tetapi kualitasnya tetap menurun^{2,3,4)}, menurunnya kualitas sungai Citarum ditandai dengan terjadinya eutrofikasi sehingga seringnya kematian ikan di ketiga waduk (Saguling, Cirata dan Jatiluhur). Selain itu yang tidak kalah penting, dikawasan hulu (Gunung Wayang) telah terjadi pengurangan areal hutan, sehingga meningkatnya pencemaran disepanjang badan sungai yang pada akhirnya terjadinya penurunan kualitas dan kuantitas air sungai maupun peningkatan erosi dan sedimentasi. Berbagai kegiatan penduduk disepanjang bantaran sungai Citarum juga secara langsung maupun tidak langsung sangat berpengaruh terhadap badan sungai. Oleh karena itu, pengelolaan DAS Citarum perlu dilakukan, diantara alat yang digunakan sebagai menangani permasalahan ini yaitu dengan model. Dengan simulasi dan berbagai skenario diharapkan model ini dapat memprediksi seberapa besar persentase beban pencemar karbon organik yang masuk ke badan sungai Citarum yang kualitasnya masih dalam ambang batas untuk peruntukkannya.

*) Pusat Penelitian Limnologi- LIPI

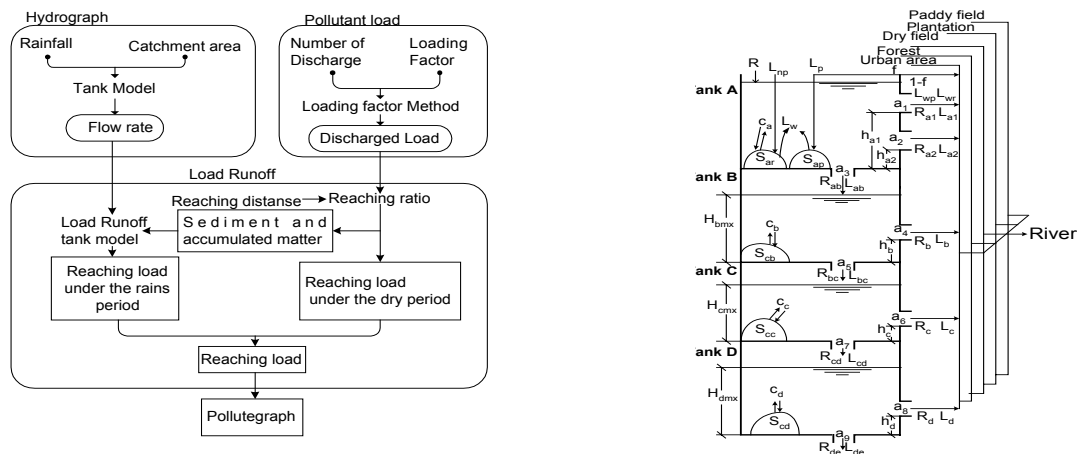
2. BAHAN DAN METODE

Model ini terdiri dari 3 sub model (Gambar 1), yaitu hidrograph aliran yang dihasilkan oleh model tangki, perkiraan beban

(COD, BOD₅, T-N, T-P, and NH₃) menggunakan metode factor beban dan polutograf yang dihasilkan dari model tangki. Adapun parameter-parameter satuan beban yang digunakan dalam model tersaji di (Tabel 1).

Tabel 1. Faktor Satuan Beban Dalam Model

Sumber	Q _{eff}	BOD	COD	T-N	T-P	NH ₃
Domestik	160 L/hari/	180 mg/L	250 mg/L	50 mg/L	20 mg/L	28 mg/L
Pabrik :						
Textil	200 m ³ /ton prod.	800 mg/L	1000 mg/L	80 mg/L	20 mg/L	-
Produksi kulit	0.42 m ³ /ton prod.	800 mg/L	1000 mg/L	30 mg/L	1.5 mg/L	-
Teh	0.035 m ³ /ton prod.	2.2 mg/L	2.5 mg/L	0.87 mg/L	0.35 mg/L	-
Peralatan elektronik	0.035 m ³ /ton prod.	2.2 mg/L	2.5 mg/L	0.87 mg/L	0.35 mg/L	-
Garment	0.035 m ³ /ton prod.	2.2 mg/L	2.5 mg/L	0.87 mg/L	0.35 mg/L	-
Penggunaan lahan	Satuan					
Wilayah terbangun	kg/ha/thn	187	200	19.7	2.7	-
Hutan	kg/ha/thn	-	21.5	3.6	0.3	-
Perkebunan	kg/ha/thn	-	15.5	76.0	1.9	-
Ladang	kg/ha/thn	-	10.3	76.0	0.68	-
Sawah	kg/ha/thn	-	21.3	49.8	2.02	-



Gambar 1. Diagram Alir Model Tangki Untuk Hydrograph Dan Polutograph

Rumus dasar model ini dapat digambarkan sebagai berikut :

Hidrograf Aliran

Laju aliran dari tangki A

$H_a = f.R.\Delta t - (1 - s) .E. \Delta t$. If $H_a > h_{a1}$, di mana $R_{a1} = a_1 .(H_a - h_{a1}). \Delta t$, dan $R_{a2} = a_2 (H_a - h_{a2}) . \Delta t$, $R_a = R_{a1} + R_{a2}$. jika $h_{a2} < H_a \leq h_{a1}$, maka $R_{a1} = 0$, bila $R_{a2} = a_2 (H_a - h_{a2}) \Delta t$, maka $R_a = R_{a1} + R_{a2}$ jika $H_a \leq h_{a2}$, maka $R_a = 0$, $R_{ab} = a_3 . H_a$ dan $H_a = H_a - R_a . \Delta t - R_{a0} . \Delta t$.

Laju aliran dari tangki B

jika $H_b > h_b$, $R_b = a_4 (H_b - h_b). \Delta t$. dan bila $H_b \leq h_b$, maka $R_b = 0$. $R_{bc} = a_5 . H_b$ dan $H_b = H_b - R_b . \Delta t - R_{b0} . \Delta t$.

Laju aliran dari tangki C

jika $H_c > h_c$, $R_c = a_6 (H_c - h_c). \Delta t$. dan bila $H_c \leq h_c$, maka $R_c = 0$ $R_{cd} = a_7 . H_c$, dan $H_c = H_c - R_c . \Delta t - R_{c0} . \Delta t$.

Laju aliran dari tangki D

jika $H_d > h_d$, $R_d = a_8 (H_d - h_d). \Delta t$. dan bila $H_d \leq h_d$, maka $R_d = 0$.

$R_{de} = a_9 . H_d$ and $H_d = H_d - R_d . \Delta t - R_{d0} . \Delta t$.

dimana H_i = level pada tangki i (mm); R_i = aliran dari tangki i (mm/hari); R_{ij} = penetrasi dari tangki i ke tangki j (mm/hari); $a_1 \sim a_9$ = aliran melalui parameter-parameter; h_i = tingki simpanan dalam tangki i (mm); Δt = selang waktu (hari); R = curah hujan (mm/hari); E = evaporasi (mm/hari); f = porsi curah hujan ke tanah; s = koefisien tunda evaporasi .

Aliran-Pollutograph

Persamaan gerak: aliran keluar dari sumber titik pada saat cuaca cerah, L_{po} (kg/hari):

$$L_{po} = f \times L_p ; f = \left(\exp(-1 \times k_1 \sqrt{A}) \exp(-1 \times k_2) \right)$$

Beban aliran keluar dari daerah sumber (termasuk yang keluar dari sedimen), L_{a-d} (kg/hari)

Tangki A :

$$L_a = C_a.R_a.A + K_{wp}.S_{ap}.R_a.A + K_{wr}.S_{ar}.R_a^2.A$$

Tangki B, C, D :

$L_b = C_b.R_b.A$; $L_c = C_c.R_c.A$; $L_d = C_d.R_d.A$; Penetrasi beban, L_{ab-de} (kg/hari):

Tangki A→B : $L_{ab} = C_a.R_{ab}.A$; Tangki B→C : $L_{bc} = C_b.R_{bc}.A$

Tangki C→D: $L_{cd} = C_c.R_{cd}.A$; Tangki D→ : $L_{de} = C_d.R_{de}.A$

Dimana, L_p = beban dari sumber titik (*point-sources*) (kg/hari); k_1 dan k_2 = konstanta; A = luas DAS (km²); f = rasio aliran keluar pada musim kering; C_i = kualitas air pada tangki i (mg/L); K_{wp} = koefisien laju pencucian sedimen dari sumber titik (L/mm); K_{wr} = koefisien laju pencucian sedimen dari sumber area (*nonpoint-sources*) (L/mm); S_{ap} = sedimen dari sumber titik (kg/m²); S_{ar} = sedimen dari sumber area (kg/m²).

H_{imx} = tinggi muka air maksimum pada tangki i (mm) ; k_{di} = koefisien laju penurunan dalam tangki i (1/hari) ; k_i = koefisien penyerapan dalam tangki i (1/hari) ; C_r = kualitas air hujan (mg/l); SC_i = akumulasi dalam tanah pada tangki i (kg/m²) ; k_{a1} = koefisien laju penyerapan dalam tangki a (1/hari); k_{a2} = koefisien laju pelepasan dalam tangki a (1/hari) ;

$$r \frac{(SC_i + SD_{io})}{SC_{io}} = \text{konstanta persamaan}$$

penyerapan dalam tangki i. Konsentrasi dan beban

$$L_{cai} = L_{po} + L_a + L_b + L_c + L_d$$

$$C_{cai} = \frac{L_{cai}}{Q_{cai}}$$

$$Q_{cai} = \sum \{(R_a + R_b + R_c + R_d).A\} \tan k.1 \rightarrow 5$$

Dimana, L_{cai} = total pengisian beban pada parameter i (kg/hari) ; C_{cai} = konsentrasi pada parameter i (mg/L) ; Q_{cai} = total pengisian (m³/dt).

Penyelesaian persamaan model ini menggunakan metode "*Runge-Kutte*", dan perhitungannya menggunakan program "*FORTTRAN*".

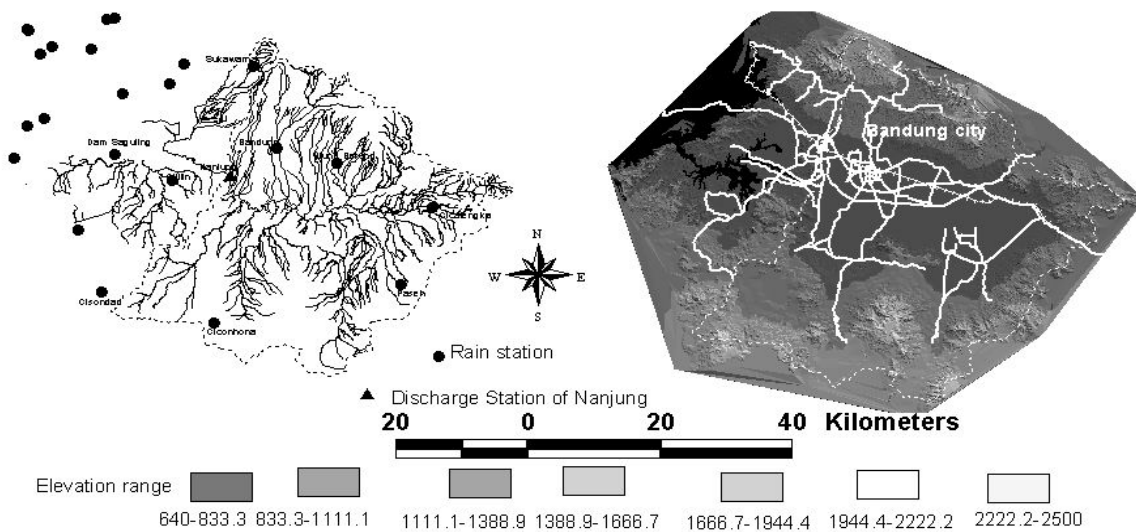
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

DAS Citarum yang memiliki luas 177.100 ha memiliki iklim tropis dengan dua musim yaitu hujan dan kemarau, pada musim hujan dimulai dari November sampai April mencakup 70 % dari rata-rata hujan tahunan. Pada musim hujan debit sungai Citarum sekitar 250 m³/dt, sedangkan dimusim kemarau sekitar 10 m³/dt yang terukur di stasiun Nanjung. Curah hujan di DAS Citarum sebagai masukan pada model adalah curah hujan harian dari 11 stasiun telemetry yaitu, Cicalengka, Paseh, Chinhona, Ciparay, Ujungberung, Bandung, Montaya, Sukawarna, dan stasiun dam Saguling (Gambar.2), mulai dari

tahun 1990 sampai 1998. Sedangkan beban pencemar yang masuk ke Citarum adalah beban pencemar yang telah dikonversikan dari data jumlah penduduk, tata guna lahan dan industri data-data tersebut disajikan pada Gambar 7. Data-data tersebut diperoleh dari statistik Bandung, peta tata guna lahan dan interpretasi citra satelit. Sebelum melakukan simulasi, maka data-data hasil pengukuran tersebut terlebih dahulu divalidasi antara model dengan pengukuran. Dimana untuk mengkalibrasi aliran pollutegraph dalam

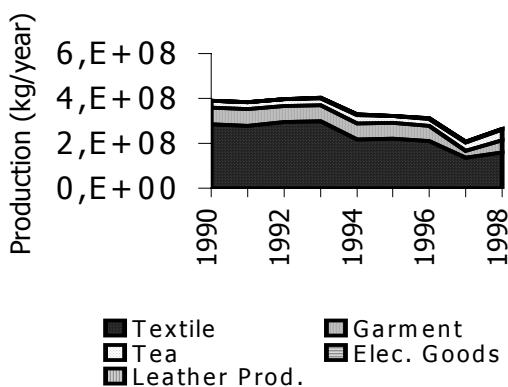
model menggunakan data kualitas air dari 1990 sampai 1995, sedangkan model hidrograf aliran dengan masukan parameter dari (Tabel 2 dan 3). Dari hasil simulasi untuk hidrograf aliran dan pollutegraph, hasilnya masih mendekati antara model dengan pengukuran (Gambar 6).

Oleh karena itu model layak digunakan untuk simulasi beban masukan yang masih mampu diterima oleh badan air pada debit aliran tertentu, yang kualitas sungai Citarum

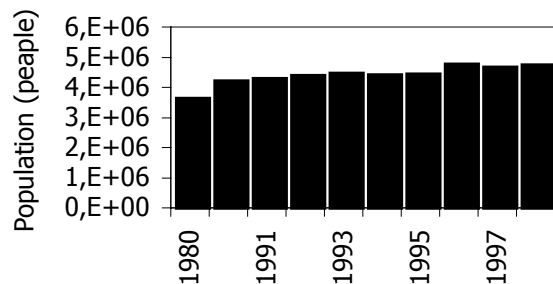


Gambar 2. DAS Citarum hulu

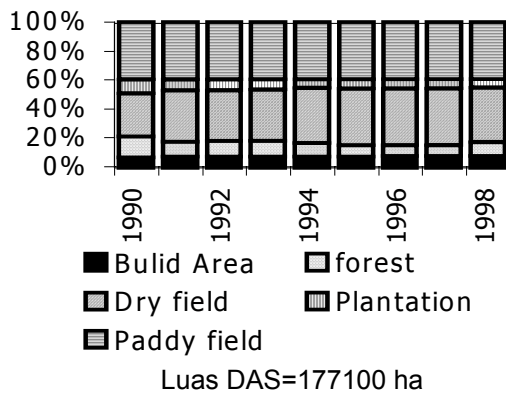
(BOD, COD, T-N, T-P, NH₃ dan DO) masih dalam standart ambang batas kualitas air.



Gambar 3. Pabrik di DAS Citarum hulu.



Gambar 4. Penduduk di DAS Citarum



Gambar 5. Komposisi Penggunaan Lahan Di DAS Citarum .

Tabel 2. Parameter Aliran Keluar Setiap Penggunaan Lahan Pada Model Hidrograf Aliran.

Pengunaan lahan	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
Kawasan terbangun	0.85	0.90	0.10000	0.80	0.2000	0.75	0.20000	0.800	0.0000001
Hutan	0.70	0.70	0.50000	0.70	0.3500	0.70	0.08600	0.870	0.0000001
Ladang	0.85	0.50	0.39000	0.85	0.2500	0.85	0.05500	0.870	0.0000001
Perkebunan	0.75	0.80	0.45000	0.80	0.3000	0.85	0.06500	0.800	0.0000001
Sawah	0.60	0.21	0.00001	0.15	0.0001	0.01	0.00023	0.001	0.000000

Tabel 3. Parameter Tinggi Tampungan Untuk Masing-Masing Penggunaan Lahan Dalam Model Hidrograf Aliran.

Penggunaan lahan	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	H _{bmx}	H _{cmx}	H _{dmx}
Kawasan terbangun	2.0	0.5	6.0	10.0	1.0	150	400	3500
Hutan	3.0	2.0	9.0	10.0	1.0	160	550	3000
Ladang	3.0	1.0	5.0	10.0	1.0	170	650	3500
Perkebunan	3.0	1.0	5.0	10.0	1.0	180	700	4000
Sawah	4.0	2.0	2.0	20.0	2.0	100	800	3000

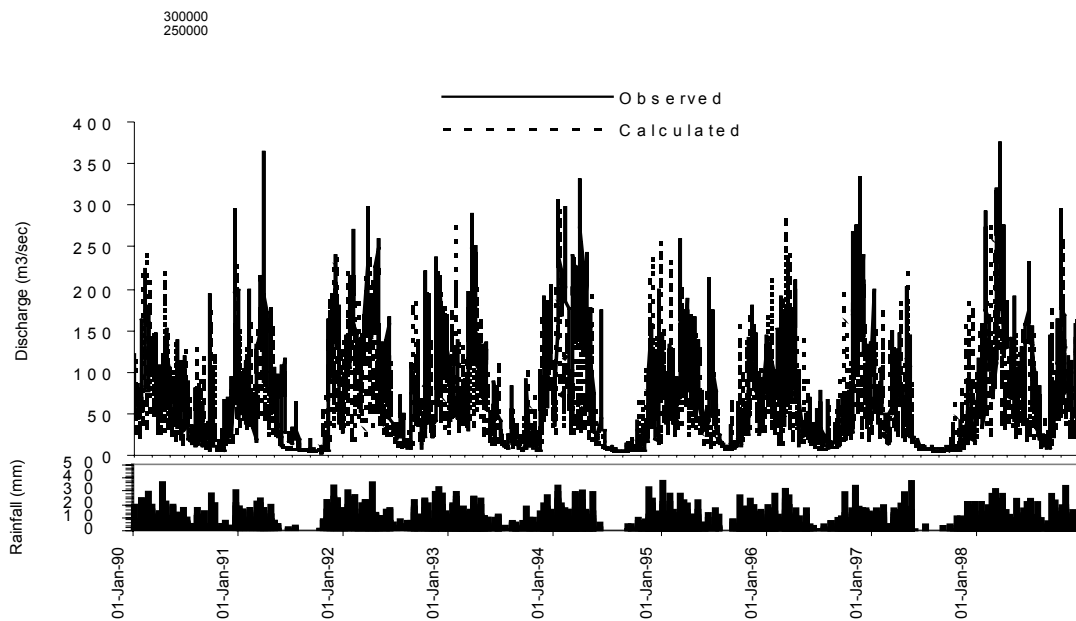
Besar beban yang akan disimulasikan seperti pada Gambar 7, yaitu hasil perhitungan masukan beban BOD dan COD berasal dari point-sources (industri) dan nonpoint-sources (permukiman) memberi kontribusi masukan beban sekitar 250.000 kg/hari dan 150.000 kg/hari, sedangkan kawasan terbangun (nonpoint-sources) 40.000 kg/hari. Sedangkan kontribusi beban masukan COD dari nonpoint-sources adalah 25.000 kg/hari untuk sawah, 3.000 kg/hari untuk perkebunan dan ladang, dan 12.000 kg/hari untuk kawasan terbangun. Gambar 7c kontribusi beban masukan T-N dari permukiman dan industri 10.200 kg/hari dan 3.700 kg/hari, untuk sawah, perkebunan, ladang dan kawasan terbangun. Sebaliknya kontribusi beban masu-

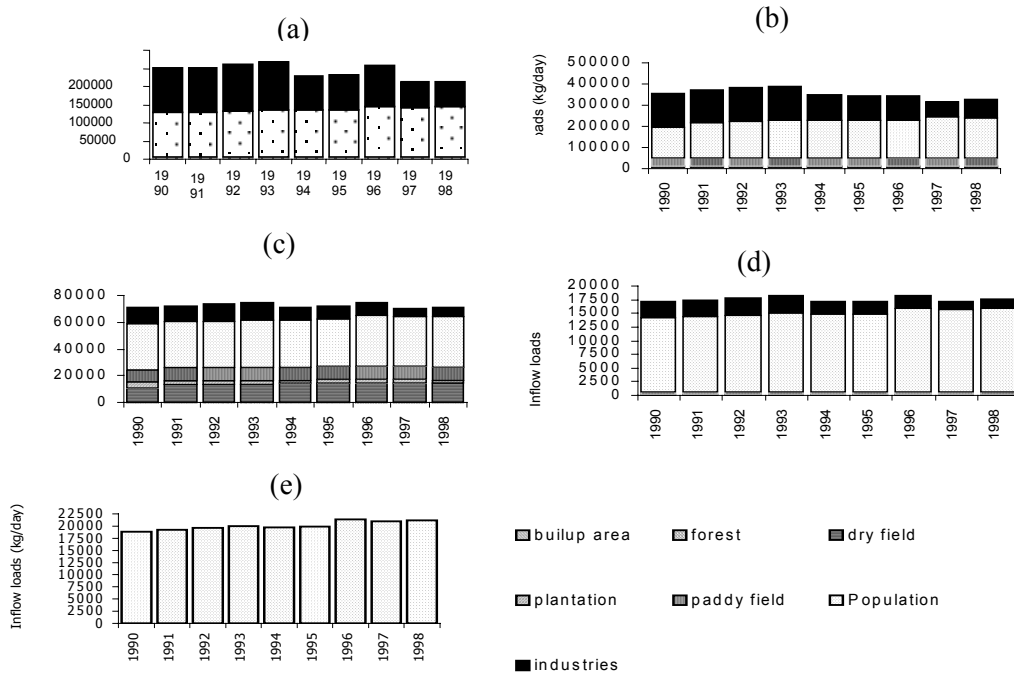
kan T-P dari nonpoint-sources tidak nyata apabila dibandingkan dengan point-sources yaitu sebesar 2000 kg/hari (Gambar 7d). Kontribusi beban masukan NH₃ dari permukiman adalah dominan secara nyata, yaitu sebesar 17.500 kg/hari (Gambar 7e). Bila beban sebesar ini disimulasikan pada debit minimum sebesar 10 m³/det kualitas sungai Citarum masih tercemar (melebihi standart baku mutu) (Gambar 8). Kejadian ini juga sama dari hasil pengukuran kualitas air di stasiun Nanjung konsentrasi BOD, COD dan NH₃, dari 57 kali pengambilan contoh terjadi 9 kali pencemaran (melebihi standar ambang) BOD, 8 kali COD dan NH₃ 23 kali dan DO dibawah 2 mg/L dan kejadian ini terjadi pada debit sekitar 10 m³/det. Untuk menjaga agar kualitas sungai Citarum baik pada debit minimum, berdasar-

kan hasil simulasi beban masukan dari industri terutama tekstil dan pemukiman sebaiknya dikurangi (*treatment*) sekitar 85 % untuk COD, BOD dan T-P sedangkan NH₃ dan T-N 45 % untuk pemukiman (Gambar 8). Gambar 8 juga menunjukkan hasil simulasi dengan debit 150 m³/det beban yang masuk sebesar maksimum masih mampu diterima oleh badan air, yang kualitasnya masih baik. Data ini menunjukkan bahwa, tingginya konsentrasi BOD, COD, dan NH₃ tidak disebabkan oleh aliran dasar dan aliran permukaan tetapi oleh aliran pada musim kemarau. Bila dilihat dari koefisien model secara umum (Tabel 4~7),. Gejala ini dapat dijelaskan dengan model hidrograf aliran yaitu, parameter a₁ dan a₂ masing-masing parameter aliran langsung dan aliran cepat memiliki nilai yang tinggi, sedangkan a₃ sebagai parameter infiltrasi bernilai rendah. Disamping itu b₁ dan b₂ sebagai parameter

hambatan aliran permukaan juga bernilai rendah, sehingga kondisi ini akan menyebabkan sebagian hujan menjadi aliran langsung. Kenyataan ini dapat dijelaskan pula dari tabel 2 dan 3, parameter a₄, a₆ dan a₈ mempunyai nilai tinggi dan b₃, b₄ dan b₅ mempunyai nilai rendah. Adapun parameter a₅, a₇ dan a₉ mempunyai nilai rendah dan nilai dari H_{bm_x}, H_{cm_x}, dan H_{dm_x} relatif rendah, kondisi ini menunjukkan bahwa bagian dari hujan yang terinfiltrasi kedalam tanah akan cepat habis sebagai alir dasar.. Jadi untuk pengelolaan DAS Citarum ini disarankan dengan cara menambah jumlah air yang terinfiltrasi dengan cara memperbesar nilai parameter b₁ dan b₂ sehingga air akan tinggal dalam tanah lebih lama.

Gambar 6. Curah hujan, hidrograf aliran pengukuran dengan model





Gambar 7. Beban masukan dari DAS Citarum hulu.
(a) BOD ,(b) COD, (c) T-N, (d) T-P, (e) NH₃

Tabel 4. Koefisien Perbandingan Keluaran Dan Pencucian Dari Sedimen Pada Kawasan Terbangun.

Koefisien	Pencemar				
	BOD	COD	T-N	T-P	NH ₃
K ₁	0.15	0.16	0.18	0.01	0.10
K ₂	0.40	0.48	0.10	0.01	0.35
K _{WP}	0.0000	0.00005	0.00005	0.00005	0.002
	2				

Tabel 5. Koefisien Pencucian Dari Sedimen (K_{WR}).

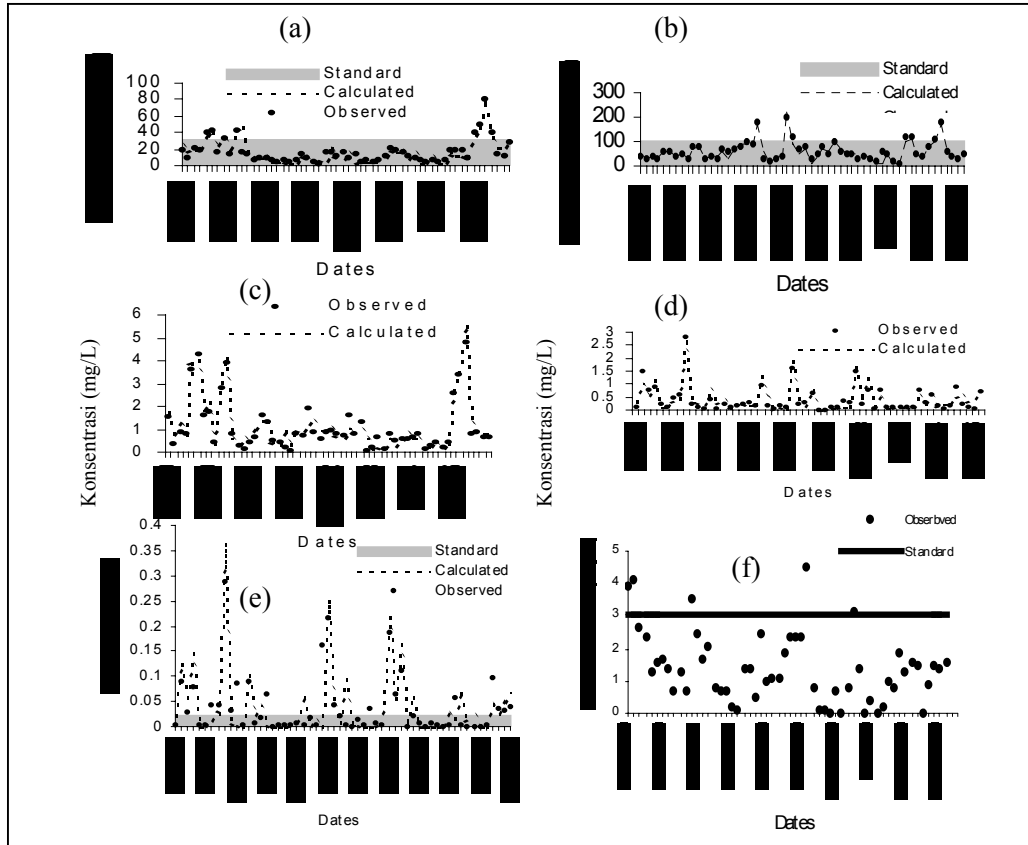
Pencemar	Penggunaan lahan				
	Kawasan terbangun	Hutan	Ladang	Perkebunan	Sawah
BOD	0.0009	-	-	-	-
COD	0.0015	0.0013	0.0030	0.0020	0.0011
T-N	0.0001	0.0001	0.0004	0.0004	0.0004
T-P	0.0001	0.0001	0.0004	0.0003	0.0002
NH ₃	0.0008	-	-	-	-

Tabel 6. Koefisien Laju Adsorpsi-Desorpsi .

Koefisien	Pencemar				
	BOD	COD	T-N	T-P	NH ₃
K _{a1}	0.3000	0.02	0.2	14.0	0.03
K _{a2}	0.0180	0.02	0.0005	11.0	0.018
S _{CO}	2000	2000	3	50	10

Tabel 7. Koefisien Pengurangan Pada Sedimen Dan Akumulasi Material Dalam Tanah.

Pencemar	Tangki A		Tangki A,B dan D					
	K_{DR}	K_{DP}	K_b	K_c	K_D	K_{DB}	K_{DC}	K_{DD}
BOD	0.0001	0.0001	0.0008	0.0005	0.00010	0.0000	0.0001	0.0001
COD	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.00010	0.0001	0.0001	0.0001
T-N	0.2	0.0	0.0001	0.0001	0.00001	0.0006	0.0005	0.0001
T-P	0.05	0.0	0.0001	0.0001	0.00001	0.0600	0.0005	0.0005
NH ₃	0.0	0.0	0.0008	0.0005	0.00050	0.0000	0.0001	0.0001



Gambar 8. Hasil Simulasi Beberapa Konsentrasi Dengan Hidrograf Aliran
 (A) BOD, (B) COD, (C) T-N, (D) T-P, (E) NH₃, (F) DO

4. KESIMPULAN dan SARAN

4.1. Kesimpulan

Kesimpulan hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Pertambahan penduduk di DAS Citarum hulu telah menyebabkan beralih fungsi dari daerah resapan menjadi kawasan terbangun.
- Fluktuasi dari hidrograf aliran sangat ekstrim, yaitu debit aliran tertinggi lebih dari 250 m³/dt dan aliran terendah kurang dari 10 m³/sec.
- Hasil simulasi hidrograf aliran dan poluto-graf aliran menunjukkan kecenderungan mendekati hasil pengukuran.
- Pencemaran BOD, COD dan NH₃ terjadi pada debit rendah di stasiun Nanjung, sama atau lebih kecil dari 10 m³/dt. Pencemaran BOD, COD dan NH₃ di sungai Citarum disebabkan oleh beban masukan dari pemukiman dan industri terutama tekstil.

4.2. Saran

- Karena sulitnya mengontrol pertambahan penduduk dan kawasan terbangun di DAS Citarum hulu, untuk menaikan aliran dasar dan menurunkan puncak hidrograf maka diperlukan pembuatan "*depression storage*".
- Model yang telah dikembangkan dapat digunakan sebagai pendekatan perbaikan kualitas air sungai Citarum hulu yang disebabkan oleh beban masukan karbon organik dan nutrien, dengan cara :
 - Skenario alokasi buangan sebagai sumber titik (*point-sources*)
 - Skenario effluent standart.

DAFTAR PUSTAKA

1. Grady Jr., H.C. Lim, 1980, Biology wastewater treatment, theory an application, Marcel Dekker, Inc, New York.
2. Badrudin M., 1990, Penggunaan indeks dampak pencemaran air pada penilaian kualitas air. Doctor dissertation, Bandung Institute of Technology.
3. Bukit N.T., 1995, Water quality conservation for the Citarum river in West Java,

Journal wat. Sci. Tech.,31,9, Pergamon, London, 1-10.

4. Uchida T., 1997, Research on a water quality improvement system, the case study of Saguling reservoir, Research and Development centre for Limnology Indonesian Institute of Science in the co-operation with Japan International Cooperation Agency.
5. Brahmana S., 1993, Eutrophication of Saguling reservoir, Journal Penelitian dan Pengembangan-an Pengairan, 28, 41-49.
6. Woo M H, C.K. Bomm, 1992, The water quality impact on fishery in the Saguling reservoir, Proceeding of the Sixth International Symposium on River an Lake Environmental Chuasheon, 62-76.