

KEPUTUSAN
MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP
NOMOR 110 TAHUN 2003

TENTANG
PEDOMAN PENETAPAN DAYA TAMPUNG BEBAN
PENCEMARAN AIR PADA SUMBER AIR

MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP,

- Menimbang : bahwa untuk melaksanakan ketentuan Pasal 23 ayat (4) Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air perlu menetapkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tentang Pedoman Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Pada Sumber Air;
- Mengingat : 1. Undang-undang Nomor 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lembaran Negara Tahun 1997 Nomor 68, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3699);
2. Undang-undang Nomor 22 Tahun 1999 tentang Pemerintahan Daerah (Lembaran Negara Tahun 1999 Nomor 60, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3839);
3. Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2000 tentang Kewenangan Pemerintah dan Kewenangan Provinsi Sebagai Daerah Otonom (Lembaran Negara Tahun 2000 Nomor 54, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3952);
4. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 153, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4161);
5. Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2002 tentang Perubahan Atas Keputusan Presiden Nomor 101 Tahun 2001 tentang Kedudukan, Tugas, Fungsi, Kewenangan, Susunan Organisasi, Dan Tata Kerja Menteri Negara;

MEMUTUSKAN :

Menetapkan : KEPUTUSAN MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP
TENTANG PEDOMAN PENETAPAN DAYA TAMPUNG BEBAN
PENCEMARAN AIR PADA SUMBER AIR.

Pasal 1

Dalam keputusan ini yang dimaksud dengan :

- a. Daya tampung beban pencemaran air adalah kemampuan air pada suatu sumber air, untuk menerima masukan beban pencemaran tanpa mengakibatkan air tersebut menjadi cemar;
- b. Beban pencemaran adalah jumlah suatu unsur pencemar yang terkandung dalam air atau air limbah;
- c. Metoda Neraca Massa adalah metoda penetapan daya tampung beban pencemaran air dengan menggunakan perhitungan neraca massa komponen-komponen sumber pencemaran;
- d. Metoda Streeter-Phelps adalah metoda penetapan daya tampung beban pencemaran air pada sumber air dengan menggunakan model matematik yang dikembangkan oleh Streeter-Phelps;

Pasal 2

- (1) Bupati/Walikota menetapkan daya tampung beban pencemaran air pada sumber air.
- (2) Daya tampung beban pencemaran air pada sumber air sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), ditetapkan berdasarkan debit minimal pada tahun yang bersangkutan atau tahun sebelumnya.
- (3) Dalam menetapkan daya tampung beban pencemaran air pada sumber air sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), digunakan metoda perhitungan yang telah teruji secara ilmiah, yaitu :
 - a. Metoda Neraca Massa;
 - b. Metoda Streeter-Phelps.

Pasal 3

- (1) Cara dan contoh penetapan daya tampung beban pencemaran air pada sumber air dengan metoda neraca massa sebagaimana dimaksud dalam Lampiran I.
- (2) Cara dan contoh penetapan daya tampung beban pencemaran air limbah pada sumber air dengan metoda Streeter-Phelps sebagaimana dimaksud dalam Lampiran II.

Pasal 4

- (1) Apabila timbul kebutuhan untuk menggunakan metoda lain yang juga berdasarkan kaidah ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menyesuaikan dengan situasi dan kondisi serta kapasitas daerah, maka dapat digunakan metoda di luar metoda sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2.
- (2) Metoda sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) digunakan setelah mendapat rekomendasi dari instansi yang bertanggung jawab di bidang pengelolaan lingkungan hidup dan pengendalian dampak lingkungan.

Pasal 5

Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di : Jakarta
pada tanggal : 27 Juni 2003

Menteri Negara
Lingkungan Hidup,

ttd.

Nabiel Makarim, MPA, MSM

**Salinan sesuai dengan aslinya
Deputi I MENLH Bidang Kebijakan
dan Kelembagaan Lingkungan Hidup,**

Hoetomo, MPA.

Cara Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air pada Sumber Air Metoda Neraca Massa

I. Pendahuluan

Penentuan daya tampung beban pencemaran dapat ditentukan dengan cara sederhana yaitu dengan menggunakan metoda neraca massa. Model matematika yang menggunakan perhitungan neraca massa dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi rata-rata aliran hilir (*down stream*) yang berasal dari sumber pencemar *point sources* dan *non point sources*, perhitungan ini dapat pula dipakai untuk menentukan persentase perubahan laju alir atau beban polutan.

Jika beberapa aliran bertemu menghasilkan aliran akhir, atau jika kuantitas air dan massa konstituen dihitung secara terpisah, maka perlu dilakukan analisis neraca massa untuk menentukan kualitas aliran akhir dengan perhitungan

$$C_R = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i} = \frac{\sum M_i}{\sum Q_i}$$

dimana C_R : konsentrasi rata-rata konstituen untuk aliran gabungan
 C_i : konsentrasi konstituen pada aliran ke-i
 Q_i : laju alir aliran ke-i
 M_i : massa konstituen pada aliran ke-i

Metoda neraca massa ini dapat juga digunakan untuk menentukan pengaruh erosi terhadap kualitas air yang terjadi selama fasa konstruksi atau operasional suatu proyek, dan dapat juga digunakan untuk suatu segmen aliran, suatu sel pada danau, dan samudera. Tetapi metoda neraca massa ini hanya tepat digunakan untuk komponen-komponen yang konservatif yaitu komponen yang tidak mengalami perubahan (tidak terdegradasi, tidak hilang karena pengendapan, tidak hilang karena penguapan, atau akibat aktivitas lainnya) selama proses pencampuran berlangsung seperti misalnya garam-garam. Penggunaan neraca massa untuk komponen lain, seperti DO, BOD, dan $\text{NH}_3 - \text{N}$, hanyalah merupakan pendekatan saja.

II. Prosedur penggunaan

Untuk menentukan beban daya tampung dengan menggunakan metoda neraca massa, langkah-langkah yang harus dilakukan adalah :

1. Ukur konsentrasi setiap konstituen dan laju alir pada aliran sungai sebelum bercampur dengan sumber pencemar;
2. Ukur konsentrasi setiap konstituen dan laju alir pada setiap aliran sumber pencemar;
3. Tentukan konsentrasi rata-rata pada aliran akhir setelah aliran bercampur dengan sumber pecemar dengan perhitungan :

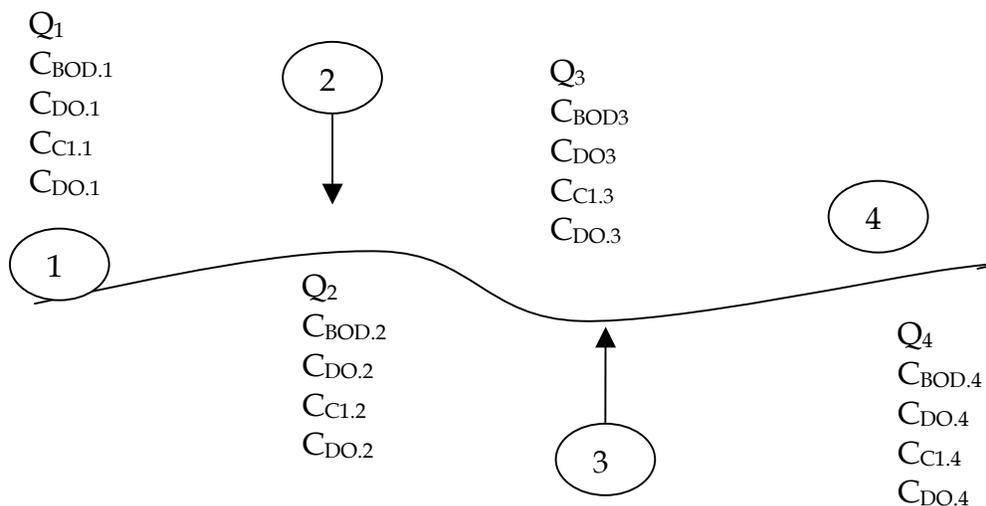
$$C_R = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i} = \frac{\sum M_i}{\sum Q_i}$$

III. Contoh Perhitungan

Untuk lebih jelasnya, maka diberikan contoh perhitungan penggunaan Metoda Neraca Massa berikut ini.

Suatu aliran sungai mengalir dari titik 1 menuju titik 4. Diantara dua titik tersebut terdapat dua aliran lain yang masuk kealiran sungai utama, masing-masing disebut sebagai aliran 2 dan 3. Apabila diketahui data-data pada aliran 1, 2 dan 3, maka ingin dihitung keadaan di aliran 4.

Profil aliran sungai :



Keterangan :

1. Aliran sungai sebelum bercampur dengan sumber-sumber pencemar
2. Aliran sumber pencemar A
3. Aliran sumber pencemar B
4. Aliran sungai setelah bercampur dengan sumber-sumber pencemar.

Data analisis dan debit pada aliran 1, 2 dan 3 diberikan pada tabel berikut ini :

Tabel 1.1 Data analisis dan debit

Aliran	Laju alir m/dtk	DO mg/L	COD mg/L	BOD mg/L	C1- mg/L
1	2,01	5,7	20,5	9,8	0,16
2.	0,59	3,8	16,5	7,4	0,08
3	0,73	3,4	16,6	7,5	0,04

Dengan menggunakan data-data di atas maka dapat dihitung DO pada titik 4, sebagai berikut :

Konsentrasi rata-rata DO pada titik 4 adalah

$$C_{R,DO} = \frac{(5,7 \times 2,01) + (3,8 \times 0,59) + (3,4 \times 0,73)}{2,01 + 0,59 + 0,73}$$

$$= 4,86 \text{ mg/L}$$

Konsentrasi rata-rata COD, BOD dan C1 pada titik 4 dapat ditentukan dengan cara perhitungan yang sama seperti di atas, yaitu masing-masing 18,94 mg/L, 8,87 mg/L dan 0,12 mg/L. Apabila data aliran 4 dimasukkan ke Tabel 1.1 maka akan seperti yang disajikan pada Tabel 1.2

Tabel 1.2 Data analisis dan debit

Aliran	Laju alir m/dtk	DO mg/L	COD mg/L	BOD mg/L	C1- mg/L
1	2,01	5,7	20,5	9,8	0,16
2.	0,59	3,8	16,5	7,4	0,08
3.	0,73	3,4	16,6	7,5	0,04
4.	3,33	4,86	18,94	8,87	0,12
BM X	-	4	25	3	600

BM X - Baku mutu perairan, untuk Golongan/Kelas X

Apabila aliran pada titik 4 mempunyai baku mutu BM X, maka titik 4 tidak memenuhi baku mutu perairan untuk BOD, sehingga titik 4 tidak mempunyai daya tampung lagi untuk parameter BOD. Akan tetapi bila terdapat aliran lain (misalnya aliran 5) yang memasuki di antara titik 1 dan 4, dan aliran limbah masuk tersebut cukup tinggi mengandung C1- dan tidak mengandung BOD, maka aliran 5 masih dapat diperkenankan untuk masuk ke aliran termaksud. Hal tersebut tentu perlu dihitung kembali, sehingga dipastikan bahwa pada titik 4 kandungan C1 lebih rendah dari 600 mg/L.

Menteri Negara
Lingkungan Hidup,

ttd.

Nabiel Makarim, MPA, MSM

**Salinan sesuai dengan aslinya
Deputi I MENLH Bidang Kebijakan
dan Kelembagaan Lingkungan Hidup,**

Hoetomo, MPA.

Cara Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air pada Sumber Air
Metoda Streeter - Phelps

I. Pendahuluan

Pemodelan kualitas air sungai mengalami perkembangan yang berarti sejak diperkenalkannya perangkat lunak DOSAG1 pada tahun 1970. Prinsip dasar dari pemodelan tersebut adalah penerapan neraca massa pada sungai dengan asumsi dimensi 1 dan kondisi tunak. Pertimbangan yang dipakai pada pemodelan tersebut adalah kebutuhan oksigen pada kehidupan air tersebut (BOD) untuk mengukur terjadinya pencemaran di badan air. Pemodelan sungai diperkenalkan oleh Streeter dan Phelps pada tahun 1925 menggunakan persamaan kurva penurunan oksigen (*oxygen sag curve*) di mana metoda pengelolaan kualitas air ditentukan atas dasar defisit oksigen kritik D_c .

II. Deskripsi

Pemodelan Streeter dan Phelps hanya terbatas pada dua fenomena yaitu proses pengurangan oksigen terlarut (deoksigenasi) akibat aktivitas bakteri dalam mendegradasikan bahan organik yang ada dalam air dan proses peningkatan oksigen terlarut (reaerasi) yang disebabkan turbulensi yang terjadi pada aliran sungai.

Proses Pengurangan Oksigen (Deoksigenasi)

Streeter - Phelps menyatakan bahwa laju oksidasi biokimiawi senyawa organik ditentukan oleh konsentrasi senyawa organik sisa (residual).

$$dL/dt = - K' \cdot L \dots \dots \dots (2-1)$$

dengan L : konsentrasi senyawa organik (mg/L)

t : waktu (hari)

K' : konstanta reaksi orde satu (hari^{-1})

Jika konsentrasi awal senyawa organik sebagai BOD adalah L_0 yang dinyatakan sebagai BOD ultimate dan L_t adalah BOD pada saat t , maka persamaan (2-1) dinyatakan sebagai

$$dL/dt = -K' \cdot L \dots \dots \dots (2-2)$$

Hasil integrasi persamaan (2-2) selama masa deoksigenasi adalah :

$$L_t = L_0 \cdot e^{(K' \cdot t)} \dots \dots \dots (2-3)$$

Penentuan K' dapat dilakukan dengan :

- (1) metoda selisih logaritmatis,
- (2) metoda moment (metoda Moore dkk), dan
- (3) metode Thomas.

Laju deoksigenasi akibat senyawa organik dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$r_D = -K' \cdot L \dots \dots \dots (2-4)$$

dengan K' : konstanta laju reaksi orde pertama, hari⁻¹
 L : BOD ultimat pada titik yang diminta, mg/L

Jika L diganti dengan $L_0 \cdot e^{-K' \cdot t}$, persamaan 2-4 menjadi

$$r_D = -K' \cdot L_0 \cdot e^{-K' \cdot t} \dots \dots \dots (2-5)$$

dengan : L_0 : BOD ultimat pada titik discharge (setelah pencampuran), mg/L

Proses peningkatan oksigen terlarut (reaerasi)

Kandungan oksigen di dalam air akan menerima tambahan akibat turbulensi sehingga berlangsung perpindahan oksigen dari udara ke air dan proses ini adalah proses reaerasi. Peralihan oksigen ini dinyatakan oleh persamaan laju reaerasi :

$$r_R = K'_2 (C_s - C) \dots \dots \dots (2-6)$$

dengan K'_2 : konstanta reaerasi, hari⁻¹ (basis bilangan natural)

C_s : konsentrasi oksigen terlarut jenuh, mg/L

C : konsentrasi oksigen terlarut, mg/L

Konstanta reaerasi dapat diperkirakan dengan menentukan karakteristik aliran dan menggunakan salah satu persamaan empirik. Persamaan O'Conner dan Dobbins adalah persamaan yang umum digunakan untuk menghitung konstanta reaerasi (K'_2).

$$K'_2 = \frac{294 (D_L U)^{1/2}}{H^{3/2}} \dots \dots \dots (2-7)$$

dengan D_L : koefisien difusi molekular untuk oksigen, m²/hari

U : kecepatan aliran rata-rata, m/detik

H : kedalaman aliran rata-rata, m

Variasi koefisiensi difusi molekular terhadap temperatur dapat ditentukan dengan persamaan :

$$D_{LT} = 1.760 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{d} \times 1.037^{T-20} \dots\dots\dots(2-8)$$

dengan D_{LT} : koefisien difusi molekular oksigen pada temperatur T, m² /hari
 1.760×10^{-4} : koefisien difusi molekular oksigen pada 20 °C
 T : temperatur, °C

Harga K_2 telah diestimasi oleh Engineering Board of Review for the Sanitary District of Chicago untuk berbagai macam badan air (tabel 2-1).

Table 2-1 Konstanta Reaerasi

Water Body	K ² at 20°C (base e) ^a
Small ponds and backwaters	0.10-0.23
Sluggish streams and large lake	0.23-0.35
Large streams of low velocity	0.35-0.46
Large streams of normal velocity	0.46-0.69
Swift streams	0.69-1.15
Rapid and waterfalls	>1.15

$$K_{2T} = K_{2,20} \cdot 1.024^{T-20}$$

$$1.8 (°C) + 32 = °F$$

Kurva Penurunan Oksigen (*Oxygen sag curve*)

Jika kedua proses di atas dialurkan dengan konsentrasi oksigen terlarut sebagai sumbu tegak dan waktu atau jarak sebagai sumbu datar, maka hasil pengaluran kumulatif yang menyatakan antaraksi proses deoksigenasi dan reaerasi adalah kurva kandungan oksigen terlarut dalam badan air. Kurva ini dikenal sebagai kurva penurunan oksigen (*oxygen sag curve*).

Jika diasumsikan bahwa sungai dan limbah tercampur sempurna pada titik buangan, maka konsentrasi konstituen pada campuran air-limbah pada $x = 0$ adalah

$$C_0 = \frac{Q_r C_r + Q_w C_w}{Q_r + Q_w} \dots\dots\dots(2-9)$$

- dengan : C_o = konsentrasi konstituen awal pada titik buangan setelah pencampuran, mg/L
 Q_r = laju alir sungai, m³/detik
 C_r = konsentrasi konstituen dalam sungai sebelum pencampuran, mg/L
 C_w = konsentrasi konstituen dalam air limbah, mg/L

Perubahan kadar oksigen di dalam sungai dapat dimodelkan dengan mengasuksikan sungai sebagai reaktor alir sumbat.

Neraca massa oksigen :

Akumulasi = aliran masuk - aliran keluar + deoksigenasi + reoksigenasi

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} dV = QC - Q \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) + r_D dV + r_R dV \dots\dots\dots (2-10)$$

Substitusi r_D dan r_R , maka persamaan 2-10 menjadi

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} dV = QC - Q \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) - K'L dV + K_2 (C_s - \bar{C}) dV \dots\dots\dots (2-11)$$

Jika diasumsikan keadaan tunak, $\partial C / \partial t = 0$, maka

$$0 = -Q \frac{dC}{dx} dx - K'L dV + K_2 (C_s - C) dV \dots\dots\dots (2-12)$$

substitusi dV menjadi $A dx$ dan $A dx / Q$ menjadi dt , maka persamaan 2-12 menjadi

$$\frac{dC}{dt} = -K'L + K_2 (C_s - C) \dots\dots\dots (2-13)$$

Jika defisit oksigen D , didefinisikan sebagai

$$D = (C_s - C) \dots\dots\dots (2-14)$$

Kemudian perubahan defisit terhadap waktu adalah

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{dC}{dt} \dots\dots\dots (2-15)$$

maka persamaan 2-13 menjadi

$$\frac{dD}{dt} = K'L + K_2 D \dots\dots\dots (2-16)$$

Substitusi L

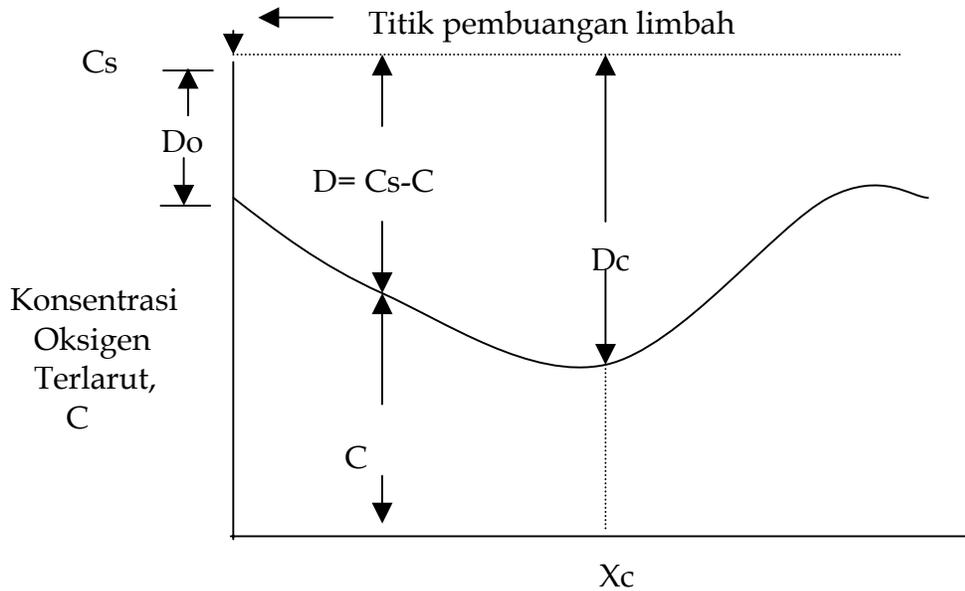
$$\frac{dD}{dt} + K_2 D = K_1 L_0 e^{-k_1 t} \dots \dots \dots (2-17)$$

jika pada $t=0$, $D=D_0$ maka hasil integrasi persamaan 2-17 menjadi

$$D_t = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 e^{-k_2 t} \dots \dots \dots (2-18)$$

Dengan : D_t = defisit oksigen pada waktu t , mg/L
 D_0 = defisit oksigen awal pada titik buangan pada waktu $t=0$, mg/L

Persamaan 2-18 merupakan persamaan Streeter-Phelps *oxygen-sag* yang biasa digunakan pada analisis sungai. Gambar kurva *oxygen-sag* ditunjukkan pada gambar 2-1 berikut ini.



Gambar 2-1 Kurva karakteristik oxygen-sag berdasarkan persamaan Streeter - phelps

Suatu metoda pengelolaan kualitas air dapat dilakukan atas dasar defisit oksigen kritik D_c , yaitu kondisi deficit DO terendah yang dicapai akibat beban yang diberikan pada aliran tersebut. Jika dD/dt pada persamaan 2-17 sama dengan nol, maka

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-k_1 t_c} \dots \dots \dots (2-19)$$

Dengan t_c = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik kritik.
 L_0 = BOD ultimat pada aliran hulu setelah pencampuran, mg/L

Jika dD/dt pada persamaan 2-17 sama dengan nol, maka

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K'} \ln \left[\frac{K_2}{K'} \left(1 - \frac{D_0 (K_2 - K')}{K' L_0} \right) \right] \dots\dots\dots(2-20)$$

$$x_c = t_c v \dots\dots\dots(2-21)$$

Dengan v = kecepatan aliran sungai

Persamaan 2.19 dan 2.20 merupakan persamaan yang penting untuk menyatakan defisit DO yang paling rendah (kritis) dan waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi kritis tersebut. Dari waktu tersebut dapat ditentukan letak (posisi, x_c) kondisi kritis dengan menggunakan persamaan 2.21.

Persamaan lain yang penting adalah menentukan Beban maksimum yang diizinkan. Persamaan tersebut diturunkan dari persamaan 2.18. Persamaan tersebut adalah :

$$\log L_a = \log D_{all} + \left[1 + \frac{K'}{K_2 - K'} \left(1 - \frac{D_0}{D_{all}} \right)^{0,418} \right] \log \frac{K_2}{K'} \dots\dots\dots(2-22)$$

Dengan : D_{all} : defisit DO yang diizinkan, mg/L = $DO_{jenuh} - DO_{baku\ mutu}$

III. Prosedur Penggunaan

Dalam penentuan daya dukung terdapat dua langkah, yang pertama yaitu menentukan apakah beban yang diberikan menyebabkan nilai defisit DO kritis melebihi defisit DO yang diizinkan atau tidak. Untuk hal ini diperlukan persamaan 2.19 dan 2.20. Apabila jawabannya ya, maka diperlukan langkah kedua, yaitu menentukan beban BOD maksimum yang diizinkan agar defisit DO kritis tidak melampaui defisit DO yang diizinkan, untuk hal ini diperlukan persamaan 2.22.

Untuk menggunakan persamaan 2.19, 2.20 dan 2.22 diperlukan data K' dan K_2 dan data BOD ultimat. Penentuan K' dapat menggunakan berbagai metoda yang tersedia, salah satu yang relatif sederhana adalah menggunakan metoda Thomas, yaitu dengan menggunakan data percobaan. Penentuan K_2 dapat menggunakan

persamaan empiris seperti yang diberikan pada persamaan 2.7 dan 2.8 atau yang disajikan pada Tabel 2.1

Perlu dicatat bahwa harga K' , dan K'_2 merupakan fungsi temperatur. Persamaan yang banyak digunakan untuk memperhatikan fungsi temperatur adalah :

$$K'_T = K'_{20} (1,047)^{T-20} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$K'_{2T} = K'_{2(20)}(1,016)^{T-20} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan T = temperatur air, °C dan K'_{20} , $K'_{2(20)}$ menyatakan harga masing-masing pada temperatur 20 °C.

Nilai BOD ultimat pada temperatur dapat ditentukan dari nilai BOD^5_{20} , yaitu BOD yang ditentukan pada temperatur 20 °C selama 5 hari dengan menggunakan persamaan berikut :

$$La = BOD^5_{20} / (1-e^{-5.K'}) \dots\dots\dots(2.25)$$

Dengan K' menyatakan laju deoksigenasi dan 5 menyatakan hari lamanya penentuan BOD.

1. Tentukan laju deoksigenasi (K') dari air sungai yang diteliti. Penentuan harga K' pada intinya adalah menggunakan persamaan 2.3. Kemudian diperlukan serangkaian percobaan di laboratorium. Sehubungan dengan relatif rumitnya penentuan tersebut, maka dianjurkan untuk mengacu pada buku Metcalf dan Eddy untuk penentuan harga K' tersebut. Menurut Metcalf dan Eddy, nilai K' (basis logaritmit, 20 °C) berkisar antara 0,05 hingga 0,3 hari⁻¹. Pada intinya pengukuran K' melibatkan serangkaian percobaan pengukuran BOD dengan panjang hari pengamatan yang berbeda-beda. Apabila digunakan metoda Thomas, maka data tersebut bisa dimanipulasi untuk mendapatkan nilai K' .

Berikut ini contoh yang diambil dari Metcalf dan Eddy :

T, hari	2	4	6	8	10
Y,mg/L	11	18	22	24	26
(t/y) ^{1/3}	0,57	0,61	0,65	0,69	0,727

Dengan t menyatakan waktu pengamatan dan y nilai BOD (*exerted*)

Metoda Thomas adalah mengalurkan $(t/y)^{1/3}$ terhadap t sesuai dengan persamaan berikut :

$$(t/y)^{1/3} = (2,3 K' La)^{-1/3} + (K')^{-2/3}(t)/(3,43 La)^{1/3} \dots\dots\dots(2.26)$$

K' adalah nilai konstanta deoksigenasi dengan basis logaritmik (basis 10) dan La menyatakan BOD ultimat. Dengan menggunakan metoda Thomas, nilai K' dan La dapat ditentukan. Dari data di atas, nilai K' = 0,228 hari⁻¹ dan La = 29,4 mg/L. Berhubung nilai K' didasarkan pada nilai BOD yang diukur pada temperatur 20 °C, maka nilai K' yang diperoleh adalah data untuk temperatur yang sama.

2. Tentukan laju aerasi (K'2) dengan menggunakan persamaan 2.7 dan 2.8 atau data pada Tabel 3.1
3. Tentukan waktu kritik dengan persamaan 2.20 :

$$t_c = \frac{1}{K'_2 - K'} \ln \left[\frac{K'_2}{K'} \left[1 - \frac{D_0 (K'_2 - K')}{K' L_0} \right] \right] \dots\dots\dots(2-20)$$

Dimana : D₀ = defisit oksigen pada saat t=0
 L₀ = BOD ultimat pada saat t = 0

4. Tentukan defisit oksigen kritik dengan persamaan 2.19 :

$$D_c = \frac{K'}{K'_2} L_0 e^{-k' t_c} C$$

5. Apabila nilai D_c lebih besar dari nilai D_{all}, maka perlu dihitung beban BOD maksimum yang diizinkan dengan menggunakan persamaan 2.22.

IV. Contoh Perhitungan

Berikut ini diberikan contoh perhitungan untuk suatu aliran sungai dengan satu sumber pencemar yang tentu (*point source*) :

1. Air limbah dari suatu kawasan industri mempunyai debit rata-rata 115.000 m³/hari (1,33 m³/detik) dibuang ke aliran sungai yang mempunyai debit minimum 8,5 m³/detik.
2. Temperatur rata-rata limbah dan sungai masing-masing adalah 35 dan 23 °C.
3. BOD₅₂₀ air limbah adalah 200 mg/L, sedangkan BOD sungai adalah 2mg/L. Air limbah tidak mengandung DO (DO=0), sedangkan air sungai mengandung DO=6 mg/L sebelum bercampur dengan limbah.
4. Berdasarkan data percobaan di laboratorium, nilai K' pada temperatur 20°C adalah 0,3 hari⁻¹
5. Nilai K'2, dengan menggunakan persamaan 2,7 dan 2,8 pada temperatur 20°C adalah 0,7 hari⁻¹.

Berdasarkan data-data di atas akan dihitung :

1. Harga D_c , t_c dan X_c ,
2. Apabila baku mutu DO = 2mg/L, tentukan beban BOD⁵₂₀ maksimum pada air limbah yang masih diperbolehkan masuk ke sungai tersebut.

Langkah-langkah penyesuaian :

1. Tentukan temperatur, DO dan BOD setelah pencampuran :
 - a. Temperatur campuran = $[(1,33)(35) + (8,5)(23)] / (1,33+8,5) = 24,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.
 - b. DO campuran = $[(1,33)(0) + (8,5)(6)] / (1,33 + 8,5) = 5,2 \text{ mg/L}$
 - c. BOD campuran = $[(1,33)(200)+(8,5)(2)] / (1,33+8,5)=28,8 \text{ mg/L}$
 - d. L_o campuran = $28,8 / [-e^{(0,3)(5)}] = 37,1 \text{ mg/L}$ (pers. 2.25)
2. Tentukan defisit DO setelah pencampuran. Tentukan dahulu DO jenuh pada temperatur campuran dengan menggunakan tabel kejenuhan oksigen. Dari tabel diperoleh nilai DO jenuh = 8,45 mg/L
Defisit DO pada keadaan awal (D_o) = $8,45 - 5,2 = 3,25 \text{ mg/L}$
3. Koreksi laju reaksi terhadap temperatur 24,6 $^\circ\text{C}$
 - a. $K' = 0,3 (1,047)^{24,6-20} = 0,37 \text{ hari}^{-1}$
 - b. $K_2 = 0,7 (1,016)^{24,6-20} = 0,75 \text{ hari}^{-1}$
4. Tentukan t_c dan X_c dengan menggunakan persamaan 2.20 dan 2.21.
 - a. $t_c = \{1 / (0,75-0,37)\} \ln [0,75] / (0,37) \{1 - 3,25(0,75-0,37) / (0,37) (3,71)\}$
= 161 hari⁻¹
 - b. $X_c = (1,61)(3,2)(24) = 123,6 \text{ km}$
5. Tentukan D_c dengan menggunakan persamaan 2.19
 - a. $D_c = (0,37) / (0,75) [37,1e^{(-0,37)(1,61)}] = 10,08 \text{ mg/L}$
 - b. Konsentrasi DO pada $t_c = 8,45 - 10,08 = -1,63 \text{ mg/L}$. Karena nilai DO negatif, hal ini berarti sungai tidak mempunyai DO lagi pada jarak 123,6 km (X_c) dari titik pencampuran.
6. Tentukan beban BOD maksimum pada air limbah bila DO baku mutu = 2 mg/L.
 - a. $D_{all} = \text{DO yang diizinkan} = 8,45 - 2 = 6,45 \text{ mg/L}$
 - b. Gunakan persamaan 2.22 untuk menghitung beban BOD ultimat maksimum:
 $\log L_a = \log 6,45 + [1 + \{0,37(0,75-0,37)\} \{1 - (3,25) / (6,45)\}]^{0,418} \log (0,75) / (0,37)$
 $L_a = 21,85 \text{ mg/L}$
 - c. Beban BOD maksimum (pers. 2.25) = $21,85 \{1 - e^{(-0,3)(5)}\} = 16,97 \text{ mg/L}$
 - d. Jadi BOD pada limbah yang diizinkan:
 $16,97 = [(1,33)(X) + (8,5)(2)] / (1,33 + 8,5)$
 $1,33 X = 166,81 - 17 = 149,81$
 $X = 112,6 \text{ mg/L}$
Jadi BOD pada limbah yang masih diizinkan = 112,6 mg/L

Catatan :

1. Dengan demikian BOD pada limbah harus diturunkan menjadi 112,6 mg/L, agar DO air sungai tidak kurang dari 2 mg/L.
 2. Contoh yang diberikan pada perhitungan ini menganggap hanya ada 1 sumber pencemar yang tentu (*point source*).
-

Menteri Negara
Lingkungan Hidup,

ttd.

Nabiel Makarim, MPA, MSM.

**Salinan sesuai dengan aslinya
Deputi I MENLH Bidang Kebijakan
dan Kelembagaan Lingkungan Hidup,**

Hoetomo, MPA.

Lampiran III
Keputusan Menteri Negara
Lingkungan Hidup,
Nomor 110 Tahun 2003
Tanggal 27 Juni 2003

Cara Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Pada Sumber Air. Metoda QUAL2E

I. Pendahuluan

QUAL2E merupakan program pemodelan kualitas air sungai yang sangat komprehensif dan yang paling banyak digunakan saat ini. QUAL2E dikembangkan oleh *US Environmental Protection Agency*. Tujuan penggunaan suatu pemodelan adalah menyederhanakan suatu kejadian agar dapat diketahui kelakuan kejadian tersebut. Pada QUAL2E ini dapat diketahui kondisi sepanjang sungai (DO dan BOD), dengan begitu dapat dilakukan tindakan selanjutnya seperti industri yang ada disepanjang sungai hanya diperbolehkan membuang limbahnya pada beban tertentu.

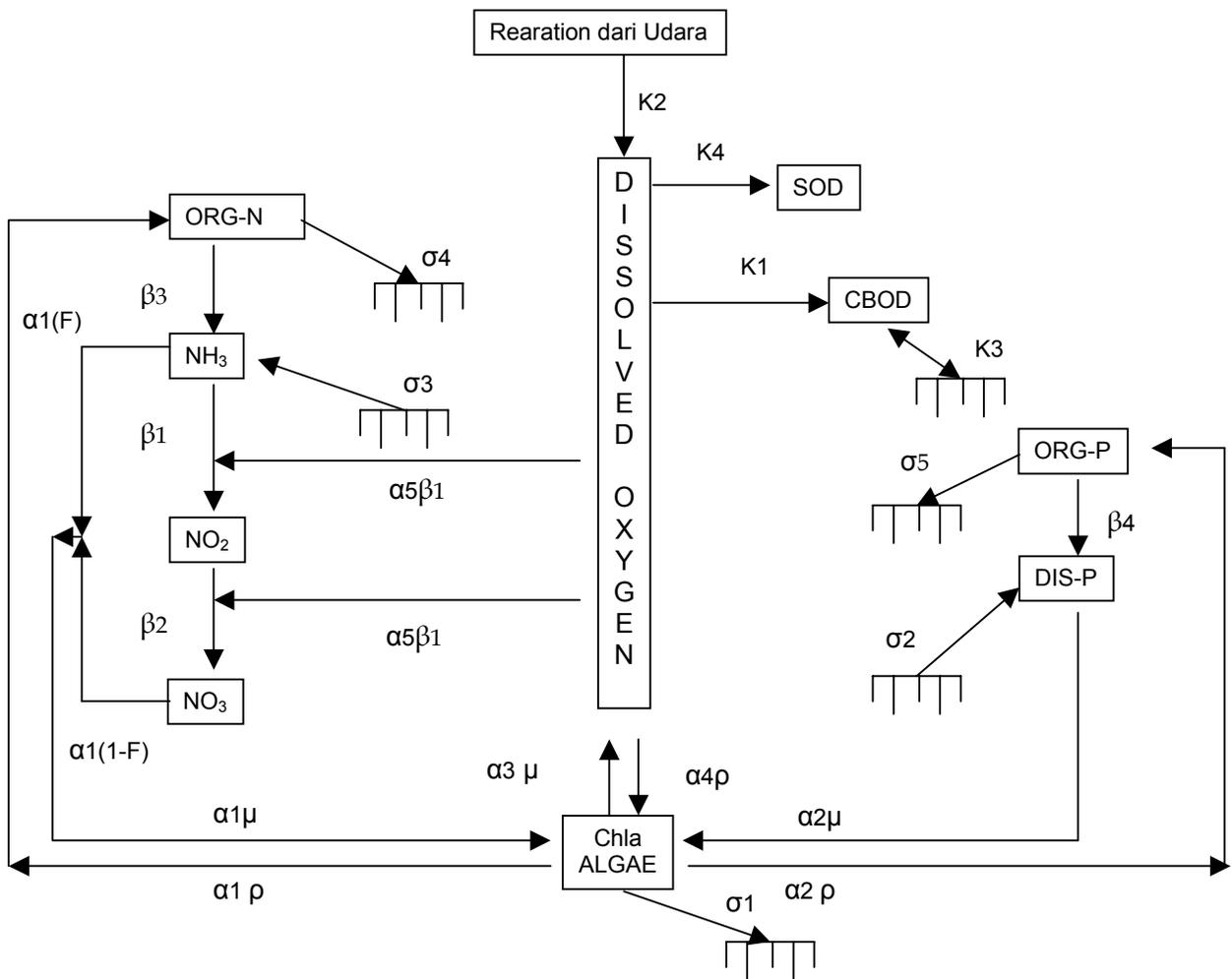
Manfaat yang dapat diambil dari pemodelan QUAL2E adalah :

1. mengetahui karakteristik sungai yang akan dimodelkan dengan membandingkan data yang telah diambil langsung dari sungai tersebut.
2. mengetahui kelakuan aliran sepanjang sungai bila terdapat penambahan beban dari sumber-sumber pencemar baik yang tidak terdeteksi maupun yang terdeteksi,
3. dapat memperkirakan pada beban berapa limbah suatu industri dapat dibuang ke sungai tersebut agar tidak membahayakan makhluk lainnya sesuai baku mutu minimum.

II. Deskripsi

Perangkat lunak QUAL2E adalah program pemodelan kualitas air sungai yang sangat komprehensif. Program ini dapat diaplikasikan pada kondisi tunak atau dinamik. Selain itu dapat mensimulasikan hingga 15 parameter konstituen dengan mengikutsertakan perhitungan aliran-aliran anak sungai yang tercemar. Model ini dapat juga digunakan untuk arus dendritik dan tercampur sempurna dengan menitikberatkan pada mekanisme perpindahan secara adveksi dan disperse searah dengan arus.

Selain melakukan simulasi perhitungan neraca oksigen, seperti yang telah dijelaskan di atas, program QUAL2E dapat mensimulasikan neraca nitrogen dan fosfor. Gambar 3.1. berikut ini dapat menggambarkan hubungan antar konstituen dengan menggunakan program simulasi QUAL2E.



Gambar 3.1 Interaksi antar konstituen utama dalam QUAL2E

Keterangan:

- α_1 = Fraksi dari biomassa alga dalam bentuk Nitrogen, mg-N/mg-A
- α_2 = Kandungan algae dalam bentuk fosfor, mg-P/mg-A
- α_3 = Laju produksi oksigen tiap unit proses fotosintesa alga, mg-O/mg-A
- α_4 = Laju produksi oksigen tiap unit proses respirasi alga, mg-O/mg-A
- α_5 = Laju pengambilan oksigen tiap proses oksidasi dari amoniak, mg-O/mg-N
- α_6 = Laju pengmbilan oksigen dari proses oksidasi dari nitrit , mg-O/mg-N
- σ_1 = Laju pengendapan untuk Algae, ft/hari
- σ_2 = Laju sumber benthos untuk fosfor yang terlarut, mg-P/ft²-hari
- σ_3 = Laju sumber benthos pada amoniak dalam bentuk Nitrogen, mg-N/ft²-hari
- σ_4 = Koefisien laju untuk pengendapan nitrogen, hari⁻¹
- σ_5 = Laju pengendapan fosfor, hari⁻¹
- μ = Laju pertumbuhan alga, bergantung terhadap temperatur, hari⁻¹
- ρ = Laju respirasi alga, bergantung terhadap temperatur, hari⁻¹

- K1 = Laju deoksigenasi BOD, pengaruh temperatur, hari⁻¹
- K2 = Laju rearsi berdasarkan dengan analogi difusi, pengaruh temperatur, day⁻¹
- K3 = Laju kehilangan BOD cara mengendap, faktor temperatur, day⁻¹
- K4 = Laju ketergantungan oksigen yang mengendap, faktor temperatur, g/ft²-hari
- β1 = Koefisien laju oksidasi amonia, faktor temperatur, hari⁻¹
- β2 = Koefisien laju oksidasi nitrit, faktor temperatur, hari⁻¹
- β3 = Laju hydrolysis dari nitrogen, hari⁻¹
- β4 = Laju fosfor yang hilang, hari⁻¹

Pemodelan untuk Oksigen Terlarut (DO) dengan menggunakan QUAL2E

Persamaan untuk penentuan laju perubahan DO :

$$\frac{dO}{dt} = K_2 (O^* - O) + (\alpha_3 \mu - \alpha_4 \rho)A - K_1 L - \frac{K_4}{d} - \alpha_6 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \dots\dots\dots(3-1)$$

- dengan O : konsentrasi oksigen terlarut (mg/L)
- O* : konsentrasi oksigen terlarut jenuh, pada P dan T setempat (mg/L)
- A : konsentrasi biomassa dari alga [mg-A/l]
- L : konsentrasi dari senyawa karbon BOD [mg/L]
- d : kedalaman aliran rata-rata [ft]
- N1 : konsentrasi amonia dalam bentuk nitrogen [mg/L]
- N2 : konsentrasi nitrit dalam bentuk nitrogen [mg/L]

Persamaan untuk penentuan konsentrasi oksigen terlarut jenuh :

$$\ln O^* = -139.344410 + (1.575701 \times 10^5 / T) - (6.642308 \times 10^7 / T^2) + (1.2438 / 10^{10} / T^3) - (8.6219494 \times 10^{11} / T^4) \dots\dots\dots(3-2)$$

- dengan O* : konsentrasi oksigen jenuh, pada 1 atm (mg/L)
- T : temperatur (K) = (°C + 273.15) dan °C pada rentang 0-40 °C

Metoda penentuan laju reaerasi (K₂)

1. K₂ = 0,05 untuk permukaan sungai yang tertutup es, K₂ = 1 untuk permukaan sungai yang tak tertutup es.
2. Harga K₂ pada temperatur 20 °C (Churcill dkk. (1962)) :
 $K_2^{20} = 5.026 \cdot u^{0.969} \cdot d^{-1.673} \times 2.31$

- Dengan u = kecepatan rata-rata pada aliran (ft/detik)
- d = kedalaman rata-rata pada aliran (ft)
- K₂ = koefisien reaerasi

3. O'Connor dan Dobbins (1958) dengan karakter aliran turbulen
 3.1 Untuk aliran dengan kecepatan tinggi dan kondisi isentropik

$$K_2^{20} = \frac{(D_m \cdot u)^{0.5}}{d^{1.5}} \dots\dots\dots(3-3)$$

- 3.2 Untuk aliran dengan kecepatan tinggi dan kondisi isentropik

$$K_2^{20} = \frac{4800 D_m^{0.5} \cdot S_o^{0.25}}{d^{1.25}} \times 2.31 \dots\dots\dots(3-4)$$

Dengan S_o : derajat kemiringan sungai sepanjang aliran (ft/ft)

D_m : koefisien difusi molekul (ft²/day)

D_m : $1.91 \times 10^3 (1.037)^{T-20}$

4. Owens (1964) untuk aliran yang dangkal dan mengalir dengan cepat dengan batasan kedalaman 0.4 - 11.0 ft dan kecepatan dari 0,1 - 5 ft/detik.

$$K_2^{20} = 9.4 \left(\frac{u \cdot 0.67}{d^{1.85}} \right) \times 2.31 \dots\dots\dots(3-5)$$

5. Thacktor dan krenkel (1966)

$$K_2^{20} = 10.8 (1 + F^{0.5}) \frac{u^*}{d} \times 2.31 \dots\dots\dots(3-6)$$

$$F = \frac{u^*}{\sqrt{g \cdot d}} \dots\dots\dots(3-7)$$

$$u^* = \sqrt{d \cdot S_e \cdot g} = \frac{U \cdot n \sqrt{g}}{1.49 d^{1.167}} \dots\dots\dots(3-8)$$

dengan F = bilangan Froude

g = percepatan gravitasi (ft/sec²)

S_e = Sudut dari perbedaan ketinggian

N = koefisien untuk gesekan

6. Langbien dan Durun (1967)

$$K_2^{20} = 3.3 \left(\frac{u}{d^{1.33}} \right) \times 2.31 \dots\dots\dots(3-9)$$

7. Hubungan empiris antara kecepatan dan kedalaman dengan lajur alir pada bagian hidraulik akan dikorelasikan :

$$K_2 = aQ^b \dots\dots\dots(3-10)$$

dengan a : koefisien untuk laju alir untuk K_2

Q: laju alir (ft³/detik)

b: eksponen untuk laju alir K_2

8. Tsivoglou dan Wallace (1972) K_2 dipengaruhi oleh perbedaan ketinggian sepanjang aliran dan waktu yang diperlukan sepanjang aliran tersebut.

$$K_2^{20} = c \frac{\Delta h}{t_f} = (3600 \times 24) c \cdot Se \cdot u \dots\dots\dots(3-11)$$

$$Se = \frac{u^2 \cdot n^2}{(1.49)^2 d^{4/3}} \dots\dots\dots(3-12)$$

Harga c (koefisien kehilangan DO tiap ft sungai)dibatasi oleh laju alir

- Untuk lajut air 1 – 5 ft³/detik harga c = 0.054ft⁻¹ (20°C)
- Untuk lajut alir 15 – 3000 ft³/detik harga c = 0.110 ft⁻¹ (20°C)

III. Prosedur Penggunaan

Program, cara penggunaan, dan contoh penggunaan pemodelan QUAL2E dapat di-*download* di internet pada website :

1. <http://www.epa.gov/docs/QUAL2E WINDOWS/index.html>, atau
2. http://www.gky.com/_downloads/qual2eu.htm

Sedangkan tahap-tahap penggunaan QUAL2E untuk simulasi DO sepanjang aliran sungai adalah sebagai berikut :

1. QUAL2E simulasi
 - 1.1 Menulis judul dari simulasi yang akan dilakukan
 - 1.2 Tipe simulasi yang diinginkan dengan 2 pilihan yaitu kondisi tunak dan dinamik
 - 1.3 Unit yang akan digunakan yaitu unit Inggris dan SI
 - 1.4 Jumlah maksimum iterasi yang ingin dilakukan dengan batasan 30 iterasi
 - 1.5 Jumlah aliran yang akan dibuat

2. Penjelasan tentang aliran yang akan dibuat dengan data yang diminta
 - 2.1 Nomor aliran
 - 2.2 Nama aliran
 - 2.3 Titik awal sungai
 - 2.4 Titik akhir sungai
 - 2.5 Merupakan sumber sungai atau tidak ?
 - 2.6 Selang sungai yang akan dimodelkan

3. Simulasi kualitas yang diinginkan
 - 3.1 Terdapat pilihan temperature, BOD, Algae, Fosfor, Nitrogen, DO
 - 3.2 BOD dengan data koefisien konversi BOD untuk konsentrasi BOD

4. Data iklim dan geografi yang akan dimasukkan
 - 4.1 Letak sungai data bujur dan lintangnya
 - 4.2 Sudut yang dibentuk sungai dari awal hingga titik akhir sungai tersebut untuk menentukan bila menggunakan koefisiens reaerasi (K_2) pilihan 4
 - 4.3 Ketinggian sungai yang terukur dari awal hingga akhir untuk K_2 pilihan 5

5. Membuat beberapa titik untuk pembatasan dengan mengambil sample harga DO baik min, average, dan max

6. Konversi temperature terhadap
 - 6.1 BOD untk Decay dan Settling
 - 6.2 DO untuk reaerasi dan SOD

7. Data hydraulik sungai dengan kebutuhan :
 - 7.1 Persamaan untuk kecepatan $u = a.Q^b$ maka diperlukan data kecepatan pada beberapa titik di sungai dengan laju air volumetrik untuk mengetahui koefisien dan konstantanya. Data ini berpengaruh terhadap koefisien reaerasi (K_2) khususnya pilihan 2, 3, 4, 5, 6, 8
 - 7.2 Persamaan untuk kedalaman $d = c.Q^d$ maka diperlukan data kedalaman sungai pada beberapa titik dengan laju alir volumetrik untuk mengetahui koefisien dan konstantanya. Data ini berpengaruh terhadap pilihan K^2 yang sebagian besar merupakan persamaan empiris.
 - 7.3 *Manning Factor* dengan data dapat dilihat pada manual.

8. Data konstanta reaerasi
 - 8.1 BOD dengan data decay, settling time (1/hari)
 - 8.2 SOD rate ($\text{g}/\text{m}^2\text{-day}$)
 - 8.3 Tipe persamaan reareasi dengan menggunakan persamaan yang ada (lihat metoda penentuan laju konstanta reareasi K^2)
 - 8.4 Bila persamaan yang digunakan K^2 pilihan 7 untuk persamaan $K^2 = e.Q^f$ disediakan data untuk data yang dimasukkan K^2 dengan harga e serta f
 9. Kondisi awal dengan data yang dimasukkan temperatur, DO, BOD.
 10. Kenaikan laju air sepanjang sungai dengan data yang dimasukkan laju alir (m^3/s), temperatur ($^{\circ}\text{C}$), DO, BOD.
 11. Data-data untuk aliran awal yang diperlukan laju alir (m^3/s), temperatur ($^{\circ}\text{C}$), DO, BOD.
 12. Harga-harga untuk kondisi iklim global sesuai letak bujur dan lintang dengan data yang diperlukan
 - 12.1 Waktu (jam, hari, bulan, tahun)
 - 12.2 Temperatur bola basah dan kering (K)
 - 12.3 Tekanan (mbar)
 - 12.4 Kecepatan angin
 - 12.5 Derajat sinar matahari (Langley, hr) dan kecerahan sungai.
-

Menteri Negara
Lingkungan Hidup,

ttd.

Nabiel Makarim, MPA,MSM

**Salinan sesuai dengan aslinya
Deputi I MENLH Bidang Kebijakan
dan Kelembagaan Lingkungan Hidup,**

Hoetomo, MPA.