

EVALUASI KEMAMPUAN PULIH DIRI OKSIGEN TERLARUT AIR SUNGAI CITARUM HULU

Eko Harsono^a

^a Staf Peneliti Puslit Limnologi-LIPI

Diterima 18 redaksi : Maret 2010, Disetujui redaksi : 27 Mei 2010

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan pulih diri (self purification) oksigen terlarut (DO; Dissolved Oxygen) melalui uji kelenturan lengkung DO air Sungai Citarum Hulu. Lengkung kelenturan DO diperagakan dengan model QUAL2K, dan diuji melalui simulasi perubahan nilai parameter pada model lengkung DO. Parameter model yang diubah nilainya tersebut adalah kemiringan dasar sungai, kebutuhan oksigen sediment (SOD; Sediment Oxygen Demand) sungai, konsentrasi DO, NH_4 dan (NO_2+NO_3), serta BOD_{fast} , BOD_{slow} , di titik influen, dan laju nitrifikasi NH_4 , laju oksidasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air sungai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi DO, penurunan konsentrasi NH_4 dan (NO_2+NO_3) air di titik influen, serta penurunan laju nitrifikasi dan pembersihan sedimen dasar Sungai Citarum Hulu sulit meningkatkan kemampuan pulih-sendiri DO air sungai tersebut. Sedangkan peningkatan kemiringan dasar sungai, penurunan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} , penurunan laju oksidasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air sungai, serta penurunan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} dengan NH_4 dan (NO_2+NO_3) air di titik influen telah dapat meningkatkan kemampuan pulih-sendiri DO air sungai tersebut. Hasil evaluasi juga telah menunjukkan kemampuan pulih-sendiri DO untuk mendukung kebutuhan DO dari kehadiran BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan (NO_2+NO_3) di Sungai Citarum sangat rendah.

Kata kunci : Evaluasi, kemampuan pulih-sendiri, DO, Citarum Hulu, QUAL2K

ABSTRACT

THE EVALUATION OF SELF-PURIFICATION ABILITY IN UPPER CITARUM RIVER. The research aims to evaluate ability of DO self-purification on Upper Citarum river using DO-sag curve test. The test was simulated using QUAL2K model with variation on parameters i.e. (i) DO, BOD_{fast} and BOD_{slow} , NH_4 , NO_2+NO_3 in the influent water, (ii) SOD, nitrification rate, BOD_{fast} and BOD_{slow} oxidation rate in the river water and (iii) the riverbed slope. Results shows that dredging on river sediment, increasing DO and decreasing NH_4 and (NO_2+NO_3) concentration in the influent water were found very difficult to increase ability of DO self-purification. Whilst increasing slope river bed, decreasing BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 and NO_2+NO_3 concentration in the influent water and decreasing BOD_{fast} , BOD_{slow} concentration and oxidation rate in the river water were able to increase DO self-purification. The results also show that Upper Citarum river have low DO self-purification capacity for BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 and (NO_2+NO_3) loads

Key words : Evaluation, ability self-purification, DO, Upper Citarum, QUAL2K

PENDAHULUAN

Kehadiran oksigen terlarut (DO; *Dissolved Oxygen*) di dalam badan air sungai, merupakan indikator kesehatan (sanitasi) badan air sungai (Thomann, 1987), semakin tinggi kandungan DO semakin sehat sungai tersebut. Oksigen terlarut di dalam air sungai adalah produk dari proses neraca asupan oksigen dan pemakaian oksigen terlarut di dalam air sungai (Chapra, 1997). Asupan oksigen, berasal dari masukan aliran air dan reaerasi di dalam sungai. Sedangkan penggunaan oksigen adalah untuk oksidasi material terdegradasi dari karbon organik (BOD) dan nitrogen anorganik (NH_4 dan NO_2) yang berasal dari masukan aliran air anak-anak sungai yang mengandung air limbah atau dari pipa dan saluran keluaran air limbah (Thomann, 1987).

Sungai Citarum Hulu (selanjutnya dikemukakan Citarum Hulu) telah penerima beban BOD_5 160.000 ~ 200.000 ton/hari dari penduduk (Salim, 2000) dan beban BOD_5 sebesar 81.363 ~ 109.114 ton/hari dari industri (Bukit, 2002). Menurut Metcalf (1991), air limbah penduduk juga mengandung amonia-N antara 10 s/d 30 mg/l. Di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum Hulu bermukim 5.373.513 jiwa penduduk (Kantor Statistik Kota Bandung dan Kantor Statistik Kab. Bandung, 2005), dan apabila buangan air limbah aktivitas penduduk tersebut 80% dari kebutuhan air per kapita (diambil 150 l/kapita/hari), maka hasil perhitungan amonia-N yang diterima badan air Citarum Hulu melalui titik-titik masukan tersebut berkisar 5,3 s/d 15,7 ton/hari. Sementara itu menurut Eko Harsono (2010), pada musim kemarau telah teridentifikasi 36 titik dan pada musim penghujan 51 titik masukan aliran (influen) ke dalam Sungai Citarum Hulu. Melalui titik-titik masukan ini, beban BOD_5 dan amonia yang berasal dari DAS tersebut masuk ke dalam badan air Sungai Citarum Hulu. Jika masukan beban tersebut dibiarkan,

maka DO air Sungai Citarum Hulu dikawatirkan akan defisit dan dapat menimbulkan bau busuk, berlumpur hitam serta mendorong kondisi lingkungan Sungai Citarum Hulu menjadi kumuh.

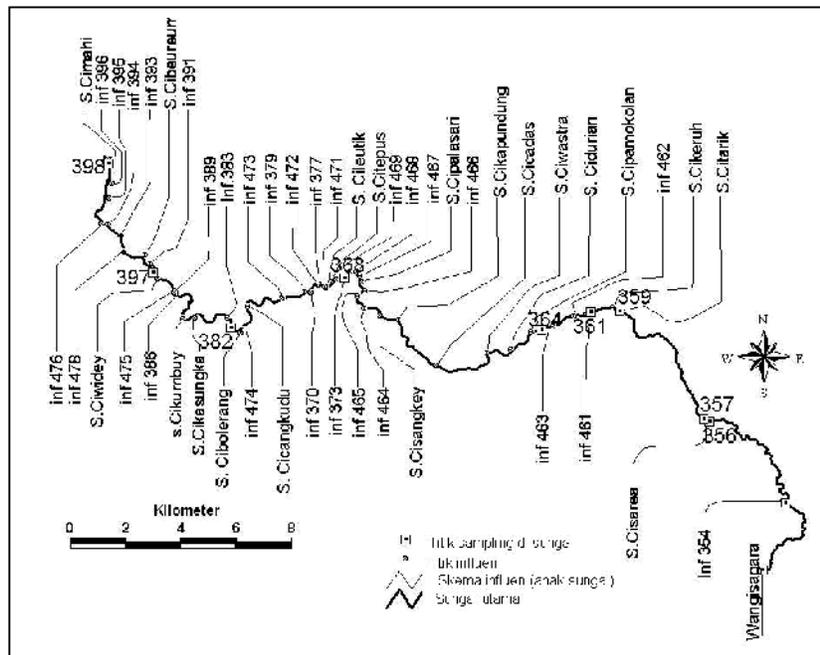
Kualitas air sungai ini telah ditetapkan baku mutu peruntukannya, yaitu golongan C yang kandungan oksigen terlarutnya (DO) disyaratkan $\geq 3,0$ mg/l (S.K. Gubernur Jawa Barat No.38 Tahun 1991). Upaya-upaya pengendalian beban BOD_5 telah dilakukan oleh Pemda setempat untuk memenuhi baku mutu tersebut, yaitu melalui Prokasih dari tahun 1991 hingga sekarang. Disamping itu melalui Proyek Bandung Urban Development Program (BUDP) juga telah dibangun saluran tertutup untuk mengalirkan air limbah penduduk Kota Bandung ke IPAL Bojongsoang. Berdasarkan laporan hasil program Prokasih tersebut, 88% industri yang ada dalam DAS Sungai Citarum Hulu telah mengoperasikan instalasi pengolah air limbah (IPAL) dengan efisiensi penurunan BOD_5 antara 50 s/d 60% (BPLHD, 2001). Sedangkan hasil BUDP, sebagian besar air limbah penduduk Kota Bandung telah tersalur dan terkumpul serta diolah oleh IPAL Bojongsoang dengan efisiensi penurunan BOD_5 dan NH_4 antara 45 s/d 50%. Namun demikian kondisi DO air Sungai Citarum Hulu sampai saat ini, masih kurang dari baku mutu yang berlaku bahkan di beberapa ruas konsentrasi DO-nya 0 mg/l (Wangsaatmadja, 2007).

Belum berhasilnya perbaikan konsentrasi DO tersebut, karena hingga sampai saat ini belum diketahui kemampuan pulih-diri DO dalam mencukupi kebutuhan oksigen untuk oksidasi materil pencemar dari luar badan air sungai. Menurut Tomann (1987), kemampuan pulih-sendiri DO air sungai dipengaruhi oleh adanya pengenceran DO air sungai dari anak-anak sungainya, kemampuan reaerasi sungai, kebutuhan DO untuk oksidasi karbon organik dan nitrogen an-organik di air sungai, laju peluruhan karbon organik dan

aliran dalam persamaan power Leopold-Maddox, dilakukan dengan mengubah-ubah kedalaman muka air pada penampang melintang sungainya. Debit aliran airnya dihitung dengan menggunakan metode Velocity-area, sedangkan kecepatan alirannya dihitung dengan formula Manning (Wanielista, 1997).

Lokasi sumber pencemar yang masuk (titik influen) ke dalam sungai Citarum Hulu, dalam penelitian ini berdasarkan pada hasil identifikasi dari penelitian sebelumnya (Harsono, 2009) (Gambar 2).

September 2007) dan kondisi aliran rata-rata (pertengahan musim penghujan, bulan April 2008). Debit aliran dihitung dengan metode Velocity-area, dimana kecepatan alirannya diukur dengan Current-Meter, dan luas penampang melintangnya diperoleh dari pengukuran kedalaman dan lebar saluran dari pengaliran sumber pencemar tersebut. Pengambilan contoh air dilakukan dengan metode Grab-Sampling. Sedangkan pengukuran DO air dilakukan di lapangan dengan Water Quality Checker Merk Horiba U-10. Contoh air yang telah diambil tersebut, kemudian disaring dengan kertas



Gambar 2. Lokasi Titik Masukan Aliran Air (influen) dan Titik Sampling di Sungai Citarum Hulu (Sumber: Harsono, 2009)

Masukan beban pencemar ke dalam sungai yang sesuai dengan QUAL2K terdiri dari debit aliran, karbon organik sebagai BOD_{fast}, dan BOD_{slow}, nitrogen an-organik sebagai amonia-N dan nitrat+nitrit, dan konsentrasi DO air di setiap titik influen (Chapra, 2006). Untuk mendapatkan beban pencemar tersebut telah dilakukan pengukuran debit dan DO serta pengambilan contoh air di titik-titik influen pada kondisi aliran rendah (akhir musim kemarau, bulan

millipore 0,45 dan dibawa segera (< 24 jam) ke laboratorium untuk dilakukan analisis parameter-parameter. Untuk analisis BOD₅, amonia-N, Nitrit-N dan Nitrat-N digunakan metode standard. (APHA, 1995), sedang analisis TOC dilakukan dengan TOC meter merk Shimadzu type TOC 5000A.

BOD_{fast} yang ekuivalen dengan BOD terlarut akhir (BOD *ultimate*) adalah besarnya karbon organik yang langsung teroksidasi selama mengikuti perjalanan arus

di sungai, dimana besarnya dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$BOD_{fast} = \frac{BOD_5}{1 - e^{-k_1,5}} \quad (\text{Chapra,2006}).$$

Sedangkan BOD_{slow} yang didefinisikan sebagai karbon organik yang terhidrolisis terlebih dahulu dalam perjalanan mengikuti arus sungainya sebelum proses oksidasi karbon organik tersebut dilakukan, besarnya dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$BOD_{slow} = r_{oc} \text{DOC} - BOD_{fast} \quad (\text{Chapra,2006}).$$

Dimana BOD_5 adalah BOD_5 dari contoh air tersaring (mg/l), e adalah bilangan napier dan k_1 adalah laju oksidasi dalam botol sample dari karbon organik pada kondisi aerobik (1/hari), DOC adalah karbon organik terlarut yang dalam penelitian ini dipadankan dengan hasil analisis TOC terlarut (mg/l), dan r_{oc} adalah ratio konsumsi oksigen per karbon organik yang teroksidasi (gO_2/gC). Laju oksidasi karbon (k_1) persamaan tersebut dalam penelitian ini mendasarkan diri pada hasil penelitian terdahulu (Harsono,2010) (Tabel 1 ; 2 dan Gambar 2).

Tabel 1. Laju Oksidasi (k_1) di Ttitik Influen

Sungai (influen)	k_1	Sungai (influen)	k_1
s.Cisarea	0,424006	Inf.468	0,224176
Citarik	0,221162	Citepus	0,400352
Cidurian	0,169861	Ciwidey	0,17668
Cikapundung	0,220306	Cibeureum	0,481085
Cisangkey	0,265085	Inf.479	0,173656
Inf.464	0,194235	Inf.476	0,341675
Palasari	0,451169	Cimahi	0,482337

Tabel 2. Laju Oksidasi (k_1) Titik Sampling di Sungai

Titik di Sungai	k_1
357	0,418099
361	0,222127
382	0,454600
397	0,460774

Dalam “running” untuk mendapatkan lengkung kelenturan DO hitung dipilih penyelesaian integrasi persamaann

deferensial metode Runge-Kutta ordo ke 4, dan perhitungan reaerasi sungai menggunakan formula Thackston-Dawson (Chapra, 2006). Sedangkan untuk mendapatkan parameter model lengkung kelenturan DO, hasil hitungan yang telah diperoleh tersebut dikalibrasi dan diuji kesahihannya dengan data observasi. Kalibrasi menggunakan data masukan dan observasi dari pengambilan contoh air di akhir musim kemarau (aliran rendah). Untuk uji kesahihan menggunakan data masukan dan observasi dari pengambilan contoh air pertengahan musim penghujan (aliran rerata). Kalibrasi dan uji kesahihan tersebut menggunakan cara “Trial and Error”. Dimana parameter model telah terkalibrasi dan sah apabila hasil hitungan mempunyai rerata kesalahan terhadap observasi (ϵ) yang dihitung dengan sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{observasi} - \text{hitungan})^2}{N} \leq 0,05$$

Dimana, N = jumlah contoh.

Untuk keperluan kalibrasi, uji kesahihan dan analisis lebih lanjut, bersamaan dengan pengambilan contoh air di titik-titik influen telah dilakukan pengukuran debit dan DO serta pengambilan contoh air Sungai Citarum Hulu di lokasi seperti dalam gambar 2. Dimana cara pengambilan contoh air, pengukuran debit dan DO, penanganan contoh air, analisis laboratorium dan perhitungan-perhitungannya dilakukan dengan menggunakan metode yang sama seperti pengambilan contoh air di di titik-titik influen.

Sedangkan untuk uji kelenturan, digunakan model lengkung kelenturan DO hasil perhitungan dari data masukan pengambilan contoh air di akhir musim kemarau (aliran rendah). Parameter-parameter yang digunakan untuk pengujian adalah sebagai berikut,.

- UC1 : pengenceran dengan peningkatan konsentrasi DO air di titik-titik influen, parameter model lainnya tetap,

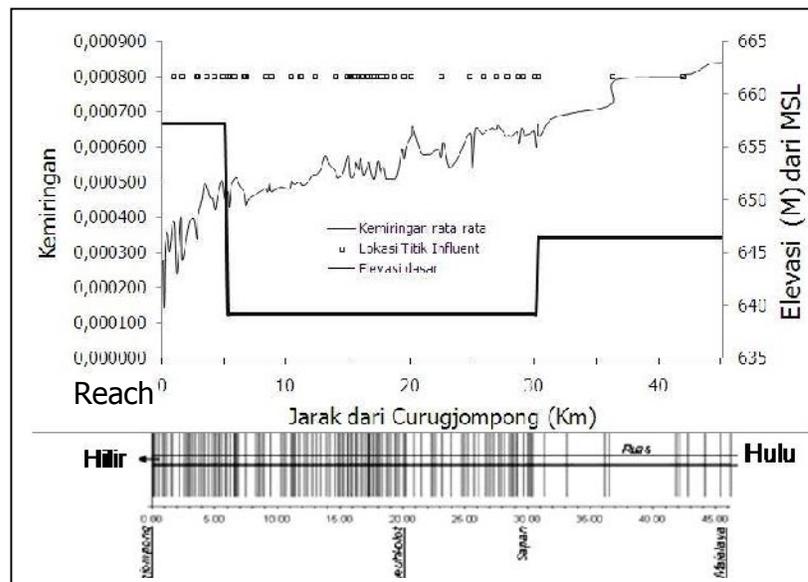
- UC2 : peningkatan reaerasi sungai dengan peningkatan kemiringan dasar sungai, parameter model lainnya tetap,
- UC2 : penurunan konsentrasi NH_4 dan (NO_2+NO_3) air di titik-titik influen, parameter model lainnya tetap,
- UC3 : adalah penurunan laju nitrifikasi NH_4 air sungai, parameter model lainnya tetap,
- UC4 : penurunan kebutuhan oksigen sedimen dengan mengurangi tutupan sedimen dasar, parameter model lainnya tetap,
- UC4 : penurunan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air di titik-titik influen, parameter model lainnya tetap,
- UC5 : penurunan laju oksidasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air sungai, parameter model lainnya tetap,
- UC6 : penurunan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan (NO_2+NO_3) secara

bersamaan, parameter model lainnya tetap.

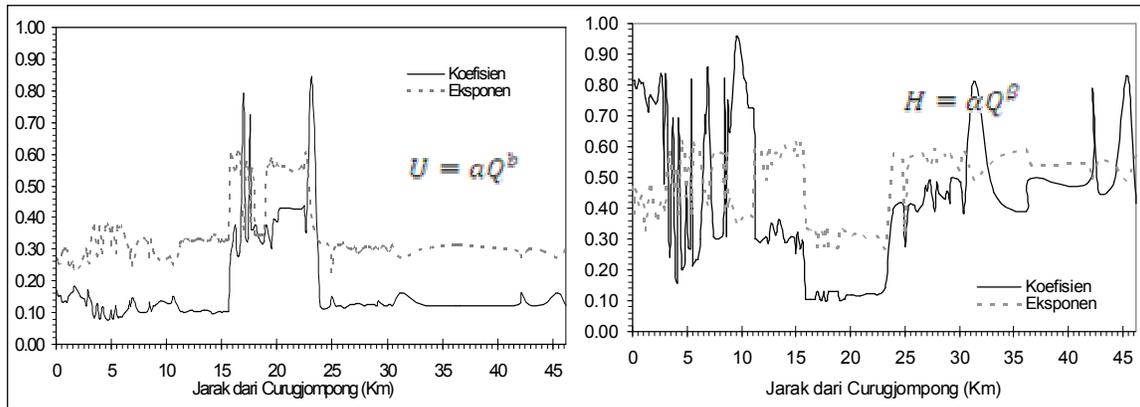
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dasar Sungai Citarum Hulu mempunyai elevasi bervariasi dari 645 s/d 664 m msl (*mean sea level*). Berdasarkan hasil interpolasi dari elevasi tersebut kemiringan dasar sungai dapat dibagi menjadi tiga ruas: i) Ruas hilir, km 0 – 5 dengan kemiringan 0,000667; ii) Ruas tengah, km 5 - 30 dengan kemiringan 0,000125; iii) Ruas hulu, km 30 – 46 dengan kemiringan 0,000342 (Gambar 3).

Dengan kemiringan dasar sungai dan lokasi titik-titik influen yang demikian itu, maka Sungai Citarum Hulu dapat dibagi menjadi 116 reach. Dimana karakterisasi Leopold-Maddox dari penampang melintang setiap reach tersebut dapat dilihat dalam gambar 4.



Gambar 3. Reach Sungai Citarum Hulu



Gambar 4. Karakteristik Leopold-Maddox Penampang Melintang Tiap Reach di Sungai Citarum Hulu

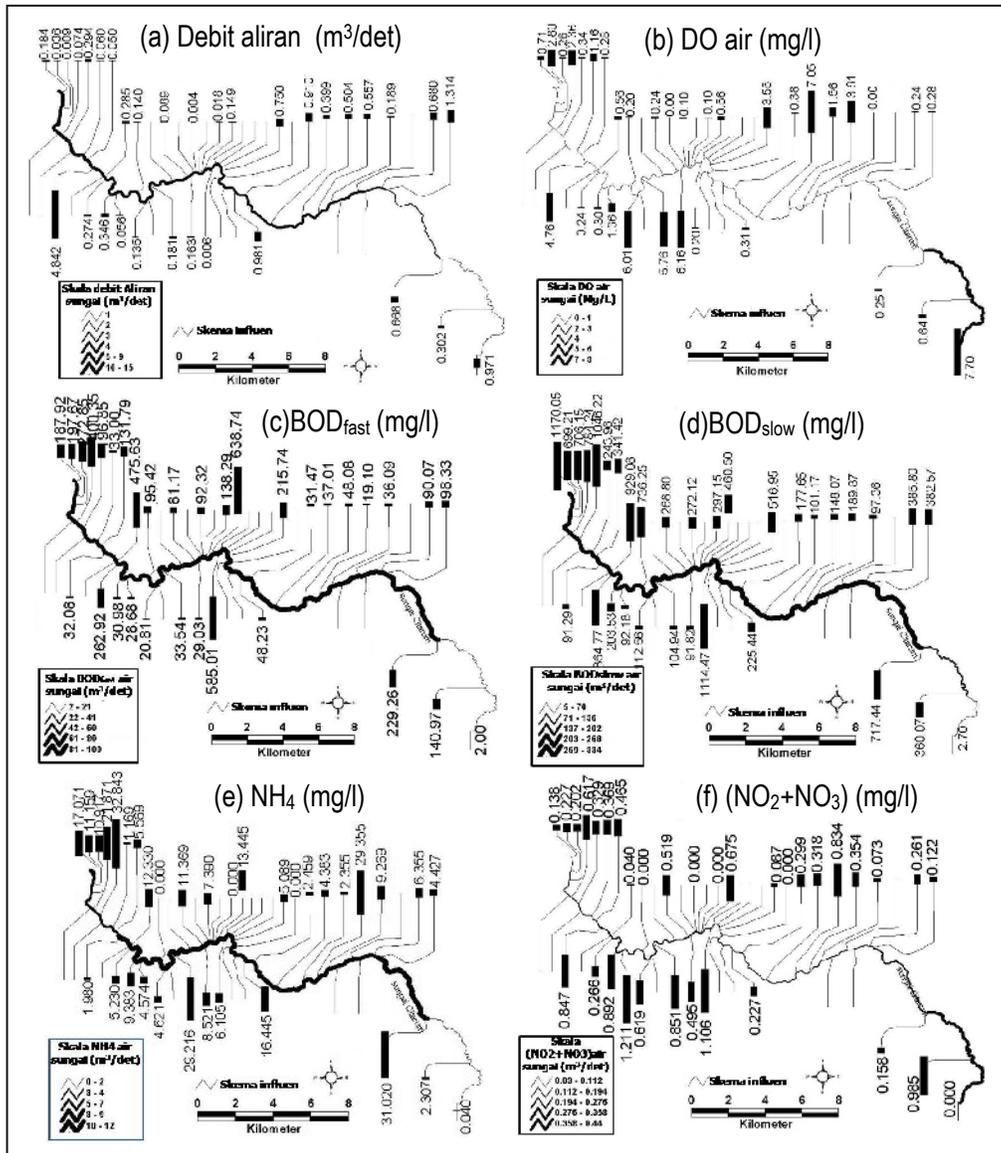
Karakter penampang melintang Sungai Citarum Hulu, yaitu karakter kecepatan terhadap debit aliran di ruas hulu dan hilir mempunyai kecenderungan yang relatif sama. Namun pada ruas tengah terutama pada Km. 16 s/d 23, pada debit yang sama kecepatan aliran sungainya lebih tinggi dibandingkan dengan ruas-ruas lainnya. Demikian juga dengan kedalaman muka air, pada debit yang sama di ruas Km 16 s/d 23 lebih dangkal bila dibandingkan dengan ruas-ruas lainnya (Gambar 4).

Hasil pengukuran debit dan DO serta pengambilan contoh air di akhir musim kemarau (aliran rendah) disajikan dalam gambar 5.

Debit aliran dari titik-titik influen, kecuali influen S. Ciwidey (4,842 m³/det) dan influen S. Citarik (1,314 m³/det) pada umumnya kurang dari 1 m³/det dan reratanya 0,473 m³/det ($\pm 0,864$ m³/det). Sedangkan total debit aliran titik-titik influen yang masuk ke dalam Sungai Citarum sebesar 15,3 m³/det, dan debit aliran sungai di stasiun 398 sebesar 15,1 m³/det (Gambar 5a). Berdasarkan pengamatan hanya 13 titik influen yang mempunyai konsentrasi DO air lebih dari 1 mg/l sedang sisanya di bawah 1 mg/l, dimana rerata DO air dari titik-titik influen tersebut adalah 1,82 mg/l ($\pm 2,135$ mg/l) (Gambar 5b), yang mana

dapat diketahui total laju aliran DO dari titik-titik influen sebesar 44,137 mg/det, dan konsentrasi DO air Sungai Citarum yang awalnya antara 5 hingga 8 mg/l kemudian ke hilir semakin kecil hingga di stasiun 398 tinggal 0 mg/l atau laju aliran DO-nya tinggal 0 mg/det.

Hasil perhitungan BOD_{fast} dan BOD_{slow} dari pengambilan contoh air di titik-titik influen dan air Sungai Citarum Hulu pada akhir musim kemarau, yang mana konsentrasi BOD_{fast} bervariasi dari 2,0 s/d 638,74 mg/l dan reratanya 152,046 mg/l ($\pm 160,960$ mg/l) serta BOD_{slow} bervariasi dari 2,70 s/d 1170,06 mg/l dan reratanya 422,687 mg/l ($\pm 334,598$ mg/l) (Gambar 5c; 5d). Rasio antara rerata BOD_{fast} dengan BOD_{slow} tersebut diperoleh 0,35, dan total laju aliran dari titik-titik influen yang masuk ke dalam Sungai Citarum Hulu sebesar 1231,39 mg/det untuk BOD_{fast} dan 4178,032 mg/det untuk BOD_{slow} (Gambar 5c; 5d), sehingga dapat diketahui Sungai Citarum Hulu yang semula kandungan BOD_{fast} airnya 2,00 mg/l dan BOD_{slow} 2,7 mg/l makin ke hilir menjadi antara 81 s/d 100 mg/l dan kandungan BOD_{slow} menjadi antara 81 s/d 100 mg/l, hingga di stasiun 398 laju aliran BOD_{fast} -nya sebesar 860,7 mg/det dan BOD_{slow} 3080,4 mg/det.



Gambar 5. Hasil Pengukuran Debit dan DO Serta Pengambilan Contoh Air Di Akhir Musim Kemarau

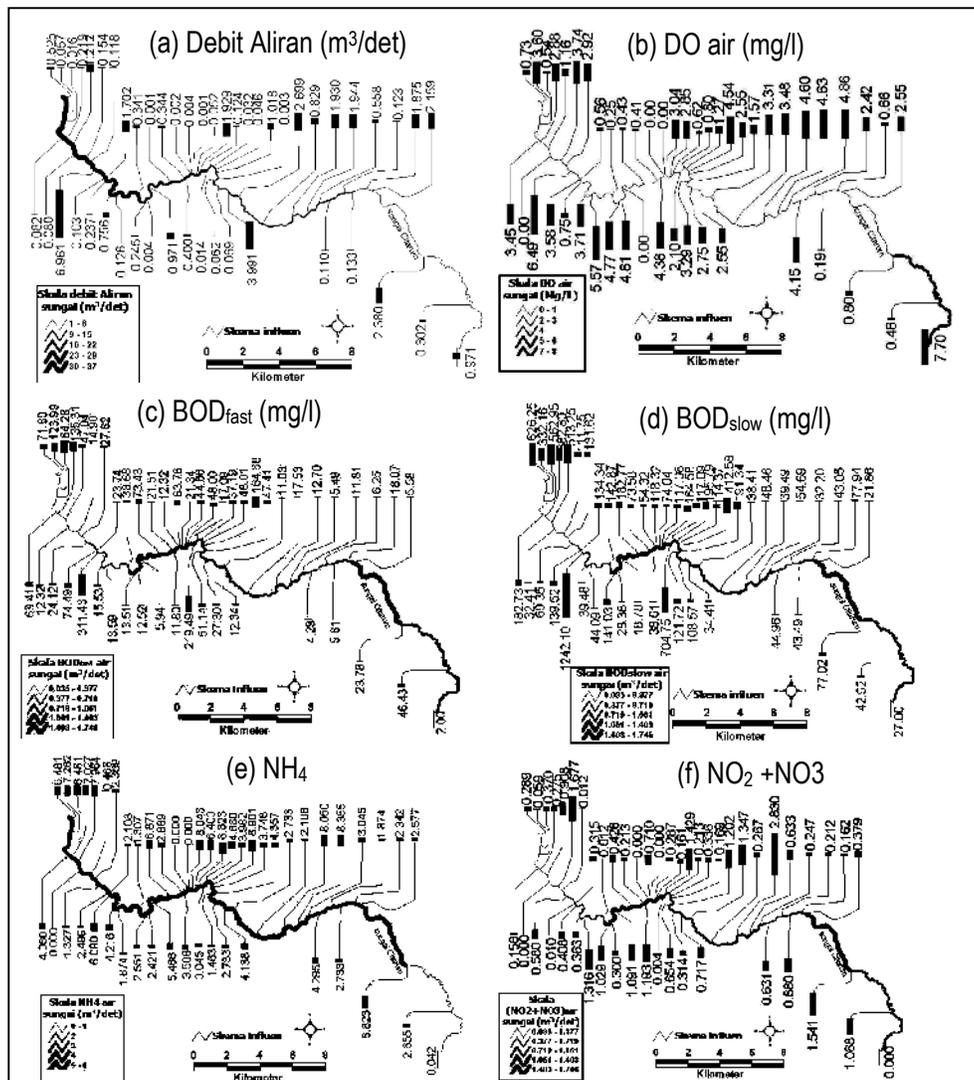
Sementara itu diketahui bahwa, konsentrasi NH₄ dan (NO₂+NO₃) mempunyai rentang yang cukup lebar yaitu dari 0,000 hingga 31,020 mg/l dan rentang (NO₂+NO₃) antara 0,000 hingga 1,211 mg/l, dimana rerata konsentrasi NH₄ dari titik-titik influen tersebut sebesar 9.724 mg/l (± 9.499 mg/l) dan (NO₂ + NO₃) sebesar 0.604 mg/l (± 0.633 mg/l) (Gambar 5e; 5f). Total laju aliran NH₄ dari titik-titik influen yang masuk ke dalam Sungai Citarum Hulu sebesar

117,8 mg/det dan (NO₂+NO₃) sebesar 7,02 mg/det (Gambar 5e; 5f), yang mengakibatkan air Sungai Citarum Hulu ruas hulu konsentrasinya NH₄ antara 0 s/d 2 mg/l dan (NO₂ + NO₃) antara 0,358 s/d 0,44 mg/l, air Sungai Citarum Hulu ruas tengah konsentrasinya NH₄ meningkat menjadi antara 16 s/12 mg/l dan (NO₂+NO₃) menurun hingga 0,194 s/d 0,276mg/l, dan air Sungai Citarum Hulu ruas hilir konsentrasinya NH₄ kembali turun hingga

10 s/d 12 mg/l dan (NO₂+NO₃) juga turun menjadi 0,112 s/d 0,194 mg/l, hingga pada akhirnya di stasiun 398 laju aliran NH₄ menjadi sebesar 117,93 mg/det dan (NO₂+NO₃) sebesar 6,3 mg/det.

Berdasarkan hasil pengukuran debit dan DO serta pengambilan contoh air pada pertengahan musim penghujan (aliran rata-rata) (Gambar 6), titik-titik influen yang pada akhir musim kemarau (Gambar 5) tidak ada alirannya pada musim pertengahan musim penghujan ini semua titik influen yang teridentifikasi telah mempunyai aliran

air. Debit aliran air di titik-titik influen bervariasi dari 0,004 m³/det hingga 6,96 m³/det dengan rerata sebesar 0,760 m³/dt (±1,26 m³/det) (Gambar 6a), dan total debit aliran dari titik-titik influen tersebut yang masuk ke dalam Sungai Citarum Hulu sebesar 38,01 m³/det, dan debit aliran Sungai Citarum Hulu di stasiun 398 sebesar 37,3 m³/det. Konsentrasi DO di titik-titik bervariasi dari 0 mg/l hingga 7,7 mg/l dengan sebesar 2,45 mg/l (±1,93 mg/l) (Gambar 6b), dari titik-titik tersebut telah memasok DO sebesar 121,54 mg/det, dan



laju aliran DO Sungai Citarum Hulu di stasiun 398 sebesar 3,37 mg/det. Titik-titik influen airnya mempunyai konsentrasi BOD_{fast} bervariasi mulai dari 2,0 mg/l hingga 311,43 mg/l, dan BOD_{slow} bervariasi dari 27 hingga 1242,10 mg/l (Gambar 6c; 6d), dengan rerata konsentrasi air dari titik-titik tersebut sebesar 46,79 mg/l (\pm 60,66 mg/l) untuk BOD_{fast} dan 169,21 mg/l (\pm 225,97 mg/l) untuk BOD_{slow}. Berdasarkan data tersebut diketahui, total laju aliran yang masuk ke dalam Sungai Citarum Hulu sebesar 1016,51 mg/det untuk BOD_{fast} dan 4020,30 mg/det untuk BOD_{slow}, serta laju aliran Sungai Citarum Hulu di stasiun 398 BOD_{fast} -nya sebesar 895,2 mg/det dan BOD_{slow} -nya sebesar 3580,8 mg/det. Sedangkan rerata dari variasi konsentrasi NH₄ maupun (NO₂+NO₃) titik-titik influen yaitu, sebesar 4,561 mg/l (\pm 4,834 mg/l) untuk NH₄ dan 0,534 mg/l (\pm 0,576 mg/l) untuk (NO₂+NO₃) (Gambr 6e; 6f), dan diperoleh total laju aliran titik-titik influen yang masuk ke dalam Sungai Citarum Hulu sebesar 157,144 mg/det untuk NH₄, dan sebesar 63,076 mg/det untuk (NO₂+NO₃), dimana laju aliran sungai Citarum Hulu di stasiun 398 adalah sebesar 168,194 mg/det untuk NH₄ dan sebesar 27,076 mg/det untuk (NO₂+NO₃).

Data total laju aliran dari titik-titik influen di pertengahan musim penghujan

dibandingkan dengan hasil akhir musim kemarau, debitnya naik 64,28%, DO airnya naik 175,4%, BOD_{fast} airnya turun 17,45%, BOD_{slow} airnya turun 3,8%, NH₄ airnya naik 33,42%, dan laju aliran (NO₂+NO₃) airnya naik 807,02% Sedangkan pada stasiun 398 di Sungai Citarum Hulu, di pertengahan musim penghujan laju aliran debit airnya naik 147,2%, DO airnya naik dari 0 mg/det menjadi 3,37 mg/det, BOD_{fast} airnya naik 4%, BOD_{slow} airnya naik 16,25%, NH₄ airnya naik 398 42,6%, dan laju aliran (NO₂+NO₃) naik 330,0% dibandingkan dengan hasil di akhir musim kemarau.

Dengan data masukan debit aliran, DO, BOD_{fast}, BOD_{slow}, NH₄, (NO₂+NO₃) dari titik-titik influen yang diambil pada akhir musim kemarau dan pertengahan musim hujan tersebut, serta melalui ‘trial and error’ telah diperoleh parameter model lengkung DO Sungai Citarum Hulu yang telah terkalibrasi dan telah teruji kesahihannya dengan DO observasi (Tabel 3), dengan lengkung DO air sungai tersebut dapat dilihat dalam gambar 7.

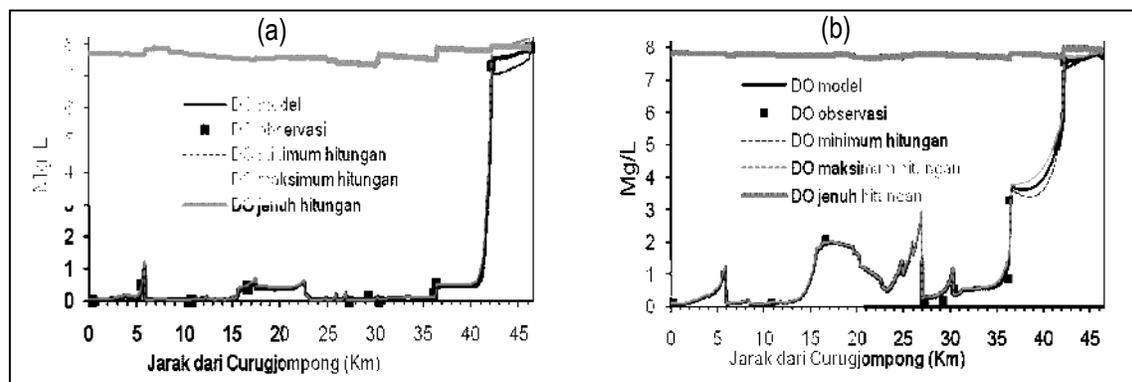
Hasil perhitungan kalibrasilengkung kelenturan DO dengan observasi mempunyai kecenderungan yang sama, dan hasil observasi masih berada dalam rentang maksimum dan minimum hasil perhitungan (Gambar 7a), yang mana berdasarkan perhitungan kesalahan hasil perhitungan

Tabel 3. Parameter Model

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Oksigen:		CBOD_{fast}:	
Model reaerasi	Thackston-Dawson	Laju oksidasi (k _d)	0,47/hari
Koreksi suhu	1,024	Koreksi suhu	1,047
O ₂ untuk oksidasi karbon (R _{oc})	2,8 gO ₂ /gC	Ammonium:	
O ₂ untuk nitrifikasi NH ₄ (R _{on})	4,57gO ₂ /gN	Nitrifikasi (k _n)	0,06/hari
Model penghalang oksigen dalam oksidasi	Exponential	Koreksi suhu	1,07
Parameter penghalang oksigen dalam oksidasi CBOD	0,5L/mgO ₂	Nitrate:	
Model oksigen penghalang dalam oksidasi nitrifikasi	Exponential	Denitrifikasi	0,004/hari
Parameter oksigen penghalang dalam nitrifikasi	0,5L/mgO ₂	Koreksi suhu	1,07
Model oksigen penentu denitrifikasi	Exponential	Koefisien transfer denitrifikasi sedimen	0,3m/hari
Parameter oksigen penentu denitrifikasi	0,5L/mgO ₂	Koreksi suhu	1,07
CBOD_{slow}:		Sedimen dasar sungai:	
Laju hidrolisis	0,01/hari	luas sedimen dasar sungai	60% luas hidrolis
Koreksi suhu	1,07	kebutuhan oksigen sedimen (SOD)	6 gO ₂ /m ² /hari
Laju oksidasi (k _{dcs})	0,23/hari	Metode penyelesaian integrasi	Runge-Kutta
Koreksi suhu	1,047	Calculation step (Δt)	0,046879 jam

lengkung DO tersebut terhadap observasi, rerata kesalahannya sebesar 0.019 ($< 0,05$). Untuk uji kesahihan, hasil observasi masih berada dalam rentang lengkung kelenturan DO maksimum dan minimum hasil perhitungan, dimana berdasarkan rerata kesalahannya terhadap observasi sebesar 0,0012 yang masih kurang dari 0,05 (Gambar 7b). Ini berarti parameter model lengkung DO yang diperoleh telah terkalibrasi serta sah. Dengan demikian model lengkung DO tersebut, dapat digunakan untuk uji kelenturan (Gambar 8).

kemiringan dasar sungai (UC2) ternyata telah berdampak pada kenaikan DO air sungai di sekitar ruas kilometer 15 s/d 23 hingga lebih tinggi dari model acuhannya, sedang pada ruas-ruas sungai lainnya meskipun sedikit namun lebih tinggi dari model acuhannya. Rerata perbedaan antara lengkung DO hasil perlakuan ini terhadap model acuhannya adalah sebesar 0,0623 mg/l. Rerata tersebut lebih dari 0,05 mg/l, ini berarti kelenturan lengkung DO acuan peka terhadap peningkatan kemiringan dasar sungai.



Gambar 7. Hasil Perhitungan dan Observasi Lengkung DO Sungai Citarum Hulu
(a : Hasil kalibrasi, b : Hasil uji kesahihan)

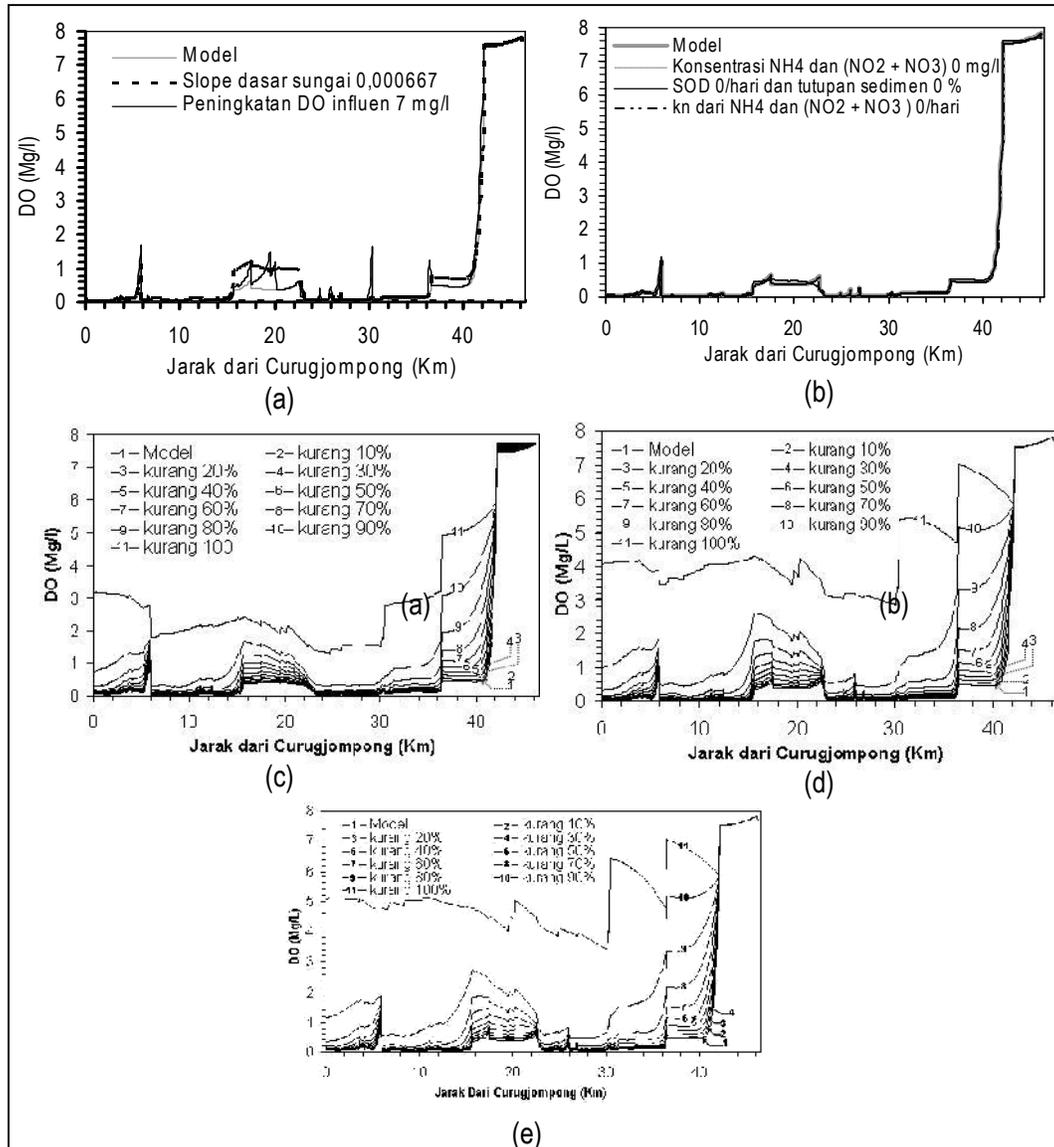
Hasil perlakuan UC1 terhadap lengkung DO acuan, terlihat bahwa dampak dari peningkatan konsentrasi DO air di titik-titik influen hingga 7 mg/l tersebut, hanya terjadi secara berarti pada kenaikan konsentrasi DO air sungai di ruas muaramuara influen anak-anak sungai yang besar seperti sungai Citarik, Cikeruh, Cisangkuy dan sungai Ciwidey (Gambar 8a). Sedangkan lengkung DO pada ruas-ruas sungai lainnya tidak mengalami perubahan secara berarti. Dimana rerata kesalahan lengkung DO hasil perlakuan peningkatan konsentrasi DO tersebut hingga 7 mg/l terhadap model acuhannya adalah sebesar 0,0492. Kesalahan tersebut kurang dari 0,05, ini dapat diartikan kelenturan lengkung DO acuan tersebut tidak peka terhadap peningkatan konsentrasi DO air di titik-titik influen hingga 7 mg/l. Peningkatan

Perlakuan dengan penurunan k_n air sungai hingga 0/hari maupun penurunan konsentrasi NH_4 dan (NO_2+NO_3) titik-titik influen hingga 0 mg/l, hasil lengkung DO-nya masih serupa dengan model acuhannya (Gambar 8b). Rerata kesalahan lengkung DO dari dua perlakuan tersebut dengan model acuan sama besarnya, yaitu $4,416E-6$. Demikian pula dengan perlakuan penurunan luasan tutupan sedimen sungai hingga 0% dan SOD sungai hingga $0 O_2/m^2/hari$, dimana hasil lengkung DO-nya masih serupa dengan model acuhannya. Rerata kesalahan lengkung DO hasil perlakuan penurunan tutupan sedimen dan SOD tersebut terhadap model acuhannya, adalah sebesar 0,0034 atau masih kurang dari 0,005. Melihat rerata kesalahan lengkung DO hasil perlakuan-perlakuan tersebut yang kurang dari 0,005 ini dapat

diartikan bahwa, lengkung DO acuan kelenturannya tidak peka terhadap penurunan konsentrasi NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$), penurunan k_n sungai, dan penurunanutupan sedimen serta SOD sungai

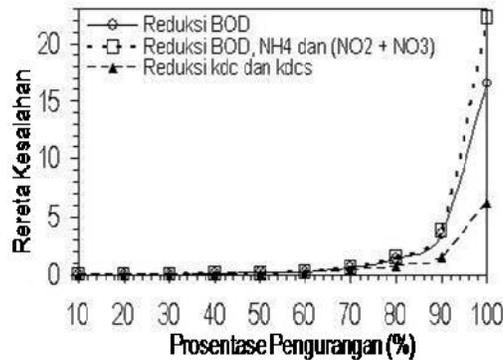
Semakin besar pengurangan k_{dc} dan k_{des} serta BOD_{fast} dan BOD_{slow} maka hasil simulasi lengkung DO-nya semakin

berbedadengan model acuanya (Gambar 8c; 9d). Perbedaan terhadap model acuanya tersebut akan semakin nyata bila dilakukan simulasi lengkung DO dengan pengurangan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) secara bersamaan di semua titik influen (Gambar 8e).



Gambar 8. Hasil Uji Kelenturan Lengkung DO sungai Citarum Hulu

(a) Hasil uji kelenturan dengan menaikkan konsentrasi DO air influen hingga 7 mg/l dan peningkatan kemiringan dasar sungai hingga 0,000667, (b) Hasil uji kelenturan dengan menurunkan konsentrasi NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) titik-titik influen serta SOD dan k_n sungai, (c) Hasil uji kelenturan dengan menurunkan k_{dc} dan k_{des} badan air sungai, (d) Hasil uji kelenturan dengan penurunan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air di titik influen, (e) Hasil lengkung DO dengan penurunan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) secara bersamaan di semua titik influen.

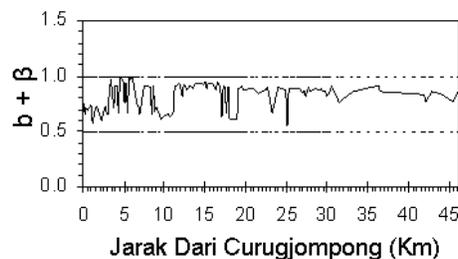


Gambar 9. Hasil Perhitungan Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap model Acuhan

Nilai rerata perbedaan lengkung DO perhitungan dengan observasi dari pengurangan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} serta pengurangan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan (NO_2+NO_3) titik-titik influen terhadap model acuhannya, mulai pengurangan 10% sampai dengan 30% masih serupa dengan model acuhannya (Gambar 9). Namun rerata tersebut setelah mencapai pengurangan 40% mulai berbeda dengan model acuhannya, dimana besarnya rerata tersebut 0,0691 untuk pengurangan BOD_{fast} dan BOD_{slow} serta sebesar 0,0692 untuk pengurangan BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan (NO_2+NO_3) . Sedangkan untuk k_{dc} dan k_{dcs} , mulai pengurangan 10% hingga pengurangan 40% masih serupa dengan model acuhannya, namun setelah pengurangan 50% yang rerata kesalahannya sebesar 0,089 mulai berbeda secara berarti dengan model acuhannya. Dari gambar 9 juga dapat dilihat bahwa kurva rerata kesalahan berbentuk eksponensial, dimana sejak dari pengurangan 10% hingga 80% masih landai namun setelah pengurangan 90% rerata

kesalahannya meningkat dengan cepat.

Dalam pembagian reach (gambar 3), pada ruas hulu jumlah reach sedikit dengan panjang 3,032 s/d 5,362 km karena penampang melintang pada ruas ini relatif seragam dan jumlah titik influennya sedikit. Lain halnya dengan ruas tengah dan hilir yang mempunyai penampang melintang relatif tidak seragam dan frekuensi masukan titik influen semakin tinggi. Disamping itu untuk mengetahui pengaruh dari setiap influen, maka setiap reach diusahakan dapat mewakili influen tersebut, sehingga pada ruas tengah dan hilir banyak dibuat reach yang pendek-pendek dengan jarak antar penampang melintangnya juga semakin rapat. Seperti telah diuraikan sebelumnya, karakteristik penampang melintang tiap reach tersebut menerapkan persamaan Leopold-Maddox (Gambar 4). Apabila eksponen b dengan β dari persamaan Leopold-Maddox dari setiap penampang reach tersebut dijumlah, maka nilai jumlah b dengan β bervariasi, yaitu dari 0,6 sampai <1 , dengan rata-rata 0,8227 (Gambar 10).



Gambar 10. Penjumlahan Eksponen Karakteristik Penampang Melintang Tiap Reach di Sungai Citarum hulu

Menurut Chapra (2006), jumlah eksponen dari karakteristik penampang melintang Leopold-Maddox harus ≤ 1 . Jumlah dua eksponen tersebut apabila 0,5 maka bentuk penampang melintang sungainya trapesium, lebih dari 0,5 tetapi kurang dari 1 maka bentuk penampang melintangnya segi empat, dan apabila jumlah dua eksponen tersebut lebih dari satu maka lebar penampang melintang sungai akan berkurang dengan kenaikan aliran sungainya. Apabila kriteria ini diterapkan pada hasil penjumlahan b dengan β (Gambar 10), maka rerata bentuk penampang melintang Sungai Citarum Hulu adalah segi empat yang lebar basah penampang melintang sungainya tidak akan berkurang dengan kenaikan alirannya.

Rerata bentuk penampang melintang Sungai Citarum Hulu yang demikian itu, apabila ada penambahan debit aliran, maka kedalamannya akan bertambah namun lebar basah penampang melintangnya cenderung tidak bertambah dan permukaan air dari reach juga tidak bertambah. Sehingga peningkatan kemampuan reaerasi di sungai tersebut hanya karena adanya peningkatan turbulensi yang disebabkan oleh peningkatan kecepatan aliran airnya. Namun apabila ditinjau dari setiap reach yang telah dibuat di Sungai Citarum Hulu, ruas sungai Km. 16 s/d 23 mempunyai kemampuan pengaliran air yang lebih tinggi, dan kemampuan kenaikan kedalamannya lebih rendah dibandingkan dengan reach-reach di ruas sungai hulu maupun di hilir. Disamping itu pada kilometer tersebut nilai penjumlahan b dengan β mendekati 0,5, maka pada ruas ini pada debit yang sama dengan ruas-ruas yang lain akan mempunyai luas permukaan air yang lebih luas, sehingga reaerasinya lebih tinggi dibanding ruas-ruas sungai lainnya. Hal tersebut juga dapat dilihat dari hasil DO observasi (Gambar 7), meskipun pada ruas sungai Km. 16 s/d 23 terdapat banyak masukan dari influen namun DO air masih lebih tinggi dibandingkan ruas di hilir dan hulunya.

Dari kalibrasi dan uji kesahihan parameter model (Tabel 3), telah diperoleh k_{dc} 0,47/hari, k_{des} 0,01/hari, k_n 0,06/hari, k_{dn} 0,004/hari, dan SOD 6 $gO_2/m^2/hari$. Penelusuran dalam studi pustaka, telah diperoleh parameter model laju oksidasi BOD_{fast} (k_{dc}) dan BOD_{slow} (k_{des}) 0,05 ~ 0,5/hari, laju nitrifikasi amonia-N (k_n) 0,05 ~ 0,5/hari dan laju dinitrifikasi nitrat-N (k_{dn}) 0,001 ~ 1/hari (Chapra, 1997). Disamping itu juga telah diperoleh acuan kebutuhan oksigen sedimen (SOD), yaitu untuk sungai alami hingga tingkat pencemaran rendah 0,1 ~ 1,0 $gr.O_2/m^2/hari$ dan untuk sungai agak tercemar hingga tercemar berat 5 ~ 10 $gr.O_2/m^2/hari$ (Schnoor, 1996). Apabila hasil kalibrasi parameter-parameter tersebut dibandingkan dengan hasil penelusuran pustaka, maka hasil kalibrasi k_{dc} , k_{des} , k_n , k_{dn} dan SOD masih dalam rentang tersebut. Dengan demikian hasil kalibrasi parameter-parameter model tersebut, selain sah juga sesuai dengan hasil peneliti-peneliti pendahulu. Disamping itu berdasarkan kriteria SOD tersebut, maka sungai Citarum termasuk pada sungai yang agak tercemar hingga tercemar berat.

Sungai dapat dianggap sebagai reaktor alami (Chapra, 1997). Apabila Sungai Citarum Hulu mengikuti anggapan tersebut, maka masukannya dari titik-titik influen dan keluarannya (effluent) adalah dari stasiun 398 di sungai. Dengan demikian dalam pembahasan ini akan berdasarkan pada perbandingan antara hasil akumulasi laju masukan aliran dari titik-titik influen dengan laju aliran dari stasiun 398.

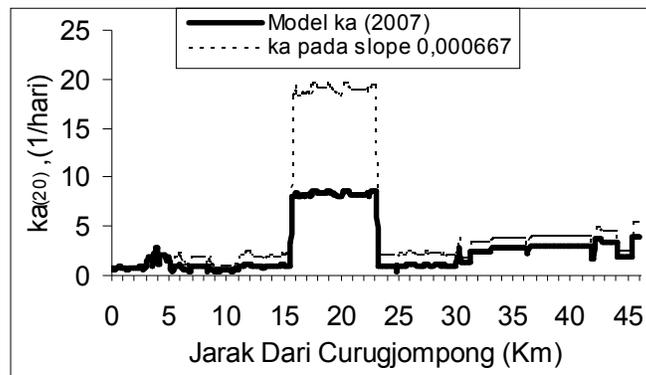
Dari hasil pengukuran pada saat pengambilan contoh air, selisih antara akumulasi laju aliran DO dari titik-titik influen dengan laju aliran DO sungai di stasiun 398 sebesar 44,137 mg/det pada akhir musim kemarau dan 119,14 mg/det pada pertengahan musim penghujan. Padahal selisih antara akumulasi laju aliran air dari titik-titik influen dengan laju aliran air sungai di stasiun 398 cenderung sama, yaitu 0,2 m^3/det untuk akhir musim kemarau

dan $0,72 \text{ m}^3/\text{det}$ untuk pertengahan musim penghujan. Dengan demikian apabila pasokan DO Sungai Citarum Hulu hanya dari titik-titik influen, berarti pasokan DO dari 2 pengambilan contoh air tersebut defisit selama perjalanan mengikuti aliran sungai pada ruas sebelum stasiun 398. Hal ini juga terlihat dari hasil simulasi dengan penampang hanya meningkatkan konsentrasi DO air di titik-titik influen hingga 7 mg/l , dimana hasil hitungan lengkung DO air sungainya masih tidak berbeda dengan model acuan, atau tidak dapat meningkatkan profil lengkung DO secara berarti. Hal ini membuktikan, pada kondisi beban saat ini apabila hanya mengandalkan pasokan DO dari titik-titik influen maka Sungai Citarum Hulu pada kondisi aliran minimum hingga reratanya tidak mampu meningkatkan konsentrasi DO airnya.

Sumber DO sungai selain dari pasokan aliran DO dari titik-titik influen, juga dapat dari reaerasi sungai itu sendiri. Berdasarkan formula Thackston-Dawson (Chapra, 2006), besarnya reaerasi tergantung pada radius hidrolis, kemiringan dasar sungai, kedalaman sungai dan lebar basah dari penampang melintang sungainya. Hasil interpolasi kemiringan dasar sungai telah menunjukkan ruas hulu dan hilir mempunyai kemiringan lebih curam dibandingkan di ruas tengah. Sebaliknya karakter penampang melintang sungai ruas tengah lebih dangkal

dan lebar bila dibandingkan dengan penampang melintang di ruas lainnya. Dengan kondisi yang demikian itu, maka Sungai Citarum Hulu mempunyai kemampuan reaerasi yang tinggi. Semetara ini Sungai Citarum Hulu telah di tingkatkan daya alirnya, yaitu dengan memperbaiki melintang dan pelurusan sungainya. Namun demikian di beberapa ruas masih terjadi banjir, sehingga muncul rencana peningkatan kecepatan alirnya dengan meningkatkan kemiringan dasar sungai yang ada. Apabila kemiringan dasar sungai tersebut ditingkatkan, maka kemampuan reaerasi sungai juga akan meningkat. Hal ini terlihat dari perhitungan reaerasi menggunakan formula Thackston-Dawson terhadap Sungai Citarum Hulu dengan meningkatkan rerata kemiringan dasar yang paling curam dari keadaan sekarang, yaitu $0,000667$ (Gambar 11).

Kenaikan reaerasi telah terjadi mulai dari kilometer 5 ke arah hulu, dan kenaikan berarti pada ruas kilometer 15 s/d 23, yaitu naik $\pm 12/\text{hari}$. Kemampuan reaerasi dengan peningkatan kemiringan Sungai Citarum Hulu tersebut, juga dapat menahan tekanan dari kebutuhan DO yang terjadi di badan air sungai. Sehingga lengkung DO hasil simulasi dengan peningkatan kemiringan dasar sungai tersebut juga telah terangkat dan berbeda dengan model acuan.



Gambar 11. Laju Reaerasi Sungai Pada Peningkatan Slope dan Model

Berdasarkan pada pembahasannya dua sumber DO air Sungai Citarum Hulu, yaitu pasokan konsentrasi DO dari titik-titik influen dan rearasi sungai. Maka dapat dikatakan, bahwa sumber DO pendukung kemampuan pulih sendiri DO Sungai Citarum Hulu lebih didominasi karena reaerasi sungai dibandingkan dengan peningkatan konsentrasi DO (pengenceran) dari titik-titik influennya.

Seperti telah diuraikan sebelumnya bahwa, Sungai Citarum Hulu telah dianggap suatu reaktor yang airnya mengandung DO, yang mana masukan dari titik-titik influen ke dalam reaktor tersebut, airnya mengandung karbon organik (BOD_{fast} dan BOD_{slow}) dan nitrogen anorganik (NH_4 , NO_2 , dan NO_3). Dengan demikian kandungan DO air dalam reaktor tersebut terlebih dulu digunakan untuk oksidasi karbon organik, sedang sisanya baru digunakan untuk proses nitrifikasi NH_4 (Chapra, 1997). Diketahui bahwa kebutuhan DO tersebut pada suhu air $20^\circ C$ untuk proses nitrifikasi (R_{on}) sebesar $4,57 \text{ gr. } O_2 / \text{ gr. } N$, dan tipekal untuk oksidasi aerobik karbon organik (R_{oc}) berkisar $2,69 \text{ gr. } O_2 / \text{ gr. } C$. Dalam proses nitrifikasi, pemeran utamanya adalah bakteri aerobik murni yang sangat peka terhadap ketersediaan oksigen yang ada (Grady, 1980). Apabila DO air yang tersedia $\geq 0,5 \text{ mg/l}$ maka proses nitrifikasi akan berlangsung, sebaliknya apabila DO air $< 0,5 \text{ mg/l}$ maka proses tersebut berhenti (Chapra, 1997). Sementara itu hasil pengukuran air Sungai Citarum Hulu dari dua pengambilan contoh air, pada umumnya konsentrasi DO airnya kurang $0,5 \text{ mg/l}$. Dalam kondisi kekurangan DO yang demikian itu, maka proses nitrifikasi di air Sungai Citarum Hulu juga tidak berjalan. Hal ini terlihat pada pengambilan contoh air di akhir musim kemarau selisih NH_4 sebesar $-0,13\%$ dan selisih (NO_2+NO_3) sebesar 10% , sedang pengambilan contoh air di pertengahan musim penghujan selisih NH_4 sebesar $-7,3\%$ dan selisih (NO_2+NO_3) sebesar $57,5\%$. Dalam kondisi yang

demikian itu, meskipun konsentrasi NH_4 dan ($NO_2 + NO_3$) di titik-titik influen diturunkan hingga 0 mg/l , maka dapat dikatakan DO air sungai Citarum juga tidak dapat meningkat. Hal ini juga terbukti dalam simulasi dengan pengurangan NH_4 dan ($NO_2 + NO_3$) air di titik-titik influen hingga konsentrasi 0 mg/l , dimana hasil lengkung DO air sungainya tidak berbeda dengan model acuan yang telah ditetapkan. Demikian juga dengan pengurangan k_n yang merupakan karakter proses dari nitrifikasi.

Pada kasus dimana konsentrasi DO air sungai kurang dari $0,5 \text{ mg/l}$ yang menyebabkan proses nitrifikasi berhenti, maka akan terjadi proses dinitrifikasi dari NO_3 ke NO_2 menjadi NH_4 yang akhirnya ke nitrogen (N_2) (Grady, 1980). Disamping itu pada kondisi miskin DO di air tersebut, akan terjadi pelepasan NH_4 dari sedimen (Chapra, 1997). Kondisi yang demikian itu, diperkirakan juga terjadi di badan air sungai Citarum Hulu, dimana selisih NH_4 di sungai yang negatif tersebut berarti tidak ada pengurangan yang terjadi, tetapi justru ada penambahan aliran massa NH_4 di air sungai Citarum Hulu. Penambahan tersebut diperkirakan dari pelepasan sedimen dan proses dinitrifikasi.

Pembahasan di atas memberi petunjuk bahwa, pada kondisi aliran dimana beban BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan ($NO_2 + NO_3$) hadir bersamaan di dalam air sungai seperti pada saat pengambilan contoh di akhir musim kemarau. Maka kehadiran beban nitrogen anorganik dari titik-titik influen bukan faktor utama yang mengendalikan kemampuan memulihkan DO dari sungai Citarum Hulu.

Hal tersebut juga terjadi pada hasil simulasi dengan pengurangan parameter kebutuhan oksigen dari sedimen (SOD). Oksidasi sedimen dasar sungai yang membutuhkan oksigen apabila sedimen tersebut dalam suasana aerobik ($DO \geq 0,5 \text{ mg/l}$). Kenyataannya DO air sungai Citarum Hulu kurang dari $0,5 \text{ mg/l}$. Sehingga DO yang tersisa untuk proses oksidasi di dalam

sedimen justru mengarah ke an-aerobik yang tidak perlu oksigen. Dengan demikian pada simulasi pembersihan sedimen hinggautupan 0% dan kebutuhan oksigen sedimen hingga 0 gr.O₂/m²/hari tidak dapat meningkatkan lengkung DO dari model acuhannya.

Memperhatikan selisih antara akumulasi laju aliran BOD_{fast} dan BOD_{slow} air di titik-titik influen dengan sungai di stasiun 398. Pada akhir musim kemarau, selisih BOD_{fast} 30,10% dan BOD_{slow} 26,27%, sedangkan pada pertengahan musim penghujan selisih BOD_{fast} 11,93% dan BOD_{slow} 10,93%. Dengan mendasarkan diri pada selisih tersebut dan dihubungkan dengan kehilangan DO air sungai seperti yang telah diuraikan sebelumnya. Maka selisih tersebut merupakan besarnya BOD_{fast} dan BOD_{slow} yang telah teroksidasi dengan menggunakan DO sebesar kehilangannya selama mengikuti aliran sungai hingga stasiun 398. Hal ini dibuktikan dari hasil simulasi lengkung DO dengan pengurangan konsentrasi BOD_{fast} maupun BOD_{slow} air di titik-titik influen. Semakin besar pengurangan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow}, maka lengkung DO air sungai semakin meningkat dan semakin berbeda dengan model acuhannya. Dimana dengan pengurangan konsentrasi BOD_{fast} dan BOD_{slow} air di titik-titik influen hingga 40%, telah meningkatkan lengkung DO air sungai yang jelas bedanya dengan model acuan. Pembuktian tersebut juga dikuatkan dengan simulasi pengurangan parameter proses oksidasi BOD_{fast} (k_{dc}) dan BOD_{slow} (k_{dcs}) yang terjadi di badan air sungai. Dimana semakin kecil k_{dc} dan k_{dcs} maka kinerja penggunaan DO juga semakin kecil, sehingga lengkung DO hasil simulasi juga semakin meningkat dan semakin berbeda dengan model acuhannya.

Dari pembahasan di atas telah diketahui, bahwa pemakai utama DO air sungai Citarum Hulu adalah kehadiran karbon organik (BOD_{fast} dan BOD_{slow}). Dimana kurva rerata kesalahan hasil

simulasi lengkung DO dengan model acuhannya berbentuk eksponensial (gambar 10). Dimana dengan hanya menaikkan beban 10% (dari 100% ke 90%), rerata kesalahan lengkung DO terhadap model acuhannya turun ± 15 . Sebaliknya pengurangan dari 10% hingga 90% rerata kesalahannya naiknya sangat sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa, kemampuan pulih sendiri DO air sungai Citarum Hulu sangat rentan sekali terhadap kehadiran beban karbon organik (BOD_{fast} dan BOD_{slow}).

Pada simulasi dengan pengurangan BOD_{fast} dan BOD_{slow} titik-titik influen hingga 40%, sisa DO air sungai telah mulai meningkat. Apabila simulasi pengurangan tersebut ditingkatkan lagi hingga sisa DO telah cukup, maka proses nitrifikasi di badan air sungai tersebut juga dapat mulai berjalan. Sehingga kemampuan reaerasi sungai yang terjadi lebih dapat meningkatkan konsentrasi DO air sungai secara berarti. Kondisi yang demikian itu terlihat dari simulasi dengan pengurangan konsentrasi BOD_{fast}, BOD_{slow}, NH₄ dan (NO₂ + NO₃) air di titik-titik influen secara bersamaan (gambar 8e).

Oksidasi aerobik dari material karbon organik dan nitrogen anorganik yang hadir di dalam badan air sungai, merupakan pengguna utama DO yang ada di dalam air sungai (Thomann, 1987). Sehingga dapat dikatakan, apabila material tersebut tidak hadir maka DO air sungai mendekati kondisi alaminya. Demikian pula dengan sungai Citarum Hulu, kondisi alami tersebut telah diperagakan dengan Lengkung DO air sungai dari pengurangan konsentrasi BOD_{fast}, BOD_{slow}, NH₄ dan (NO₂ + NO₃) titik-titik influen sebesar 100 % (gambar 8e). Hasil peragaan ini menunjukkan, dengan hanya menaikkan beban 10% (dari pengurangan 100% ke 90%), maka rerata kesalahan lengkung DO terhadap model acuhannya turun ± 20 (lihat gambar 9). Kemudian pada pengurangan lebih rendah dari 90% kesalahannya makin linear, dimana DO air sungai yang tersisa semakin menjadi kendala dalam proses oksidasi aerobik, dan

aerasi sungai tidak dapat mengimbangi kebutuhan DO. Maka pada peragaan ini telah menunjukkan bahwa, Sungai Citarum Hulu sangat lemah kemampuan pulih-sendiri DO airnya.

Berdasarkan pembahasan di atas dan memperhatikan upaya Prokasih yang telah berhasil mendorong lebih dari 80% industri yang ada di DAS Citarum Hulu untuk memasang IPAL dengan efisiensi penyisihan BOD mencapai 50 s/d 60%, dan program BUDP telah berhasil menyalurkan 75% air limbah penduduk kota Bandung ke dalam IPAL Bojongsoang yang efisiensi penyisihan BOD dan NH_4 telah mencapai 45 s/d 50%. Sementara itu titik-titik influen dalam penelitian ini merupakan keluaran (out let) dari sub DAS anak Sungai Citarum Hulu yang melingkupi kawasan industri dan pemukiman, keluaran air limbah dari industri secara individual maupun kolektif, dan keluaran air limbah kawasan pemukiman. Dengan demikian contoh air yang telah diambil dari titik-titik influen tersebut, merupakan keluaran dari hasil pengurangan beban yang telah diupayakan oleh Prokasih dan BUDP. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi pada debit aliran di akhir musim kemarau (debit aliran rendah), untuk mencapai kondisi DO air sungai sesuai dengan baku mutu yang berlaku ($\geq 3 \text{ mg/l}$) diperlukan penurunan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) sebesar lebih dari 90% .

Memperhatikan besarnya beban karbon organik dan nitrogen anorganik dari air limbah industri dan penduduk yang beraktivitas di DAS Citarum Hulu (Salim, 2002 dan Bukit, 2002) dan hasil dari pengambilan contoh air yang telah dilakukan dalam penelitian ini dengan kondisi lengkung DO alami air Sungai Citarum Hulu hasil simulasi. Maka dapat dikatakan beban tersebut terlalu berat (*over-load*) bila dibandingkan dengan kemampuan pulih-sendiri DO alami Sungai Citarum Hulu. Sementara itu, untuk mencapai DO baku

mutu di air Sungai Citarum hulu, dari hasil simulasi diperlukan penurunan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) sebesar lebih dari 90% . Pada kondisi yang demikian itu, maka diperlukan IPAL canggih yang operasinya sangat rumit dan memerlukan biaya tinggi (Metcalf, 1991). Padahal faktor utama yang menjadi kendala belum berhasilnya Prokasih dalam pengendalian pencemaran tersebut adalah biaya dan kemampuan sumber daya manusia dalam operasional IPAL (Tim PROKASIH, 2007). Maka upaya Prokasih dalam perbaikan DO air Sungai Citarum Hulu tersebut, dapat diperkirakan kemungkinan berhasilnya sangat kecil.

KESIMPULAN

Model sistem kualitas air QUAL2K dapat untuk meperagakan proses kejadian DO akibat beban buangan karbon organik dan nitrogen anorganik di badan air Sungai Citarum Hulu. Dimana hasil simulasi dari model tersebut dapat diketahui:

- kemampuan pulih-diri DO air Sungai Citarum Hulu pada kondisi aliran rendah hingga aliran reratanya serta kondisi beban karbon organik dan nitrogen anorganik seperti saat penelitian dilakukan, sulit ditingkatkan. Demikian juga dengan hasil simulasi peningkatan konsentrasi DO air dan penurunan konsentrasi nitrogen anorganik influen, penurunan laju nitrifikasi nitrogen anorganik pada air Sungai Citarum Hulu serta pembersihan sedimen dasar masih tidak dapat meningkatkan kemampuan pulih-diri sungai tersebut.
- Sedangkan melalui peningkatan kemiringan dasar sungai, penurunan konsentrasi karbon organik di titik-titik influen, penurunan laju oksidasi karbon organik di sungai, dan penurunan konsentrasi karbon organik dan nitrogen anorganik secara bersamaan di titik-titik influen dapat menaikkan kemampuan

pulih-sendiri DO air Sungai Citarum Hulu pada kondisi aliran rendah hingga aliran reratanya.

REKOMENDASI

Mengingat daya pulih-sendiri DO Sungai Citarum Hulu sangat lemah, sehingga diperlukan kemampuan penyisihan konsentrasi BOD_{fast} , BOD_{slow} , NH_4 dan $(NO_2 + NO_3)$ lebih dari 90%. Untuk itu diperlukan pembatasan berkembangnya industri penghasil air limbah yang mengandung karbon organik dan nitrogen anorganik di dalam DAS Citarum Hulu, penggantian bahan dan proses produksi industri sehingga dapat memperkecil air limbah yang mengandung karbon organik dan nitrogen anorganik, dan peninjauan beban masukan karbon organik tiap titik influen yang dikombinasikan dengan peningkatan aliran rendah (low flow augmentation) dan peningkatan reaerasi sungai.

DAFTAR PUSTAKA

- APHA., 1995, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington DC.
- Bukit, N.T., & I.A. Yusuf, 2002, Beban Pencemaran Limbah Industri dan Status Kualitas Sungai Citarum, *J. Teknologi Lingkungan*, 3(2), 98 – 106.
- Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) Pemerintah Propinsi Jawa Barat, 2001, Pola Pengendalian Pencemaran Air Di DAS Citarum Hulu s/d Tengah,
- Chapra. S.C., 2006, Qual2K : A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.04) : Documentation and User Manual, Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Chapra, S.C., 1997, Surface Water Quality modeling, New York, McGraw-Hill.
- Harsono, E., 2009, Identifikasi Titik-Titik Masukan Aliran Material Konsumer Oksigen Terlarut (DO) Air Sungai Citarum Hulu, *Limnotek No.1*, Vol. XVI, 33 – 45.
- Harsono, E., 2010, Pencirian Karbon Organik Air Sungai Citarum Hulu Dari Masukan Air Limbah Penduduk dan Industri, *Journal Biologi Indonesia No.2*, Vol. 6, 277- 288.
- Grady, C.P.L., & Lim, H.C., 1980, Biological Wastewater Treatment, Theory and Applications, Marcel Dekker inc., New York.
- Kantor Statistik Kota Bandung, 2007, Hasil Sensus Penduduk 2005, Perwakilan BPS Kantor Statistik Kota Bandung.
- Kantor Statistik Kabupaten Bandung, 2007, Hasil Sensus Penduduk 2005, Perwakilan BPS Kantor Statistik Kabupaten Bandung.
- Metcalf & Eddy, Inc., 1991, Wastewater Engineering, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Republic Of Indonesia Ministry of Public Works Directorate General of Water Resources Development, 1992, Upper Citarum Basin Urgent Flood Control Project, Documents Tendering Construction Package A~F.
- Salim, H., 2002, Beban Pencemaran Limbah Domestik dan Pertanian Di DAS Citarum, *J. Teknologi Lingkungan*, 3(2), 107-111.
- Schnoor, J.L., 1996, Environmental Modeling, Fate and Transport of Pollution in Water, Air and Soil, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Thomann, R.T., 1987, Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row, Publishers, New York.

- Wangsaatmadja, S., 2007, Evaluasi Kebijakan Pengendalian Pencemaran Sungai Citarum Hulu Melalui Pendekatan Daerah Aliran Sungai Terpadu, J. Infrastruktur dan Lingkungan Binaan, 3(2), 68 – 79.
- Wanielista, M., Kersten, R., & Ealin, R., 1997, Hydrology : Water Quantity and Quality Control, John Wiley & Sons, New York.