

**PENENTUAN PARAMETER KINETIK  
MODEL KUALITAS AIR UNTUK SUNGAI:  
STUDI KASUS DI ZONA HULU SUNGAI CITARUM**

**DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS FOR RIVER WATER QUALITY  
MODEL: A CASE STUDY IN THE UPPER ZONE OF CITARUM RIVER**

**Iskandar A. Yusuf**

Balai Lingkungan Keairan Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air  
Jl. Ir. H. Juanda 193 Bandung, Jawa Barat, Indonesia  
E-mail: iayusuf@yahoo.com

Diterima: 19 November 2015; Direvisi: November 2015; Disetujui: 26 Februari 2016

**ABSTRAK**

*Seiring dengan berkembangnya daerah perkotaan dan/atau industri, banyak sekali sungai-sungai terkontaminasi air limbah menjadi tercemar berat sehingga perlu melakukan pengendalian pencemaran air yang diantisipasi dengan melakukan pemodelan kualitas air. Pusat Litbang Sumber Daya Air mengkaji besaran nilai parameter kinetik untuk pemodelan kualitas air di sungai guna memberikan acuan cara penaksiran awal parameter kinetik agar memudahkan pelaksanaan kalibrasi model secara baik sehingga model yang didapat sesuai dengan kondisi lapangannya. Metode kajian untuk membuat acuan cara penaksiran awal besaran parameter kinetik secara umum: 1) berdasarkan berbagai referensi yang ada baik berupa tabel dan/atau rumus; 2) dengan menghitung perbedaan kadar kualitas air antar lokasi sampling di hulu dan hilir. Sedangkan untuk penaksiran awal koefisien urai BOD selain dua cara tersebut di atas juga disajikan cara pengujian kualitas air secara khusus dengan uji laboratorium parameter BOD harian selama 12 hari. Hasil dari penelitian ini yaitu memberikan dengan cara melakukan penaksiran parameter kinetik awal secara rinci yang disesuaikan dengan kondisi kinetik dan hidraulik sungainya akan dapat memberikan kemudahan pelaksanaan kalibrasi model kualitas air. Untuk memberikan batasan kontrol nilai parameter kinetik dibuatkan tabel rentang nilai minimum sampai dengan maksimum berbagai parameter kinetik dan disajikan pula acuan tabel dan rentang nilai parameter kinetik yang pernah terukur di Indonesia agar menghasilkan model kualitas air yang baik.*

**Kata kunci:** Kualitas air, parameter kinetik, sungai, kalibrasi model, validasi model

**ABSTRACT**

*Along with the development of urban and industrial areas, a lot of river contaminated by wastewater become heavily polluted river so it is necessary to control water pollution which is anticipated by water quality modeling. Researcher from Research Center for Water Resources conducts research to assess the magnitude of kinetic parameters for river water quality modeling in order to provide reference to the way the initial kinetic parameter estimation in order to facilitate the implementation of good calibration so that the model obtained approached the field conditions. Appraisal method to make reference to the way the the initial kinetic parameters in general: 1) based on various of exist references in the form of tables and or formulas, 2) by calculating the change in water quality between upstream and downstream sampling locations. For initial estimation of BOD decay coefisien beside two methodes appoiresaid, also water quality testing in particular calculation of laboratory test results of daily BOD for 12 days. Results from this research that provides the way to carry out a preliminary assesment of kinetic parameters in detail based on the conditions of river kinetic and hydraulic that give easy of the water quality model calibration. To give control restrictions have created a table minimum to maximum range value of several kinetic parameters and also presented a reference table and the range of values ever measured kinetic parameters in Indonesia to produce a good water quality models.*

**Keywords:** Water quality, kinetic parameters, river, model calibration, model validation

## PENDAHULUAN

Berkembangnya perkotaan yang diiringi dengan pertumbuhan penduduk beserta kegiatan-kegiatannya yang berdampak bertambah buruknya lingkungan sungai-sungai khususnya yang melalui daerah perkotaan dan/atau daerah industri. Pada umumnya sungai-sungai ini tercemar berat. Berbagai upaya yang telah dilakukan dengan diberlakukannya Undang-undang Otonomi Daerah termasuk perangkat peraturan yang mengikutinya, kewenangan Pemerintah Kabupaten/Kota serta Provinsi menjadi sangat kuat untuk melakukan pengaturan di wilayah administratifnya. Selain itu kewajiban yang terkandung dalam PP No. 82/2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, pemerintah daerah diwajibkan untuk melakukan inventarisasi sumber air, penilaian status mutu air dan penetapan daya tampung beban pencemaran air untuk semua sungai yang berada di lingkup kewenangannya, termasuk anak-anak sungainya.

Untuk menunjang hal tersebut, pemerintah mengeluarkan KepMen Lingkungan Hidup (LH) No. 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air dan KepMen LH No. 110 Tahun 2003 tentang Perhitungan Daya Tampung Beban Pencemaran Air (DTBPA) dengan metode perhitungan dari mulai yang sederhana sampai aplikasi pemodelan kualitas air. Selain peraturan dan perundangan, upaya-upaya pemerintah yang berupa program dari Kementerian LH seperti Program Kali Bersih (Prokasih), Superkasih, Proper dan Super Kelola serta diseminasi teknologi yang berupa percontohan seperti IPAL domestik di Bojongsoang dan IPAL industri di Cisirung (Yusuf, 2012).

Terkait dengan perhitungan DTBPA ataupun pemodelan kualitas air, yang saat ini banyak sekali *piranti lunak* baik yang *open source* ataupun menggunakan *lisensi* dengan menyajikan berbagai opsi pemodelan kualitas air. Namun di sisi lain banyak pemodel yang agak kurang memahami latar belakang teorinya termasuk berbagai asumsinya dan lebih-lebih adanya kemampuan

kalibrasi mandiri, yang hasil parameter kinetiknya berada di luar rentang minimum-maksimum teoritisnya sehingga outputnya hanya merupakan hasil perhitungan matematis saja tidak menggambarkan kondisi sebenarnya. Sehubungan dengan hal ini Pusat Litbang Sumber Daya Air melakukan penelitian untuk mengkaji besaran nilai parameter kinetik untuk pemodelan kualitas air guna memberikan arahan cara penaksiran awal koefisien kinetik model yang cukup akurat agar hasil parameter kinetik yang didapat sesuai dengan kenyataan kondisi lapangannya.

Lingkup kegiatan penelitian ini meliputi: penentuan besaran parameter kinetik model yang berdasarkan karakteristik/jenis air, pengujian secara khusus dan analisis perbedaan kadar parameter kualitas air hulu dan hilirnya untuk mendapatkan koefisien urai, aerasi dan settling untuk parameter kalitas air: BOD, COD, senyawa nitrogen dan fosfor, parameter non konservatif serta parameter bakteriologi.

Maksud dan tujuan dari penelitian ini untuk memberikan acuan cara penentuan parameter kinetik yang dimulai dari penaksiran besaran parameter kinetik secara rinci berdasarkan karakteristik/jenis air guna kemudahan proses kalibrasi dan/atau validasi model kualitas air suatu sungai agar hasilnya sesuai dengan kondisi lapangannya.

## KAJIAN PUSTAKA

### a Penggunaan piranti aplikasi

Penggunaan piranti lunak aplikasi pemodelan kualitas air, sangat tergantung pada kondisi sungai. Jika sungai kecil mempunyai kecepatan aliran < 0,4 m/s dan pada musim kemarau mempunyai *travel time* kurang dari satu hari, maka pemodelan kualitas air sudah cukup akurat dengan metode neraca massa sederhana (Yusuf, dkk., 2005). Untuk pertimbangan secara umum dari pemodelan kualitas air dengan memperhatikan berbagai faktor seperti disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Penggunaan Aplikasi Model Kualitas Air untuk Berbagai Kondisi Sungai

No	Metode	Panjang Sungai (Km)	Luas Sub-DAS/DAS (Km <sup>2</sup> )	Travel time <sup>****)</sup> (hari)	Kondisi DAS
1.	Neraca Massa sederhana	1 – 25	1 – 15	< 1	1)
2.	Model DO vs BOD	20 – 100	10 – 350	< 2	2)
3.	Model Multi Parameter <sup>*)</sup>	80 – 300	200 – 10.000	< 5	3)
4.	Model Multi Parameter <sup>**)</sup>	> 300	> 5.000	> 5	3) + 4)

1) alami (hutan dan daerah pertanian) tidak ada pencemaran

2) permukiman kepadatan rendah

3) permukiman kepadatan tinggi

4) kawasan industri

Sumber: Pusat Litbang SDA, 2012

\*) 2 s.d. 10 parameter kualitas air

\*\*) > 10 parameter kualitas air

\*\*\*) travel time pada ruas sungainya saja

**b Parameter kinetik model kualitas air**

Penentuan koefisien parameter kinetik umumnya dilakukan secara *trial and error* sampai mendapatkan hasil kalibrasi dan/atau validasi model yang memenuhi batas keberterimaan. Dalam penelitian ini dilakukan pengumpulan data koefisien parameter kinetik model kualitas air dari dua referensi yaitu model Qual-II<sup>E</sup> (Loucks, D.P dalam Biswas, 1981 dan Bowie dkk, 1985) dan Modqual (Smiths, 1990), yang setelah dilakukan penyesuaian satuan maka disusunlah nilai rentang minimum sampai dengan maksimum untuk berbagai koefisien parameter kinetik yang

berdasarkan pendekatan teoritis seperti pada Tabel 2. Hal ini dimaksudkan untuk dijadikan sebagai kontrol batasan nilai parameter kinetik jangan sampai pada saat melaksanakan kalibrasi atau validasi model parameter kinetiknya berada di luar rentang nilai acuan.

**1) K<sub>1</sub>: Koefisien Urai BOD**

Secara umum, nilai koefisien urai BOD dibedakan berdasarkan jenis air dan/atau karakteristik airnya yang di dalam beberapa literatur perkiraan K<sub>1</sub> seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4.

**Tabel 2** Koefisien Parameter Model Kualitas Air

No.	Simbol	Parameter Model Kualitas Air	Rentang	Satuan	Kehandalan	Variabel	Koreksi Suhu
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	$\alpha_0$	Rasio Klorofil-a terhadap Algae	500 - 100	$\mu\text{gChl-a/mg A}$	Cukup	a)	
2	$\alpha_1$	Fraksi biomas Algae yg $\text{NO}_3$	0,08 - 0,09	$\text{mgN/mg A}$	Baik		
3	$\alpha_2$	Fraksi biomas Algae yg P	0,012 - 0,015	$\text{mgN/mg A}$	Baik		
4	$\alpha_3$	Produksi $\text{O}_2$ per unit pertumbuhan Algae	1,4 - 1,8	$\text{mgO/mg A}$	Baik		
5	$\alpha_4$	Pengambilan $\text{O}_2$ per unit pernafasan Algae	1,6 - 2,3	$\text{mgO/mg A}$	Cukup		
6	$\alpha_5$	Pengambilan $\text{O}_2$ per unit oksidasi $\text{NH}_3$	3,0 - 4,0	$\text{mgO/mg N}$	Baik		
7	$\alpha_6$	Pengambilan $\text{O}_2$ per unit oksidasi $\text{NO}_2$	1,0 - 1,14	$\text{mgO/mg N}$	Baik		
8	$\mu_A$	Pertumbuhan spesifik Algae maksimum	1,0 - 3,0	1/h	Baik	b)	1,016
9	$\rho$	Laju pemapasan Algae	0,05 - 0,5	1/h	Cukup	b)	1,016
10	$\beta_0$	Konstanta laju oksidasi biokimia $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NH}_3\text{-N}$	** 0,05 - 0,35	1/h	Cukup	b)	1,047
11	$\beta_1$	Konstanta laju oksidasi biokimia $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2\text{-N}$	0,1 - 0,5	1/h	Cukup	a) b)	1,080
12	$\beta_2$	Konstanta laju oksidasi biokimia $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$	0,5 - 2,0	1/h	Cukup	a) b)	1,080
13	$\beta_3$	Laju pengendapan fosfat partikulat	** 0,0 - 2,0	1/h	Cukup	a)	
14	$\sigma_1$	Laju pengendapan (lokal) Algae	0,15 - 1,83	m/h	Cukup	a)	
15	$\sigma_2$	Laju (sumber) benthos untuk P	*	$\text{mgP/h/m}$	Rendah	a)	
16	$\sigma_3$	Laju (sumber) benthos untuk $\text{NH}_3$	*	$\text{mgN/h/m}$	Rendah	a)	
17	$\sigma_4$	Laju pelepasan amonium dasar	** 0,0 - 0,5	$\text{gN}/(\text{m}^2.\text{h})$	Rendah	a)	
18	$K_1$	Koefisien urai BOD	0,05 - 2,0	1/h	Rendah	a) b)	1,047
19	$K_2$	Koefisien reaerasi	0,0 - 100	1/h	Baik	a) b)	1,016
20	$K_3$	Koefisien pengendapan BOD	** 0,0 - 2,0	1/h	Cukup	a)	
21	$S_B$	Kebutuhan oksigen sedimen dasar $S_B$	** 0,5 - 40	$\text{gO}_2/(\text{m}^2.\text{h})$	Rendah	a)	
22	$K_5$	Koefisien decay COD	0,05 - 1,0	1/h	Baik	a) b)	1,047
23	$K_5'$	Koefisien pengendapan COD	** 0,0 - 1,8	1/h	Cukup	a)	
24	$K_6$	Koefisien decay Bakteri Koli	0,5 - 4,0	1/h	Cukup	a) b)	1,047
25	$K_{\text{NO}_3}$	Konstanta jenuh $\text{NO}_3\text{-N}$ utk pertumbuhan Algae	0,2 - 0,4	$\text{mg/L}$	Cukup		
26	$K_P$	Konstanta jenuh P utk pertumbuhan Algae	0,03 - 0,05	$\text{mg/L}$	Cukup		
27	$K_L$	Konstanta jenuh cahaya utk pertumbuhan Algae	260	Langleys/h	Cukup		
28	$\gamma_r$	Koefisien urai radionuklida	*	1/h	Rendah		
29	$\gamma_a$	Koefisien penyerapan radionuklida	*	1/h	Rendah		
30	$f_{ad}$	Laju adsorpsi (degradasi Org-P) fosfat	** 0,01 - 1,0	1/h	Cukup		
31	$f_{de}$	Laju desorpsi fosfat	** 0,0 - 0,10	1/h	Cukup		

Keterangan: \* rentang nilai yang sangat besar; a) Variabel dalam ruas sungai  
 Sumber: Biswas, A.K, 1981 dan George et al., 1985; serta \*\*) Smiths, 1990.

b) Dipengaruhi temperatur

**Tabel 3** Perkiraan nilai K<sub>1</sub> Air Limbah Domestik berdasarkan Tingkat Pengolahan

No.	Karakteristik Air	K <sub>1</sub> pada 20°C (1/hari)		BOD <sub>u</sub> /BOD <sub>5</sub>
		Rentang	rata-rata	
1.	Tanpa pengolahan	0,3 - 0,4	0,35	1,2
2.	Primer/sekunder	0,1 - 0,3	0,20	1,6
3.	Lumpur aktif	0,05 - 0,1	0,075	3,2
4.	Primer - Tingkat lanjut (Advance), rentang efluen 1 - 100 mgBOD/L	0,042 - 0,132	0,087	2,84 + 1,17 rata <sup>2</sup> + SB

Sumber: Thomman and Mueller, 1987

**Tabel 4** Perkiraan nilai  $K_1$  berdasarkan Jenis Air

No.	Jenis Air	$K_1$ pada 20°C (1/hari)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)
1.	Air Keran	< 0,1	0 – 1
2.	Air Permukaan	0,1 – 0,23	1 – 30
3.	Air limbah domestik ringan-berat	0,35 – 0,40	150 – 250
4.	Air limbah industri ringan-berat	0,40 - 0,65	250 - 550
5.	Air limbah yang telah diolah	0,12 – 0,23	10 – 30

Sumber: Fair et al., 1968.

**Tabel 5** Pendekatan nilai  $K_2$  (Berdasarkan Nama Peneliti)

No	Peneliti	Karakteristik Hidraulik			$K_2$ (1/hari)
		W:Lebar Sungai (m')	H:Kedalaman air (m')	U:Kecepatan (m/s)	
1.	O'Connor & Dobbins	2,5 – 100	0,30 – 9,15	0,15 – 0,50	$(D_o \cdot U)^{0,5} \cdot H^{-1,5}$
2.	O' Connor	2 – 60	0,30 – 9,15	0,15 – 0,50	$42,32 \cdot U^{0,5} \cdot H^{-1,5}$
3.	Churchil	20 – 40	0,30 – 3,35	0,50 – 1,50	$25,71 U H^{-1,5}$
4.	Owen et al.	1 – 20	0,12 – 0,75 0,12 – 0,30	0,03 – 0,55 0,03 – 1,50	$26,76 \cdot U^{0,67} \cdot H^{-1,85}$

Sumber: Thomman and Mueller, 1987

**Tabel 6** Perkiraan nilai  $K_2$  (Berdasarkan Kondisi Perairan)

No.	Badan Air	$K_2$ pada 20°C * (1/hari)	U: Kecepatan ** (m/s)
1.	Kolam atau sungai kecil (B < 20 m')	0,10 – 2,3	< 0,55
2.	Sungai berbelok dan dangkal	0,23 – 0,35	
3.	Sungai besar (kecepatan rendah)	0,35 – 0,46	
4.	Sungai besar	0,46 – 0,69	0,55 < U < 1,50
5.	Sungai turbulen	0,69 – 1,15	
6.	Aliran cepat, air terjun	> 1,15	> 1,50

Sumber: \* KepMen LH No. 110 Tahun 2003. \*\* Yusuf, I. et al., 2005

**2)  $K_2$  : Koefisien Reaerasi**

Besaran koefisien reaerasi dipengaruhi oleh parameter hidraulik seperti: koefisien difusi, kecepatan aliran dan kedalaman airnya. Secara umum formulasi untuk koefisien reaerasi cukup banyak yaitu diantaranya: Streter & Phelps, O'Connor & Dobbins, O'Connor, Churchil, Owen, Krenkel & Orlob, Langbein dan Tsivoglou. Namun secara umum yang cocok di Indonesia untuk berbagai rumusan diantaranya: O'Connor & Dobbins, O'Connor, Churchil, dan Owen (Yusuf, 2005). Besaran  $K_2$  dari beberapa hasil para peneliti yang disajikan seperti pada Tabel 5. Sedangkan klasifikasi berdasarkan kondisi perairan yang mempengaruhi  $K_2$  yaitu dari jenis badan airnya disajikan pada Tabel 6.

**3)  $K_3$ : Koefisien Pengendapan BOD**

Di dalam pemodelan kualitas air perkiraan  $K_3$  dapat dikatakan sangat jarang dibahas secara detail, namun pada umumnya mengindikasikan bahwa koefisien ini sangat dipengaruhi oleh kandungan sedimen suspensi (SS) dalam air dan kecepatan aliran airnya itu sendiri. Kecepatan aliran:  $U \leq 0,3$  m/s memungkinkan terjadinya pengendapan yang secara umum sering didekati oleh formula Stokes:  $V_s = 0,033634 (\rho_s - \rho)d^2$ , sehingga rentang nilai koefisien secara empirik

yang diukur di laboratorium yaitu antara 0,0 – 2,0 1/hari (Smiths, 1990) dan yang pernah terukur pada beberapa sungai di Indonesia untuk di musim peralihan mengikuti 0,02% x SS, tetapi secara umum yaitu sekitar 0,005 – 1, 0 1/hari (Yusuf, dkk, 2005), dan bahkan selain dipengaruhi oleh kadar SS juga pengendapan dipengaruhi oleh kadar salinitas (Benson, B.B and D.Krause, Jr, 1984).

**4)  $K_4$ : Kebutuhan Oksigen Sedimen Dasar**

Kebutuhan oksigen sedimen dasar (KOSD) adalah kebutuhan oksigen yang diserap oleh sedimen dasar. Sebenarnya besaran ini tidak secara langsung dipengaruhi oleh jenis air limbah atau besaran kadar parameter lainnya, namun sangat dipengaruhi oleh jenis bacteria, mikro organisme atau juga tumbuhan air yang hidup pada lumpur dasar sungai atau perairan itu sendiri. Untuk keadaan normal, sungai dengan laju aliran > 0,3 m/s, nilai  $S_B$  hampir tidak berpengaruh, namun untuk sungai yang menggenang sampai reservoir atau juga danau menjadi semakin bermakna adanya. Formulasi dari koefisien untuk KOSD:  $K_4 = \frac{S_B}{H}$ . Kalau dilihat dari rumusan tersebut, nilai  $K_4$  merupakan besaran kebutuhan oksigen dasar ( $gO_2/m^3/hari$ ) untuk saluran atau sungai dalam satuan yang mempunyai hubungan dengan

kedalaman air. Besaran untuk perkiraan dari KOSD seperti pada Tabel 7.

**5) K<sub>5</sub>: Koefisien decay COD**

Parameter ini ditentukan oleh besaran K<sub>5</sub> seperti halnya K<sub>1</sub> di atas, maka formulasi parameter kinetik K<sub>5</sub> adalah  $\frac{dL_2}{dt} = -K_5 \cdot L_2$  dan persamaan ini menjadi:  $L_2 = L_{o2} \cdot e^{K_5 t}$  (Smiths, 1990).

**6) K<sub>6</sub>: Koefisien Urai Bakteri Koli**

Koefisien urai bakteria atau organisma lainnya tergantung pada tipe badan airnya. Beberapa faktor yang mempengaruhi kehidupan organisma di dalam badan air adalah:

1. Temperatur, salinitas, predasi, defisiensi nutrien, zat toksik
2. Sinar Matahari
3. Settling dan resuspensi
4. Pertumbuhan

Faktor-faktor tersebut bervariasi tergantung dari kondisinya, maka secara umum diformulasikan:  $K_6 = K_{b1} + K_{b2} + K_{b3} - K_{b4}$ . Formulasi parameter kinetik K<sub>6</sub> adalah  $\frac{dF}{dt} = -K_6 F$  dan persamaan ini menjadi:  $F = F_o \cdot e^{K_6 t}$  (Chen, C.W and G.T. Orlob, 1975). Kisaran K<sub>6</sub> untuk air tawar antara 0,12 - 26,0 1/hari dengan nilai median sebesar 1,0 1/hari sedangkan untuk air laut urai bakteri yang lebih cepat dengan formulasi:  $K_6 = 0,8 + 0,06 \times \% \text{ Salinity}$  (Thomman and Mueller, 1987).

**c Perbandingan Beberapa Piranti Aplikasi**

Pemodelan kualitas air pada penelitian ini adalah menggunakan model kualitas air dengan

multi parameter kualitas air yaitu: Oksigen terlarut (DO), BOD, COD, senyawa nitrogen, senyawa fosfat, bakteri koli, algae dan berbagai logam termasuk logam berat. Pada saat ini banyak berbagai piranti lunak model kualitas air yang pada umumnya berdasarkan konsep *finite different* (beda hingga) yang menggunakan prinsip neraca massa dengan proses kinetik untuk parameter kualitas air yang mengurai (*degradable material*) dan beberapa parameter yang tidak mengurai (*non-degradable material*) sebagai pilihan. Model-model ini bervariasi dari yang sangat sederhana sampai dengan yang multi parameter meliputi: DO, BOD, senyawa N dan P serta bakteriologi. Berbagai aplikasi beda hingga yang ada saat ini jika dibandingkan antar fasilitas dan fiturnya seperti pada Tabel 8.

**d Sistem Pembebanan**

1) Beban terpusat

Selain parameter-parameter kinetik di atas perlu juga kita perhatikan jarak minimum suatu efluen sebagai beban terpusat yang masuk ke badan air atau sungai akan bercampur sempurna, yang umumnya dihitung dengan rumus (1) berikut ini.

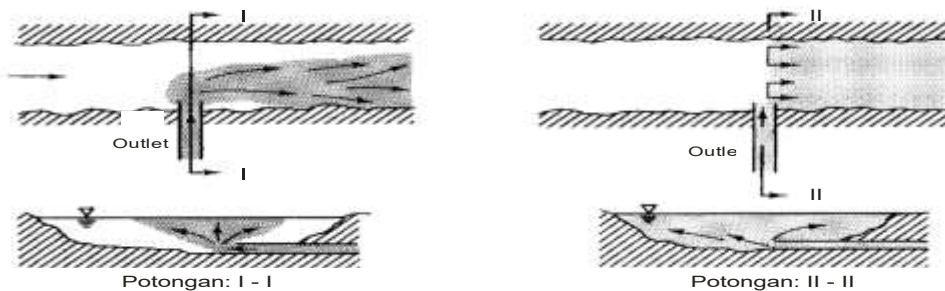
$$L_m = 0,121 U \frac{B^2}{H} \tag{1}$$

- $L_m$  = Jarak dari sumber ke zona perairan yang telah tercampur homogen [m]
- $U$  = Kecepatan aliran rata-rata [m/s]
- $B$  = Lebar sungai rata-rata [m]
- $H$  = Kedalaman air rata-rata [m]

**Tabel 7** Perkiraan Kebutuhan Oksigen Sedimen Dasar

No.	Tipe dasar dan lokasi	S <sub>B</sub> (g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /hari) pada 20°C	
		Rentang	Rata-rata
1.	Lumpur dasar saluran/sungai yang terakumulasi limbah organik sangat tinggi	6 – 32	22,5
2.	<i>Sphaerotilus</i> - (10 g kering/m <sup>2</sup> )	2,5 – 18	7
3.	Lumpur limbah penduduk (sekitar saluran pembuang)	2 – 10	4
4.	Lumpur limbah penduduk (hilir (2) terdapat lumpur lama)	1 – 2	1,5
5.	Lumpur di daerah muara sungai	1 – 2	1,5
6.	Dasar saluran berpasir	0,2 – 1	0,5
7.	Tanah bermineral	0,05 – 0,1	0,07

Sumber: MetCalf and Eddy ( 1991) dari Lam et al. (1984).



Sumber: Thomman and Mueller, 1987

**Gambar 1** Pemasukan Efluen ke Sungai

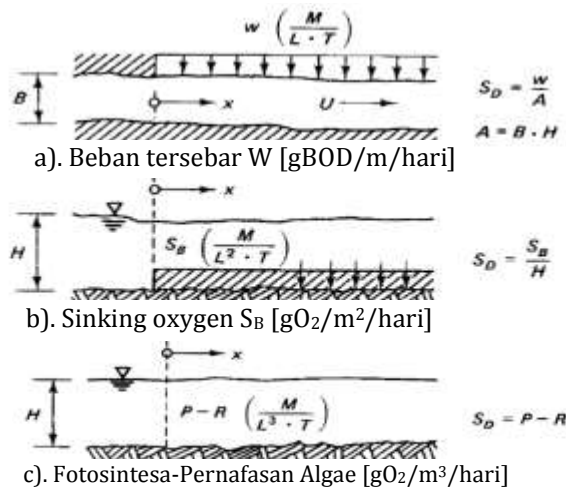
**Tabel 8** Perbandingan Beberapa Piranti Aplikasi Pemodelan Kualitas Air

No.	Model	Parameter Kualitas Air yg dimodel	Keunggulan	Kelemahan	Sistem Operasi	Lokasi dan Pemodel
1.	Neraca Massa (dibuat sendiri) [1-D]	DO, BOD, COD, SenyawaN&P, Bakteriologi & konservatif (spt logam, dll)	-SDM tersedia -Sederhana utk DO vs BOD -Cocok untuk sungai kecil-sedang	-Tidak dapat diterapkan di sungai lain. -Perlu waktu membuatnya dan kalibrasi model	Windows (Pengolah angka)	-S.Ciliwung (Pusat Litbang SDA, 2005) -S.Citarum (pada makalah ini)
2.	Streeter & Phelps (1925) [1-D] *)	DO dan BOD	Sederhana dan sedikit input	Cukup akurat jika panjang sel ≤ 160 m	Windows (Pengolah angka)	S.Citarum (Sinclair M., 2001)
3.	Qual Ile [Quasy 3-D]**)	Temperatur, DO, BOD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Kalibrasi mandiri -Open source -Untuk sungai kecil-besar	Banyak input dan default setting***	Windows atau DOS	S.Citarum (BTA-160 + Pusat Litbang SDA, 1994)
4.	Qual2K [1-D] **)	Temperatur, DO, BOD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Kalibrasi mandiri -Open source	-Banyak input dan default setting*** -Untuk sungai kecil-sedang -Hanya untuk 1 ruas sungai atau sungai masih alami	Windows (Pengolah angka)	-S.Ciliwung (Triane, D., 2015) -S.Cisadane (JICA, 2010) -S.Citarum (Lasy, A., 2014)
5.	WASP [3-D] **)	Temperatur, DO, BOD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Kalibrasi mandiri -Open source -Untuk sungai kecil-besar	Rumit serta banyak input dan default setting***	Windows	S.Citarum
6.	HECRAS [3-D] **)	Temperatur, DO, BOD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Open source -Untuk sungai kecil-besar	Banyak input dan default setting***	Windows	-
7.	MIKE 11 [Quasy 3-D]**)	Temperatur, DO, BOD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Kalibrasi mandiri Quasy 3-D -Untuk sungai kecil-besar	Banyak input dan default setting***	Windows	-
8.	MODQUAL [1-D] **) (Smiths, 1990)	DO, BOD, COD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Banyak opsi koef. Reaerasi -Parameter COD -Algae yg rinci	-Manual -Temperatur berdasarkan input manual -Maksimum 200 sel	Windows atau DOS	-S.Citarum (BPLHD, 2001) -S.Ciliwung -TarumBarat -Kali Sunter (BTA-155, 1986)
9.	SOBEK **) [1-D sungai 2-D lahan 3-D reservoir]	Temperatur, DO, BOD, COD, SenyawaN&P, konservatif (spt logam, dll)	-Kalibrasi mandiri -Banyak opsi koef. Reaerasi -Parameter COD -Algae yg rinci	Cukup rumit serta banyak input dan default setting	Windows	-

Keterangan: \*) Semi multi parameter; dan \*\*) Multi parameter; \*\*\*) perlu penyesuaian untuk negara tropis

2) Beban merata

Jika dilihat dari sistem pembebanannya, ada berbagai tipe pembebanan merata seperti terlihat pada Gambar 2.



Sumber: Thomman and Mueller, 1987

Gambar 2 Tipe Pembebanan Merata

METODOLOGI

Metode pelaksanaan penelitian ini secara garis besar adalah sebagai berikut:

- Dimensi Model** khusus untuk sungai/saluran sangat tergantung kepada gradien konsentrasi dan karakteristik fisik dari sistem yang akan dimodel. Gradien konsentrasi pada sungai kecil-sedang umumnya terjadi dominan ke arah panjang, maka menggunakan model 1-dimensi (1-D) saja.
- Variabel Waktu** akan dihadapkan pada pilihan model *steady-state* atau *dinamik*. Hasil penelitian membuktikan model kualitas air *steady-state* 1-D mendapatkan hasil yang baik dalam banyak studi untuk sungai ataupun waduk (James, 1993).
- Penentuan parameter kinetik** model kualitas air di sungai berdasarkan hasil pengumpulan berbagai referensi baik yang berupa angka ataupun rumus yang setelah divalidasi dapat dijadikan acuan. Bagan alir dari proses penentuan parameter kinetik model kualitas air seperti Gambar 3. Dalam penelitian ini, secara umum akan disajikan dua cara penentuan parameter kinetik yang berdasarkan: referensi Tabel atau rumus-rumus dan perhitungan perubahan kualitas air antar lokasi sampling hulu dan hilir. Khusus untuk  $K_1$  akan disajikan juga cara penentuan kinetik berdasarkan grafik hasil pengujian BOD harian selama 12 hari.
- Formulasi model** kualitas air untuk sungai/saluran menggunakan persamaan Eularian orde-1 untuk komponen kecepatan aliran

sungai, koefisien dispersi dan proses kinetik berbagai parameter kualitas air adalah seperti pada Gambar 4 dan rumus-rumus sebagai berikut:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \frac{\partial c}{\partial x} + E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + R_c \quad (2)$$

dengan:

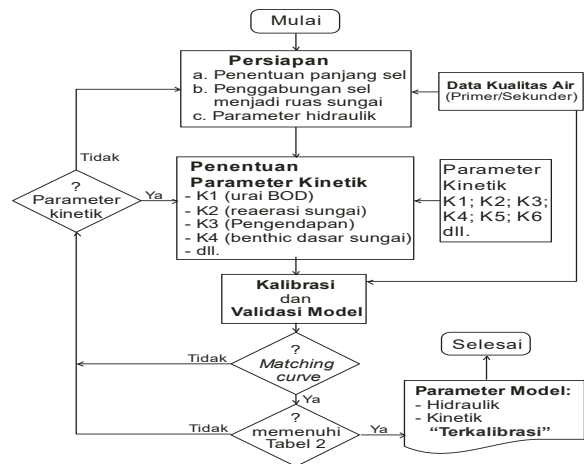
- U Kecepatan aliran sungai [m/s]
- E Koefisien Dispersi [m<sup>2</sup>/hari]
- Rc Proses kinetik dari berbagai parameter kualitas air

Dalam pemodelan kualitas air, beberapa parameter kinetik model yang dipengaruhi oleh temperatur dengan inputnya distandarkan pada kondisi temperatur kamar 20°C, maka untuk koreksi akibat perbedaan temperatur ini dihitung dengan rumus (Fair et al., 1968):

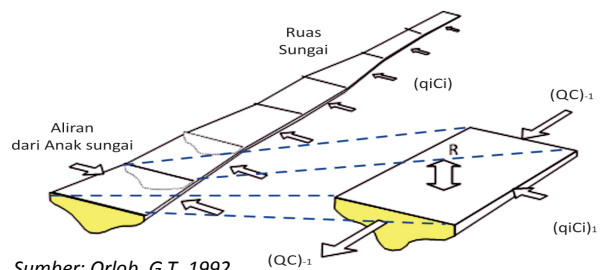
$$K(T) = K(20^\circ C) \theta^{(T-20)} \quad (3)$$

dengan:

- $K_T$  Koefisien reaksi pada T°C
- $K_{20}$  Koefisien reaksi pada 20°C
- $\theta$  Koefisien koreksi temperatur untuk berbagai koefisien kinetik model adalah besaran nilainya seperti pada kolom (8) Tabel 2.



Gambar 3 Bagan Alir Penentuan Parameter Kinetik



Sumber: Orlob, G.T, 1992

Gambar 4 Keseimbangan Massa Sel dan Ruas Sungai

Berdasarkan rumus (2) dikompilasi berbagai formulasi proses kinetik Rc yang disajikan pada Tabel 9.

**Tabel 9** Formulasi Proses Kinetik Rc untuk Pemodelan Kualitas Air

No.	Model Kualitas Air
1.	<p><b>Oksigen Terlarut</b></p> $DO = DO_{saturasi} - D \quad (4)$ $T_k = 273 + T \quad T \text{ dalam } ^\circ C$ $K = -139,34411 + \frac{157.570,1}{T_k} - \frac{66.423.080}{T_k^2} - \frac{12.438.000.000}{T_k^3} - \frac{862.194.900.000}{T_k^4} \quad \text{I)} \quad (5)$ $DO_{saturasi} = e^K$ $C_s = 14,652 - (0,41022 T) + (0,007991 T^2) - (7,7774 \times 10^{-5} T^3) \quad \text{V)} \quad (6)$ $\frac{dD}{dt} = -K_2 D + (K_1 + K_3)L - K_4 + [B + S + E - (P - R)] + (\alpha_3 \mu_A - \alpha_4 \rho)A - \alpha_5 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \quad \text{IV)} \quad (7)$
2.	<p><b>BOD (L)</b></p> $\frac{dL}{dt} = -(K_1 + K_3)L + [B + S + E + (P - R)] \quad \text{IV)} \quad (8)$
3.	<p><b>COD (L<sub>2</sub>)</b></p> $\frac{dL_2}{dt} = -(K_5 + K_3)L_2 + (B + S + E) \quad \text{IV)} \quad (9)$
4.	<p><b>a) Senyawa Nitrogen</b></p> <p>1) Org-N (N<sub>0</sub>) : <math>\frac{dN_0}{dt} = -(\beta_0 - \beta_3)N_0 + \alpha_1(\rho - \sigma_1)A \quad \text{II)} \quad (10)</math></p> <p>2) Amonia-T (N<sub>1</sub>) : <math>\frac{dN_1}{dt} = -\beta_1 N_1 + \beta_0 N_0 + \alpha_1 \rho A + \frac{\sigma_3}{A_x} \quad \text{II)} \quad (11)</math></p> <p>3) Nitrit (N<sub>2</sub>) : <math>\frac{dN_2}{dt} = -\beta_2 N_2 + \beta_1 N_1 \quad \text{II)} \quad (12)</math></p> <p>4) Nitrat (N<sub>3</sub>) : <math>\frac{dN_3}{dt} = -\alpha_1 \mu_A A - \beta_4 \cdot N_2 + \beta_2 N_2 \quad \text{II)} \quad (13)</math></p>
5.	<p><b>b) Senyawa Fosfat</b></p> <p>1) Ortho-P (P<sub>0</sub>) : <math>\frac{dP_0}{dt} = -\alpha_2(\mu - \rho)A - \frac{\sigma_2}{A_x} - f_{de} - f_{ad} - \sigma_4 \quad \text{II)} \quad (14)</math></p> <p>2) Org-P (P<sub>1</sub>) : <math>\frac{dP_1}{dt} = -\sigma_2 \cdot P_1 + \alpha_2 \cdot \sigma_1 \cdot A - f_{de} - f_{ad} \quad \text{II)} \quad (15)</math></p>
6.	<p><b>c) Bakteri Koli (F):</b></p> $\frac{dF}{dt} = -K_d F \quad \text{I)} \quad (16)$
7.	<p><b>f) Algae (A):</b></p> $\frac{dA}{dt} = -(\rho - \mu_A + \frac{\sigma_1}{H}) A \quad \text{II)} \quad (17)$
8.	<p><b>h) Logam dan/atau konservatif material</b></p> <p>Logam dan/atau material konservatif termasuk kelompok parameter non-degradable, maka parameter kinetiknya R<sub>c</sub>=0, yang berarti hanya ada neraca masa proses pengenceran saja.</p>

Keterangan:

L Kadar BOD dalam air [mg/L]

L<sub>0</sub> Kadar awal BOD dalam air [mg/L]

L<sub>2</sub> Kadar COD dalam air [mg/L]

K<sub>1</sub> Koef. decay BOD [1/h]

K<sub>2</sub> Koef. Reaerasi [1/h]

K<sub>3</sub> Koef. pengendapan BOD [1/h]

B Kebutuhan oksigen dasar [gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/hari] diturunkan dari S<sub>B</sub>/H

S Aliran airtanah (seepage) [gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/hari] diturunkan dari S<sub>S</sub>/(BxH)

E Beban menyebar aliran permukaan [gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/hari] diturunkan dari S<sub>E</sub>/(BxH)

P-R Photosynthesa-respirasi [gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/hari] diturunkan dari S<sub>P</sub> - S<sub>R</sub>

I) Thomman and Mueller (1987),

II) Smiths (1990),

III) Geza Jolankai (1997),

IV) Kombinasi III) + I) dan penambahan

V) Baca and Arnett (1976)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a Analisis Piranti Aplikasi

Seperti terlihat pada Tabel 8, secara sepintas untuk sembilan model-model kualitas air ini semuanya baik, namun dalam penggunaannya

sering terkendala karena kurang lengkap dan kurang *reliable* data yang tersedia sehingga sering kesulitan *matching curve* pada proses kalibrasi dan/atau validasinya. Hasil review secara umum khususnya terkait dengan akurasi hasil pemodelan yang ditentukan oleh: penentuan panjang sel, ketepatan pengelompokan sel menjadi ruas sungai,



akurasi pengukuran data primer secara tepat waktu, ketersediaan data hidraulik (debit, penampang basah & kering) yang cukup, ketepatan perhitungan beban pencemaran (beban simulasi dan *background*). Hanya beberapa sungai saja yang hasilnya cukup memadai baik karena pemilihan piranti aplikasi ataupun akurasi hasilnya.

Hasil pemodelan kualitas air baik membuat sendiri ataupun piranti aplikasi mempunyai kecenderungan, semakin rinci parameter kualitas air yang dimodel, panjang sel < 500 m dan semakin banyak data primer dan/atau sekunder akan semakin baik, dan khusus untuk metode Streeter & Phelps sudah cukup akurat jika panjang sel  $\leq 160$  m. Maka pemilihan model dapat dilakukan dengan bantuan Tabel 1 dan Tabel 8.

Perlu penyegaran kembali bahwa pelaksanaan pemodelan harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

- 1 Asumsi model *Steady state*:  $\frac{d_c}{d_t} = 0$ , yang hanya berlaku untuk sungai-sungai yang masih alami, sehingga untuk kondisi sungai yang telah berkembang kegiatan budi daya misalnya kegiatan pertanian, permukiman dan industri harus melakukan pengukuran secara komposit untuk dianalisis secara *dynamic* atau dapat juga tetap *steady state* tetapi pelaksanaan pengukurannya secara tepat waktu (*real time measurement*).
- 2 Pemodelan kualitas air dengan prinsip neraca massa yaitu menghitung kadar parameter kualitas air menggunakan input beban pencemaran air, sehingga debit aliran sungainya harus terkalibrasi secara baik.
- 3 Mendefinisikan panjang sel dan ruas sungai jangan terlalu panjang sehingga kondisi sel dan/atau ruas sungainya kurang homogen yang mengakibatkan hasil pemodelannya akan kurang akurat.
- 4 Kurang memperhatikan kondisi morfologi sungai yang akan mempengaruhi parameter hidraulik yang akhirnya akan mempengaruhi koefisien-koefisien sebagai parameter kinetik model yang harus dikalibrasi.
- 5 Perhitungan beban pencemar sering ditemui banyak data yang ompong (contoh untuk UMKM atau fasum-fasos) yang tidak teridentifikasi atau tidak punya data, yang diartikan “= 0” padahal seharusnya ditaksir dengan model atau paling tidak dengan *engineering judgement*.
- 6 Tidak memperhitungkan “kondisi *background*” beban pencemar contohnya akibat emisi pemanfaatan lahan yang tidak diidentifikasi secara rinci, misal hutan, jalan atau juga beban-beban pencemar yang tidak teridentifikasi

secara baik yaitu walaupun emisinya sangat kecil tetapi karena luasan wilayahnya sangat besar menjadi besar juga pengaruhnya.

- 7 Pendefinisian tingkat keberterimaan yang kurang tepat/sesuai, misal seharusnya keberterimaan untuk debit dan BOD harus  $\geq 95\%$ .

#### **b Parameter Hidrologi dan Hidraulik**

Disamping parameter kinetik juga diperlukan parameter hidrologi dan hidraulik dari sungai seperti debit termasuk fluktuasinya, sistem tata air, penampang sungai (lebar dan kedalaman air), kemiringan dasar sungai, koefisien kekasaran Manning, kecepatan aliran beserta parameter morfologi sungai juga lainnya. Hal ini tentu jika semakin banyak data atau sesuai dengan jumlah data yang diperlukan akan semakin akurat hasil pendekatannya

Di dalam pemodelan kualitas air, aspek debit merupakan faktor yang sangat penting sekali karena merupakan pelarut dari beban pencemar yang masuk ke dalam badan air sungai, tentu jika debitnya tidak akurat akan menyebabkan sangat tidak akuratnya nilai konsentrasi yang dihasilkan oleh model, dan lebih parah lagi jika kurang memperhatikan sistem tata air yang ada termasuk pula aspek *seepage* dari air tanah dan/atau terjadinya *recharge* air tanah dari air sungai (aliran terbalik dari sungai ke air tanah) yang mengakibatkan tidak sesuainya perhitungan neraca air.

#### **c Parameter Kinetik Model Kualitas Air**

Parameter kinetik hanya dipunyai oleh parameter kualitas air untuk material *degradable* (yang mengurai oleh fungsi waktu), misal DO dan BOD. Ada berbagai parameter kualitas air yang dalam prosesnya saling mempengaruhi antar parameternya, sebagai contoh DO adalah parameter kualitas air yang mengurai dipengaruhi oleh berbagai parameter kualitas air seperti: DO defisit, BOD, COD, algae dan nitrogen dan lainnya. Setiap parameter kinetik yang parameter kualitas airnya saling berhubungan adalah saling mempengaruhi satu sama lain, misalnya untuk parameter DO yang dipengaruhi oleh berbagai parameter kualitas air lainnya diharapkan merupakan nilai-nilai koefisien kinetik parsial dari pengaruh masing-masing parameternya yang dapat menggambarkan perannya masing-masing secara proporsional. Hasil ini dipengaruhi pula oleh perencanaan sebelumnya misal seperti penetapan panjang sel, pengelompokan sel-sel menjadi ruas-ruas sungai, penentuan lokasi sampling dan jarak maksimum antar lokasi sampling.

**1) K<sub>1</sub>: Decay BOD**

Penentuan besaran koefisien K<sub>1</sub> dapat dilakukan dengan mengacu pada Tabel 3 yang berdasarkan karakteristik air dan/atau menggunakan Tabel 4 yang berdasarkan jenis air ataupun dengan pengujian di laboratorium. Di dalam penelitian ini diharapkan penggabungan beberapa referensi dan hasil penelitian tersebut menjadi seperti pada Tabel 10.

Untuk menentukan nilai K<sub>1</sub> disajikan tiga cara sebagai berikut:

**a) Berdasarkan Tabel 10**

Untuk menaksir awal besaran nilai K<sub>1</sub> yang berdasarkan Tabel 10, tetapi jika karakteristik/jenis air yang sudah campuran dapat menaksir nilai K<sub>1</sub> menggunakan perbandingan beban pencemar dari masing-masing sumber pencemarnya. Untuk penelitian di sungai Citarum, dilakukan sampling pada 12 lokasi yaitu seperti pada Tabel 11.

Pada Tabel 11, ada sebanyak 12 lokasi penelitian yang dipilih berdasarkan pada variasi komposisi pengaruh sumber pencemarnya dengan rincian seperti pada kolom (3) Tabel 11. Sedangkan 7 (tujuh) lokasi lainnya yaitu di zona Hulu S.Citarum dari lokasi Cibangoak sampai dengan Nanjung sepanjang ± 50 km merupakan efek campuran dari berbagai anak-sungai dengan komposisi berbagai sumber pencemarnya.

Berdasarkan Tabel 10, air yang melewati hutan mempunyai K<sub>1</sub>' untuk air alamiah adalah 0,05/hari; limbah domestik: ringan adalah 0,35/hari dan berat adalah 0,40/hari; limbah industri: ringan adalah 0,40/hari dan industri berat adalah 0,65/hari; dan limbah pertanian: sawah adalah 0,18/hari dan hortikultura adalah 0,25/hari; maka koefisien K<sub>1</sub> adalah merupakan jumlah hasil kali antara proporsi beban pencemar x K<sub>1</sub>'. Adapun perhitungan K<sub>1</sub> pada kolom (4) dari Tabel 11 dan hasil perkiraannya seperti pada kolom (5) dari Tabel 11.

**Tabel 10** Perkiraan nilai K<sub>1</sub> berdasarkan Jenis Air dan Air Limbah yang Diolah

No.	Karakteristik/Jenis Air	K <sub>1</sub> pada 20°C (1/hari)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	Keterangan	
1.	Air Keran (air bersih) 1)	< 0,1	0 – 1	Air alamiah	
2.	Air Permukaan (termasuk air yang terkontaminasi organik rendah) 2)	0,05 – 0,23	1 – 30	Air permukaan, air alamiah (run off dari lahan/hutan [H] s.d. air limbah selokan)	
3.	Air permukaan yang terkontaminasi air limbah campuran berbagai pencemar	0,18 – 0,62	15 – 150	Kondisi debit minimum di musim kemarau	
4.	Air limbah pertanian: sawah-hortikultura	0,18 – 0,25	1 – 30	P: Air limpasan (run off)	
5.	Air limbah domestik ringan-berat 3)	0,35 – 0,40	150 – 250	D: Grey water – sedang	
6.	Air limbah industri ringan-berat 4)	0,40 – 0,65	250 – 550	I: Industri ringan-berat	
7.	Air limbah domestik yang telah diolah 5)	0,042 – 0,132	1 – 100	D:Efluen IPAL domestik	
8.	Air limbah industri yang telah diolah 6)	0,12 – 0,23	10 – 30	I:Efluen IPAL industri ringan	
		7)	0,22 – 0,36	35 – 65	I:Efluen IPAL industri sedang-berat
10.	Air sisa tailing (limbah pertambangan) sangat toksik dan/atau mengandung B3 8)	0,54 – 2,0	> 400	Air limbah tercemar sangat berat dan terkontaminasi B3	

Keterangan:

P =Pertanian; D = Domestik; I = Industri; H = Hutan

- 1) air keran, air bersih, air tanah, mata air atau dari hutan yang belum atau sedikit terkontaminasi organik ataupun bakteriologi.
- 2) air permukaan yang belum terkontaminasi limbah sampai dengan air selokan yang terkontaminasi air limbah domestik ringan (grey water)
- 3) air limbah domestik ringan (grey water) dengan kadar BOD < 200 mg/L dan air limbah domestik berat (black water) dengan kadar BOD > 500 mg/L, jika sudah tercampur: kadar rendah = 110 mgBOD/L, sedang = 220 mgBOD/L dan yang tinggi = 400 mgBOD/L.
- 4) air limbah industri ringan umumnya berupa industri kering misalnya garment dengan efluen ±150 mgBOD/L, kalau industri basah dengan proses printing dan dying atau kegiatan UMKM proses basah dengan efluen ±550 mgBOD/L. Khusus industri efluen > 550 mgBOD/L termasuk air limbah industri berat seperti industri polymer, polyester dan/atau industri kimia umumnya terkalibrasi dengan K<sub>1</sub> > 1,0.
- 5) air limbah domestik yang diolah dengan tingkat primary dengan efluen sekitar 100 mgBOD/L dan yang diolah tingkat lanjut dengan teknologi bersih efluennya dapat mencapai 1 mgBOD/L dan < 1 mgP/L .
- 6) air limbah industri ringan yang telah diolah dengan tingkat lanjut termasuk tertiary treatment efluennya sekitar 10 - 30 mgBOD/L.
- 7) air limbah industri sedang-berat yang telah diolah dengan tingkat sekunder efluennya sekitar 40 - 100 mgBOD/L. Efluen ini yang diberlakukan sesuai dengan BMLC industri tekstil yang berdasarkan ketersediaan teknologi saat ini.
- 8) air limbah sisa tailing (limbah pertambangan) atau limbah industri kimia yang tercemar amat sangat berat dan/atau juga terkontaminasi B3 dengan efluen > 400 mgBOD/L dan bahkan mencapai > 3.000 mgBOD/L.

**b) Berdasarkan Perbedaan Kadar Kualitas Air Antar lokasi hulu dengan hilir**

Cara menghitung koefisien kinetik dengan menghitung perubahan kadar kualitas air dengan membandingkan misalnya nilai BOD lokasi di hulu dengan di hilirnya. Untuk ini dipersyaratkan tidak boleh terjadi perubahan karakteristik kinetik ataupun hidraulik lebih dari 10%. Ini berarti tidak boleh terjadi perubahan debit ataupun karakteristik yang misalnya didominasi oleh limbah pertanian kemudian menerima limbah domestik ataupun industri.

Untuk contoh perhitungan ini diambil ruas sungai dari Jembatan Majalaya sampai dengan Jolak. Debit sungai di Jembatan Majalaya adalah 7,38 m<sup>3</sup>/s dengan kadar 5,50 mgBOD/L, kemudian di hilir Jembatan Majalaya ada masuk air limbah industri dari S.Ciwalengke yaitu debitnya 0,084 m<sup>3</sup>/s dengan kadar 56,00 mgBOD/L. Maka kualitas air pencampuran Ciwalengke dengan Citarum kadarnya menjadi 6,88 mgBOD/L yang mengalir ke hilir dengan kecepatan 0,35 m/s sehingga sampai di Jolak kadarnya menjadi 6,42 mgBOD/L. Dengan perhitungan sederhana maka didapat K<sub>1</sub> = 0,547. Hal ini bersesuaian dengan Tabel 11 untuk Ciwalengke K<sub>1</sub> = 0,546. Cara perhitungan ini agak kasar karena jaraknya terlalu pendek dengan kecepatan aliran > 0,3 m/s akan sedikit mengurangi akurasi, maka untuk perhitungan ini dianjurkan untuk *travel time* > 0,5 hari.

Hasil dari cara-cara tersebut jika perencanaan sel, ruas dan segmen terkait dengan kondisi hidraulik serta pertimbangan parameter kinetiknya dari ruas-ruas sungai sesuai dengan asumsi yang digunakan, maka hasil kalibrasi &

validasi nilai K<sub>1</sub> akan mendekati hasil pada Tabel 11 atau juga yang berdasarkan uji laboratorium.

**c) Berdasarkan Uji Laboratorium**

Disamping cara yang menggunakan Tabel 4 dapat pula dilakukan dengan cara uji laboratorium yaitu dengan melakukan pengukuran BOD harian di laboratorium selama 12 (dua belas) hari, namun nilai K<sub>1</sub> yang diambil yaitu hanya data 5 (lima) hari saja karena nilai karbonaseus BOD<sub>5</sub> yang akan digunakan sebagai indikator pencemaran air. Sedangkan nilai BOD yang > 5 hari untuk cek ada atau tidaknya nitrogen BOD.

Dalam makalah ini hanya disajikan contoh hasil pengukuran BOD di laboratorium pada 6 (enam) lokasi saja yaitu: Situ Cisanti sebagai air hulu S.Citarum, S.Ciwalengke sebagai saluran air limbah yang didominasi industri, S.Cikapundung Kolot sebagai anak sungai yang didominasi limbah domestik, S.Cisangkuy sebagai anak sungai yang 50% industri dan 50% non-industri, S.Ciwidey sebagai anak sungai yang didominasi air limbah pertanian, dan sungai Citarum di lokasi Nanjung adalah merupakan lokasi ruas sungai akhir untuk zona hulu dan untuk ini juga sebagai ruas akhir pemodelan KA. Adapun hasil pengukuran BOD untuk menaksir nilai koefisien K<sub>1</sub> pada 6 (enam) lokasi tersebut seperti disajikan pada Gambar 5.

Melihat Gambar 5, hanya lokasi Situ Cisanti, S.Cisangkuy dan S.Ciwidey yang dinilai masih normal yaitu nilai Nitrogeneus BOD relatif lebih besar dibanding Karbonaseus BOD-nya, sedangkan lokasi lainnya nilai NBOD sangat kecil yang diperkirakan akibat kondisi dari lokasi-lokasi tersebut telah tercemar berat dan/atau teridentifikasi sudah toksik.

**Tabel 11** Perkiraan awal Koefisien K<sub>1</sub>

No.	Lokasi	Komposisi Lahan	Perhitungan K <sub>1</sub>	K <sub>1</sub> (1/hari)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Situ Cisanti	64%H + 32,4%Ph+3,6%Ps	= 0,64*0,1+0,36*(0,9*0,18+0,1*0,25)	0,13132
2	Citarum-Cibangoak	22%D + 62,4%Ph+15,6%Ps	= 0,22*0,35+0,78*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,22832
3	Citarum-Majalaya	29%D+33%I+30,4%Ph+7,6Ps	= 0,29*0,35+0,33*0,65+0,38*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,38972
4	Ciwalengke	18%D+71%I+8,8%Ph+2,2%Ps	= 0,18*0,35+0,71*0,65+11*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,54584
5	Citarum-Sapan	22% Ciwalengke +78% Citarum	= 0,22*0,54584+0,78*0,38972	0,42407
6	Cikapundung Kolot	76%D+11%I+11,2%Ph+2,8Ps	= 0,76*0,35+0,11*0,65+0,14*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,36466
7	Citarum-Dayeuhkolot	0,18*Cikapundung + 0,82*Citarum	= 0,18*0,36466+0,82*0,42407	0,41337
8	Cisangkuy	38%D+51%I+8,8%Ph+2,2%Ps	= 0,38*0,35+0,51*0,65+0,11*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,48584
9	Citarum-Margahayu	0,25*Cisangkuy + 0,75*Citarum	= 0,25*0,48584+0,75*0,41337	0,43149
10	Ciwidey	35%D+52%Ph+13%Ps	= 0,35*0,35+0,65*(0,8*0,18+0,2*0,25)	0,24860
11	Citarum-Daraulin	0,18*Ciwidey + 0,82*Citarum	= 0,18*0,2486+0,82*0,43149	0,39857
12	Citarum-Nanjung	12%I+2,5%Ph+13,5%Ps++0,72*Citarum	= 0,12*0,65+0,025*0,18+0,135*0,25+0,72*0,39857	0,42897

**Catatan:** \*\* merupakan campuran di sungai yang berasal dari hulu dan masukan dari anak-anak sungai

P =Pertanian (Ph=holtikultura, Ps=sawah); D = Domestik; I = Industri; H = Hutan

**2) K<sub>2</sub>: Reaerasi**

Besaran koefisien reaerasi (K<sub>2</sub>) dipengaruhi oleh parameter hidraulik dan juga oleh jenis badan airnya. Berdasarkan pengalaman, secara umum formulasi yang cocok di Indonesia untuk berbagai rumusan pada Tabel 5 yaitu formulasi O'Connor & Dobbins lebih sesuai untuk sungai sedang-besar dan/atau masih alamiah, sedangkan formulasi O'Connor lebih sesuai untuk sungai kecil-sedang dan/atau yang telah sedikit terkontaminasi limbah domestik.

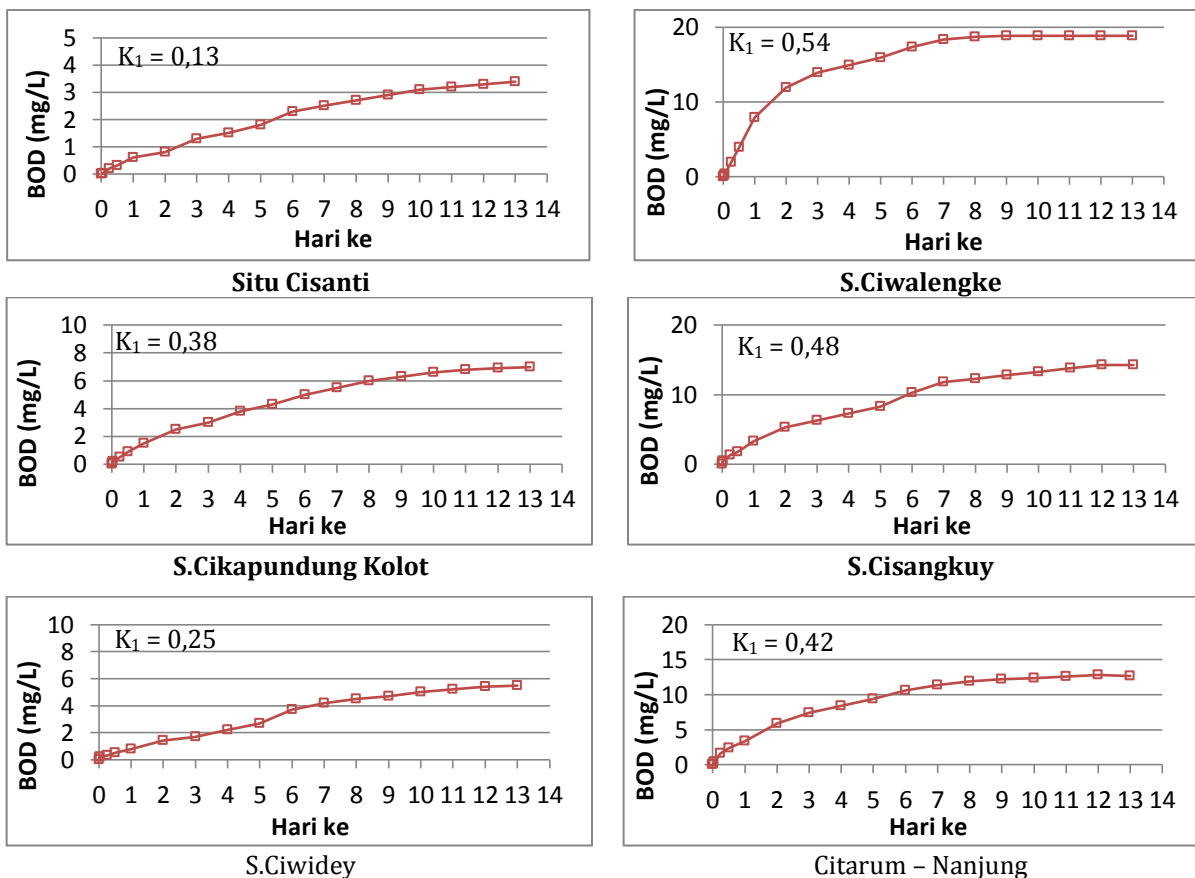
Selain itu pula formulasi Churchil lebih sesuai untuk sungai kecil-sedang dan/atau terkontaminasi limbah domestik kadar rendah-sedang, dan formulasi Owen lebih sesuai untuk sungai kecil-sedang dan/atau sungai dengan kondisi toksik atau terkontaminasi limbah domestik kadar tinggi dan/atau industri. Selain hal tersebut, pengaruh morfologi sungai terhadap koefisien reaerasi K<sub>2</sub> yang mengacu pada Tabel 6 dapat digunakan untuk sungai yang umumnya kecil-sedang dengan pembagian ruas sungai yang sangat detail. Penaksiran awal koefisien K<sub>2</sub> berdasarkan pengalaman seyogyanya diambil nilai terkecil antara hasil Tabel 5 dan Tabel 6.

**3) K<sub>3</sub>: Pengendapan**

Untuk ruas sungai di zona hulu Citarum dengan kecepatan aliran < 0,6 m/s di musim peralihan terdapat hubungan  $K_3 = 0,02\% \times SS$ . Hubungan ini kemungkinannya akan berbeda untuk setiap lokasi yang dikarenakan perbedaan jenis tanah, pemanfaatan lahan serta kandungan mineralnya. Nilai besaran K<sub>3</sub> yang pernah terukur di Indonesia pada kisaran 0,05 - 1,0 1/hari (Yusuf, I. et al., 2005).

**4) K<sub>4</sub>: Kebutuhan Oksigen Sedimen Dasar**

Koefisien K<sub>4</sub> sangat tergantung pada kondisi sedimen di dasar sungainya. Ada beberapa kondisi sedimen dasar sungai yang tergantung karakteristik hidrauliknya, secara umum sedimen dasar terakumulasi karena pengendapan pada waktu musim kemarau namun pada waktu musim hujan ter-*flushing* oleh besarnya debit. Sedangkan untuk kondisi ruas sungai dengan kecepatan aliran normalnya ≤ 0,3 m/s yang setiap saat terakumulasi sehingga nilai  $K_4 = S_B/H$  menjadi lebih besar, namun hal inipun tergantung pula tingkat penyerapan oksigen oleh dasar saluran yang dipengaruhi pula oleh waktu, yaitu semakin lama kebutuhan oksigen semakin menurun sesuai dengan jumlah oksigen yang telah terserap.



**Gambar 5** Analisis BOD Fungsi Waktu Berbagai Lokasi di S.Citarum Hulu

Untuk menggambarkan kondisi nyatanya dari Tabel 7 yaitu pada saat umur lumpur dasarnya baru mengendap, maka gunakan nilai  $S_B$  maksimum dan akan berkurang menjadi minimum tergantung jumlah oksigen yang telah terserap. Untuk ini dapat digambarkan seperti pada Tabel 12. Dalam menggunakan Tabel 12, perlu mempertimbangkan ketebalan lumpur yang mempengaruhi besaran  $S_B$  (SOD: *sinking oxygen demand*) yaitu hanya 25 cm saja. Misalkan ketebalan lumpur untuk lumpur limbah penduduk

yang berada di sekitar pembuangan adalah 10 cm, maka dapat diinterpolasi antara 2 - 10  $gO_2/m^2/hari$  yaitu menghasilkan  $S_B = 4 gO_2/m^2/hari$ .

**d. Uji Coba Pemodelan Kualitas Air di Sungai Citarum**

Dalam uji coba model ini diambil tiga parameter saja yaitu DO, BOD, dan COD maka rumus yang akan digunakan diturunkan dari rumus (7), (8) dan (9) adalah sebagai berikut.

$$K = -139,34411 + \frac{157.570,1}{T_k} - \frac{66.423.080}{T_k^2} - \frac{12.438.000.000}{T_k^3} - \frac{862.194.900.000}{T_k^4}$$

Temperatur air sungai di Jembatan Majalaya adalah 27,1 °C, maka  $DO_{saturasi} = e^K = e^{-2,076} = 7,98 mgO_2/L$

$$C_s = 14,652 - (0,41022 T) + (0,007991 T^2) - (7,7774 \times 10^{-5} T^3)$$

**a) DO**

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D + (K_1 + K_3)L + [B + S + E - (P - R)]$$

$$D = D_o e^{-(K_2)t} + \frac{K_1}{K_2 - (K_1 + K_3)} \left[ L_o - \frac{B + S + E}{(K_1 + K_3)} - \frac{P - R}{K_2} \right] \{ e^{-(K_1 + K_3)t} - e^{-(K_2)t} \} + \frac{K_1}{K_2} \left[ \frac{B + S + E}{(K_1 + K_3)} - \frac{P - R}{K_2} \right] \{ 1 - e^{-(K_2)t} \}$$

$$DO = DO_{saturasi} - D$$

**b) BOD**

$$\frac{dL}{dt} = -(K_1 + K_3)L + [B + S + E - (P - R)]$$

$$L = \left[ L_o - \frac{B + S + E}{K_1 + K_3} - \frac{P - R}{K_2} \right] e^{-(K_1 + K_3)t} + \frac{B + S + E}{K_1 + K_3} - \frac{P - R}{K_2}$$

**c) COD**

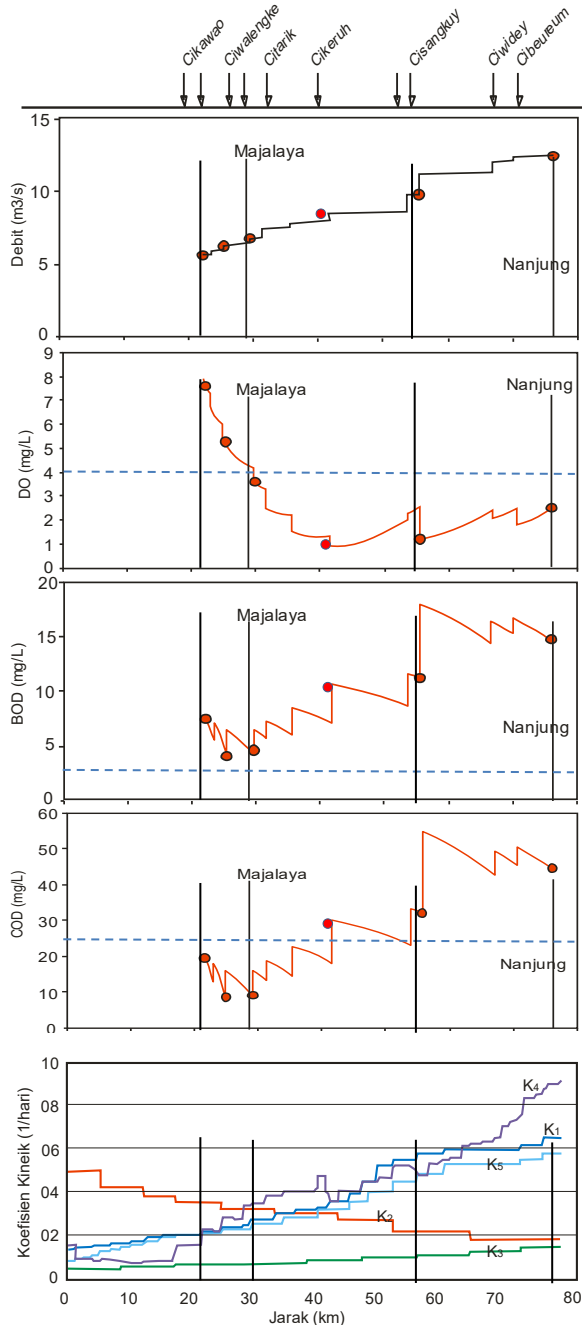
$$\frac{dL_2}{dt} = -(K_5 + K_3)L + [B + S + E]$$

$$L_2 = \left[ L_{2o} - \frac{B + S + E}{K_5 + K_3} \right] e^{-(K_5 + K_3)t} + \frac{B + S + E}{K_5 + K_3}$$

**Tabel 12** Perkiraan Kebutuhan Oksigen Sedimen Dasar

No.	Tipe dasar dan lokasi	$S_B$ pada 20°C (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /hari)	Keterangan
1.	Lumpur dasar saluran sungai yang terakumulasi limbah organik sangat tinggi	6 - 32	Ketebalan lumpur yang diperhitungkan 5 - 25 cm (maksimum) khususnya fraksi halus yang berada di permukaan lumpur.
2.	Sphaerotilus (8-10 g kering/m <sup>2</sup> )	2,5 - 18	Ketebalan yang diperhitungkan 5 - 25 cm
3.	Lumpur limbah penduduk	2 - 10	Sekitar saluran pembuang limbah domestik
		1 - 2	Di hilir (2) terdapat lumpur lama
4.	Lumpur di daerah muara sungai	1 - 2	akumulasi lumpur organik
5.	Dasar saluran berpasir	0,2 - 1	berlumpur organik ketebalan 5-30 cm
6.	Tanah bermineral	0,05 - 0,1	sedikit berlumpur organik s.d. 10 cm

Berdasarkan trasing peta geophysical information system (GIS), Zona hulu sungai Citarum dari Situ Cisanti (KM-0,00) sampai dengan Inlet Waduk Saguling (KM-78,00), terdapat 54 anak-anak sungai ordo-2. Zona hulu sungai ini dibagi menjadi ± 60 ruas sungai dengan pembebanan menggunakan data beban pencemaran air pada bulan Agustus tahun 2012 (Pusat Litbang SDA, 2012) yang menghasilkan model kualitas air seperti pada Gambar 6 berikut ini.



**Gambar 6** Kalibrasi Parameter Debit, DO, BOD dan COD dan Parameter Kinetik S.Citarum Hulu

Konfigurasi sungai ini hanya merupakan sebagian segmen-1 yaitu dari Citarum\_Cibangoak – Jembatan Majalaya, segmen-2: yaitu Jembatan Majalaya – Jembatan Dayeuhkolot dan segmen-3: yaitu Jembatan Dayeuhkolot – Inlet Waduk Saguling dengan panjang sungai sekitar 50 km. Untuk contoh melakukan kalibrasi yang dimulai dari debit sungai harus mempunyai koefisien determinasi  $\geq 95\%$ , selanjutnya BOD, COD dan terakhir parameter DO. Karena dari sini akan terlihat besaran nilai kadar masing-masing, akan lebih baik sambil melakukan evaluasi pencemaran yang mengacu pada PP No. 82 Tahun 2001 untuk KMA kelas II adalah 3 mgBOD/L; 25 mgCOD/L dan 4 mgO<sub>2</sub>/L.

Hasil perhitungan kalibrasi model kualitas air, contoh yaitu parameter DO, BOD dan COD, maka koefisien kinetiknya yaitu: K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, dan K<sub>5</sub> adalah seperti pada Tabel 13.

Hasil akhir parameter kinetik setelah kalibrasi yaitu seperti pada Gambar 6, secara umum parameter kinetik dari hulu ke hilir berubah-ubah atau juga berfluktuasi sesuai dengan kondisi perairannya. Nilai K<sub>1</sub> dan K<sub>5</sub> meningkat sesuai dengan peningkatan beban pencemarannya dan untuk K<sub>3</sub> meningkat sesuai dengan peningkatan kadar SS. Sementara K<sub>4</sub> di bagian hulu rendah sekali karena dimensi sungai yang kecil dan kemiringan dasar sungai yang cukup besar yang kemudian meningkat secara berfluktuasi sesuai dengan tingkat kebersihan dasar sungainya serta kedalaman sungainya. Sedangkan K<sub>2</sub> di bagian hulu mempunyai nilai besar sehubungan dengan kecepatan aliran serta koefisien dispersinya yang relatif besar yang kemudian menurun sesuai dengan penurunan kecepatan alirannya.

**Tabel 13** Parameter Kinetik Terkalibrasi

No	Segmen Sungai	Parameter Kinetik	Keterangan Sesuai dengan	K <sub>1</sub> Hasil uji Laboratorium
1.	Cibangoak_Majalaya	K <sub>1</sub> = 0,13 – 0,25 K <sub>2</sub> = 0,32 – 0,50 K <sub>3</sub> = 0,04 - 0,07 K <sub>4</sub> = 0,0702– 0,3411 K <sub>5</sub> = 0,08 – 0,22	Tabel 10 Tabel 6 0,05 – 1,0 (Tabel 12)/H Tabel 2	Cisanti =0,13 Ciwalengke = 0,54
2.	Majalaya_Dayeuhkolot	K <sub>1</sub> = 0,27 – 0,55 K <sub>2</sub> = 0,22 – 0,32 K <sub>3</sub> = 0,07 – 0,09 K <sub>4</sub> = 0,3462- 0,5265 K <sub>5</sub> = 0,25–0,45	Tabel 10 Tabel 6 0,05 – 1,0 (Tabel 12)/H Tabel 2	Cikapundung kolot =0,38 Cisangkuy =0,48
3.	Dayeuhkolot_Nanjung	K <sub>1</sub> = 0,13 – 0,65 K <sub>2</sub> = 0,18 – 0,50 K <sub>3</sub> = 0,04 – 0,14 K <sub>4</sub> = 0,0702- 0,9224 K <sub>5</sub> = 0,08 – 0,58	Tabel 10 Tabel 6 0,05 – 1,0 (Tabel 12)/H Tabel d2	Ciwidey =0,25 Nanjung =0,42

Kalau diperhatikan secara detail masing-masing koefisien kinetiknya terdapat 52,4% tetap seperti perkiraan awal dan 47,6% ada yang

berkurang dan juga ada yang bertambah bertambah, secara umum mempunyai perbedaan  $\leq 5\%$ . Hal ini berarti proses kalibrasi akan menjadi lebih mudah dan cepat terkalibrasi dengan hasil yang akurat.

## KESIMPULAN

Dengan memahami rentang minimum sampai dengan maksimum besaran parameter kinetik akan meningkatkan akurasi pelaksanaan pemodelan kualitas air baik pada saat perencanaan (pendefinisian sel, penggabungan sel menjadi ruas sungai), penentuan lokasi sampling, sampling dan pengujian kualitas air sampai dengan kalibrasi dan validasi modelnya.

Hasil kalibrasi dan/atau validasi model kualitas air adalah koefisien parameter-parameter kinetik yang dimulai dengan taksiran awal parameter kinetik kemudian dilakukan secara *trial and error* sampai mendapatkan deviasi terkecil antara kadar kualitas air hasil pemodelan dengan hasil pengukuran laboratorium. Koefisien-koefisien kinetik ini seyogyanya dilakukan penaksiran awal yang dihitung secara detail yaitu umumnya berdasarkan berbagai referensi yang ada baik berupa tabel dan/atau rumus-rumus atau juga dengan menghitung perbedaan kadar kualitas air antar lokasi sampling di hulu dan hilirnya. Sedangkan untuk penaksiran awal koefisien urai BOD selain dua cara tersebut juga disajikan cara pengujian kualitas air secara khusus dengan uji laboratorium parameter BOD harian selama 12 hari. Jika penaksiran awal parameter kinetik dengan akurat akan sangat mudah proses kalibrasi modelnya.

Dengan dijelaskannya cara-cara penentuan parameter kinetik model kualitas air yang akurat, diharapkan hasil pemodelan kualitas air menjadi lebih baik dan bahkan dapat mendekati kondisi sungai yang sebenarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baca, R.G., and R.C. Arnett. 1975. A Limnological Model Lakes and Impoundment, Battelle Inc. Pacific Northwest Richland, Washington.
- Benson, B.B and D. Krause, Jr. 1984. The Solubility and Isotop Fractionation of Oxygen Dissolved in Fresh Water and Sea Water Equilibrium with The Atmosphere: I Oxygen. *Limnol. Oceanogr.* 29(3): 620-632.
- Biswas, A.K. 1981. *Model for Water Quality Management*, Biswas, A.K. (ed.), New York: McGraw-Hill.
- BTA-155. 1986. Water Quality Management of The Citarum River. Bandung: Part of Study Report.
- BTA-160. 1994. Water Quality Management of The Citarum River. Bandung: Study Report.
- Chen, C.W. and G.T. Orlob. 1975. Ecological Simulation of Aquatic Environment, in *System Analysis and Simulation in Ecology*. Vol. 3, B.C. Pattern (ed). New York: Academic Press, Pp: 476-588.
- Fair, G.M., Geyer, J.C and Okun D.A. 1968. *Water and Wastewater Engineering*. New York: John Wiley and Sons.
- Bowie, G. L., Milis, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H., Gherini, S.A. 1985. Rates, Constants, and Kinetic Formulations in Surface Water Quality Modeling. Georgia. USA: US-EPA, Athens.
- James, A. 1993. *An Introduction to Water Quality Modeling*, James, A. (ed.). West Sussex-England: John Wiley & Sons.
- JICA. 2010. Water Quality Management of The Cisadane River. Study Report. Jakarta: SEMAC.
- Jolankai, Geza. 1997. *Basic river water quality models*. Computer aided learning (CAL) programme on water quality modelling (WQMCAL version 1.1). International Hydrological Programme. Paris: UNESCO.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2003. KepMen LH Nomor 110 Tahun 2003 Tentang Perhitungan Daya Tampung Beban Pencemaran Air. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2003. KepMen LH Nomor 115 Tahun 2003 Tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Lam, D.C.L. Schertzer, W.M and Frasher, A.S. 1984. Modeling Effect of Sediment Oxygen Demand in Lake Erie Water Quality Condition Under the Influence of Pollution Control and Weather Variation. Washington DC, USA: WPCF.
- Lasy A. 2014. Application of Qual 2K Model for Predicting Water Quality in The Upper Citarum River, West Java, Indonesia. Bandung: Master Thesis ITB.
- Metcalf and Eddy Inc. 1991. *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse*, 3<sup>rd</sup> ed., New York: McGraw-Hill.

- Orlob, G.T. 1982. *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*. International Institute for Applied System Analysis, Orlob, G.T. (ed.), University of California, Davis. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-10031-5 (U.S).
- Pusat Litbang SDA. 2012. Evaluasi Tingkat Kondisi Daerah Aliran Sungai (DAS). Bandung: Laporan Teknis Intern. TA 2012.
- Smiths. 1990. *Manual Pemodelan Kualitas Air MODQUAL*. Bandung: BTA-155.
- Thomann, R.V., and J.A. Mueller. 1987. *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*, New York: Harper and Row,
- Triane D. 2015. Pemodelan Kualitas Air Menggunakan Qual 2Kw. Studi Kasus: Sungai Ciliwung. Bandung: Master Thesis ITB.
- Yusuf, I. 2012. *Fakta Lingkungan Sumber Daya Air Sungai Citarum*. Output yang tidak diterbitkan. Bandung: Pusat Litbang SDA.
- Yusuf, I. 2015. Analisis Kebutuhan Air Lingkungan SDA Berdasarkan Ketersediaan Air dan Pemanfaatan Air, *Jurnal Sumber Daya Air*. Volume 11 No. 1 Mei 2015, Bandung: ISSN 1907-0276.
- Yusuf, I.A. dan Tontowi. 2005. *Penelitian Parameter Kinetik Model Kualitas Air untuk Menghitung Daya Tampung Beban Pencemaran Air*. Laporan Penelitian Tahun Anggaran 2005. Bandung: Pusat Litbang SDA.
- Yusuf, I.A., Hidayat, Y.M dan Rohaeni, A.Y. 2015. *Penyusunan Naskah Kebijakan Pengendalian Pencemaran Air Sungai Citarum*. Bandung: Laporan Penelitian.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada Laboratorium Kualitas Air Balai Lingkungan Keairan, Pusat Litbang SDA yang sangat pro-aktif dalam memfasilitasi pelaksanaan penelitian parameter kinetik untuk pemodelan kualitas air ini, khususnya karena banyak sekali diperlukannya pengulangan pengujian untuk mendapatkan hasil yang *realable*. Selain itu tidak lupa pula ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian penelitian dan penyusunan makalah ini.