

PENGEMBANGAN MODEL DO-BOD DALAM PENGELOLAAN KUALITAS AIR SUNGAI CILIWUNG¹⁾

***(The DO-BOD Model Development for Ciliwung River
Water Quality Management)***

**Widyo Astono, M. Sri Saeni²⁾, Bibiana W. Lay²⁾,
dan Soepangat Soemarto²⁾**

ABSTRACT

The purpose of this research is to built a water quality model which explains DO-BOD response as the effect of organic loading by hydrodynamic behavior, chemical and biological processes in the stream which are developed mathematically from reoxygenation rate (k_a), deoxygenation rate (k_d), photosynthesis and respiration, sediment oxygen demand (SOD) that are got from laboratory analysis and direct measuring in the field. The research was done in laboratory using standard method and also done in field when rainy and dry season. Parameters that were measured are water temperature, pH, BOD, DO, discharge, velocity, and water depth. Based on the research, DO-BOD response observation has a same tendency with the result of model.

Key words: hydrodynamic, reoxygenation rate, decomposition rate, DO-BOD response

PENDAHULUAN

Model kualitas air telah dirintis sejak tahun 1925 oleh Streeter-Phelps untuk Sungai Ohio di Amerika Serikat (Thomann, 1987), dan oleh Lohani tahun 1980 untuk Sungai Chao Phraya di Bangkok (Lohani, 1980). Keduanya sukses dalam merekomendasi penetapan *effluent standard* yang disesuaikan dengan kemampuan asimilasi sungai tersebut. Sungai Ciliwung sebagai salah satu sumber daya air di Jawa Barat telah mengalami pencemaran organik sehingga kualitas dan peruntukan airnya menurun sejak dari hulu. Kepadatan dan jumlah penduduk yang semakin meningkat di DAS Ciliwung serta tidak berjalannya aturan hukum yang mengatur masuknya beban limbah yang dihasilkan menjadi faktor utama terjadinya pencemaran tersebut di sepanjang tahun. Indikasi ini dapat dilihat dari rangkuman hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Saeni (1986) yang menunjukkan adanya kecenderungan meningkatnya nilai BOD dari 3.26 mg/l di hulu menjadi 21.16 mg/l dan diikuti oleh penurunan oksigen terlarut (DO) dari 8-1.16 mg/l.

Penelitian bertujuan membangun model kualitas air yang dapat menjelaskan respons DO-BOD akibat beban buangan organik oleh perilaku hidrodinamika, proses kimia, dan biologi di perairan, yang dikembangkan secara matematis dari angka konstanta laju reoksigenasi (k_a), laju deoksigenasi atau dekomposisi (k_d),

¹⁾ Bagian dari disertasi penulis pertama, Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana IPB

²⁾ Berturut-turut Ketua dan Anggota Komisi Pembimbing

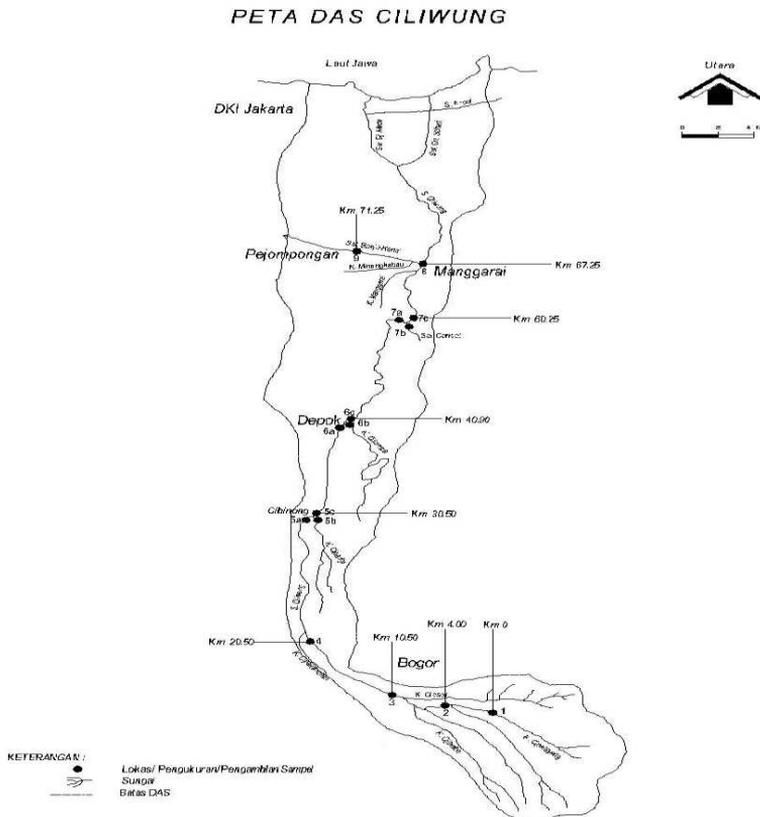
produk fotosintesis (R), respirasi (R), dan kebutuhan oksigen sedimen (SOD) yang diperoleh dari hasil analisis laboratorium dan pengukuran langsung di lapangan sehingga diperoleh besaran beban organik yang boleh masuk sesuai dengan kapasitas asimilasinya. Model yang digunakan dalam penelitian ini mengacu dari persamaan lengkung oksigen (*oxygen sag*) *Streeter-Phelps* (1925) yang dikembangkan sesuai dengan karakteristik hidrogeometri Sungai Ciliwung saat ini dan kemungkinan terjadinya perubahan di masa yang akan datang.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Penelitian dilakukan di dua tempat, yaitu di lapangan dan di laboratorium. Di lapangan lokasi pengambilan sampel air (data primer) dilakukan pada titik titik yang telah ditentukan yang diperkirakan dapat mewakili formulasi model kualitas air dari distribusi DO dan BOD di sepanjang Sungai Ciliwung.

Waktu penelitian dilakukan dua periode, yaitu pada musim hujan dan kemarau. Peta lokasi pengambilan sampel air terdapat pada Gambar 1. Analisis sifat-sifat fisik-kimia air dilakukan di Laboratorium Kimia IPB dan pengukuran hidrometri sungai diukur langsung di lapangan.



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel air

Analisis Laboratorium

Analisis laboratorium memakai metode *standard method*, meliputi BOD tingkat pertama dengan inkubasi 2, 4, 6, 8, dan 10 hari dan BOD tingkat dua 12,14,16, dan 20 hari pada suhu 20°C. Produk fotosintesis dan respirasi ditetapkan dengan pemeriksaan konsentrasi DO dari *light bottle* dan *dark bottle* pada waktu 0 dan 5 jam, dengan tetraisi winkler. Pengukuran suhu air menggunakan termometer pH dan dengan pH meter.

Pengukuran Debit

Debit aliran sungai diperoleh dari perkalian kecepatan aliran rata-rata dengan luas penampang basah sungai (*velocity-area method*). Kecepatan aliran sungai diukur dengan pelampung permukaan, sedangkan kedalaman dan lebar penampang sungai diukur dengan tali berskala.

Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis menurut jenis, sifat, dan peruntukannya. Analisis mempertimbangkan persyaratan teknis sehingga mencapai ketepatan yang tinggi.

Penerapan Model

Penerapan model disajikan dalam bentuk grafik dan persamaan untuk dievaluasi kecenderungannya dan diperkirakan kemungkinan-kemungkinan penyebabnya. Model *Streeter-Phelps* untuk menghitung penurunan BOD (L) dan defisit oksigen (D) adalah

$$L = \underbrace{L_0 e^{-k_r t}}_{(a) \text{ titik}} + \underbrace{\frac{S_L}{k_r} (1 - e^{-k_r t})}_{(b) \text{ menyebar}} \dots \dots \dots (1)$$

(a) defisit oksigen titik

$$D = D_0 e^{-k_a t} + \underbrace{\frac{k_d L_0}{k_a - k_r} (1 - e^{-k_r t} - e^{-k_a t})}_{(b) \text{ BOD titik}} + \underbrace{\frac{-P + R + (S_b / H)}{k_a}}_{(c) \text{ defisit menyebar}} (1 - e^{-k_a t}) + \underbrace{\frac{k_d S_L}{k_r k_a} (1 - e^{-k_a t}) - \left(\frac{k_d S_L}{k_r (k_a - k_r)} (e^{-k_r t} - e^{-k_a t}) \right)}_{(d) \text{ BOD menyebar}} \dots (2)$$

Keterangan:

- L₀ = BOD ultimate sumber pencemar titik (mg/l)
- k_d = konstanta laju dekomposisi organik (1/hari)
- k_a = konstanta laju reoksigenasi (1/hari)
- k_r = laju penyisihan BOD akibat dekomposisi dan pengendapan, ks (1/hari)
- = kd + ks
- t = waktu tempuh aliran (hari)
- = x/v (jarak/kecepatan aliran)
- S_L = BOD *ultimate* sumber pencemar menyebar (g/m³.hari)
- P = oksigen produk fotosintesis (g/m³.hari)
- R = oksigen terpakai respirasi (g/m³.hari)
- S_b = kebutuhan oksigen sedimen (g/m².hari)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Suhu

Suhu ($^{\circ}\text{C}$) merupakan salah satu parameter kunci model kualitas air suatu perairan. Aktivitas biologi dan proses kelarutan gas di dalam air sangat bergantung pada kondisi suhu. Pada suhu optimum aktivitas biologi dengan hara cukup akan efektif dalam pertumbuhan maupun dekomposisi bahan organik. Sebaliknya pada perairan dingin aktivitas tersebut akan melambat (Chapra, 1997).

Sementara itu, kelarutan oksigen tertinggi pada perairan jernih terjadi pada suhu 0°C sebesar 14.62 mg/l dan terendah pada suhu 30°C sebesar 7.63 mg/l. Oleh karena itu, di perairan tropis DO jenuh tidak pernah melebihi angka 9 mg/l (Thomann, 1987). Pada pengukuran di lapangan, suhu air diukur secara *in situ* menggunakan termometer dalam satuan $^{\circ}\text{C}$. Suhu rata-rata setiap ruas tercatat ruas hulu 21, ruas tengah 24, dan ruas hilir 27°C .

pH

pH menunjukkan tingkat kemasaman dan merupakan parameter ikutan dari hasil proses bio-kimia di dalam air. Pada suasana netral, pH perairan alam nilainya akan proporsional terhadap konsentrasi oksigen dalam proses dekomposisi organik. Semakin rendah respons konsentrasi oksigen di perairan, semakin masam dan kecil nilai pHnya (Camp and Thomas, 1974). Pengukuran di lapangan menunjukkan nilai pH perairan Sungai Ciliwung berkisar 6-7 diukur secara *in situ* menggunakan pH meter. Nilai kisaran DO 2.01-0.98 mg/l pada ruas Kalibata-Pejompongan ternyata tidak diikuti dengan penurunan pH yang proporsional. Hal ini menunjukkan tingginya kandungan sabun atau deterjen yang dibuang langsung oleh penduduk padat di sekitarnya, sehingga menaikkan nilai pH.

Konstanta Laju Reoksigenasi (k_a)

Angka konstanta kecepatan reaerasi (k_a) menunjukkan besarnya laju penyerapan oksigen atmosfer ke dalam perairan. Dari rumus *O'Connor-Dobbins, Churchill, Owens and Gibbs* besarnya k_a di perairan bergantung pada kombinasi antara nilai kecepatan (v) dan kedalaman air (H) seperti dinyatakan dalam persamaan $k = a \frac{v^b}{H^c}$. Jadi, semakin deras dan dangkal suatu perairan, semakin besar angka konstanta kecepatan reaerasi (k_a) dan sebaliknya (Chapra, 1997).

Data yang diperoleh dari pengukuran v dan H di lapangan menunjukkan bahwa nilai k_a rata-rata di hulu sebesar 12/hari (lewat jenuh) dan menurun tajam menjadi 0.35/hari (belum jenuh) di hilir. Kondisi lewat dan belum jenuh tersebut berlangsung dalam keseimbangan dinamis untuk saling melepas oksigen ke atmosfer (negatif) dan mentransfer oksigen dari atmosfer ke perairan (positif).

Konstanta Laju Dekomposisi Organik (k_d)

Angka konstanta kecepatan dekomposisi (k_d) menunjukkan besarnya laju penguraian bahan organik oleh mikroorganisme aerob dalam perairan. Pada

penerapannya di lapangan (alami), nilai k_d laboratorium (botol) dapat dijadikan acuan sebagai pendekatan awal meskipun proses dekomposisi keduanya berbeda. Pada kondisi tertentu, nilai k_d perairan bisa lebih besar karena adanya faktor pengendapan dan efek sedimen (Thomann, 1987). Oleh karena itu, konstanta di lapangan perlu mempertimbangkan konstanta lain yang dapat memperbesar nilai k_d , yaitu tambahan konstanta dari proses pengendapan partikel (k_s) sehingga nilai konstantanya berubah menjadi $k_r = k_d + k_s$ terjadi pada ruas₆₋₉ yang beraliran laminar. Oleh sebab itu, penerapan k_d laboratorium hanya sesuai untuk ruas₁₋₆. Dari hasil observasi tampak bahwa kisaran k_d , di sepanjang Sungai Ciliwung bervariasi antara 0.286-0.429/hari pada bulan Maret dan 0.309-0.499/hari pada bulan April 2006. Nilai konstanta ini berpengaruh positif terhadap laju kenaikan defisit oksigen perairan.

Fotosintesis (P) dan Respirasi (R)

Fotosintesis dan respirasi tanaman dapat menambah dan mengurangi konsentrasi oksigen di perairan alam. Terdapat dua jenis tanaman yang mendominasi perairan, yaitu dari jenis fitoplankton untuk sungai dalam dan jenis tanaman dasar atau feripiton untuk sungai dangkal. Keduanya hanya tumbuh di perairan jernih dengan penetrasi cahaya matahari berlangsung sempurna. Oleh sebab itu, proses fotosintesis dan respirasi jarang terjadi di perairan yang keruh (Ritmann, 2001). Hasil pengukuran menggunakan metode botol terang dan botol gelap pada interval waktu 5 jam masing-masing bernilai nol.

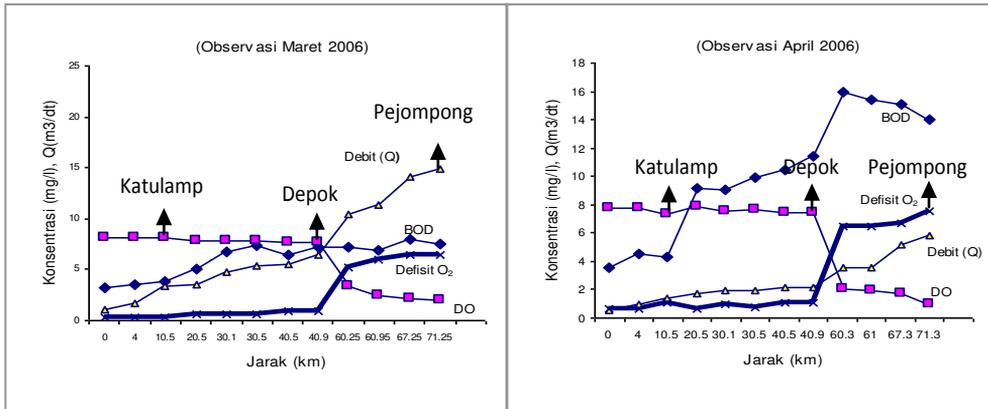
Kebutuhan Oksigen Sedimen (SOD)

Menurut *Streeter-Phelps*, kebutuhan oksigen sedimen (S_b) dinyatakan dalam persamaan $S_b = 1.3 \cdot k_s \cdot H_w \cdot L_w$, atau $S_b = 1.3 \cdot v_s \cdot L_w$ dengan k_s (1/hari), H_w (m), L_w (mg/l), dan v_s (m/hari). Persamaan ini mempersyaratkan adanya lapisan sedimen di dasar sungai. Oleh sebab itu, keberadaan sedimen berorganik di dasar sungai menjadi syarat utama berlangsungnya proses tersebut. Data hasil observasi menunjukkan bahwa akumulasi deposit organik sedimen hanya terjadi pada ruas Kalibata - Pejompongan. Dengan asumsi $v_s = 0.2$ m/hari dan kedalaman air (H_w) rata-rata sebesar 2 m, konstanta kecepatan pengendapan partikel, k_s adalah $v_s/H = 0.1$ /hari, sehingga diperoleh S_b , yang bervariasi 2.42-2.97 g/m².hari (Maret) dan 5.24-6.35 g/m².hari (April).

Respons DO-BOD Observasi

Berdasarkan kurva respons DO-BOD (Gambar 2), terlihat nilai BOD cenderung meningkat dari sekitar 3.17-7.50 mg/l (Maret) dan 3.5-14.06 mg/l (April 2006).

Respons ini memperlihatkan adanya kemungkinan bahwa aktivitas pembebanan (*stimulasi*) di sepanjang sungai sudah dalam kondisi tunak (*steady state*), artinya sifat pembebanan berlangsung tetap sepanjang tahun.



Gambar 2. Respon DO-BOD hasil observasi (Maret dan April 2006)

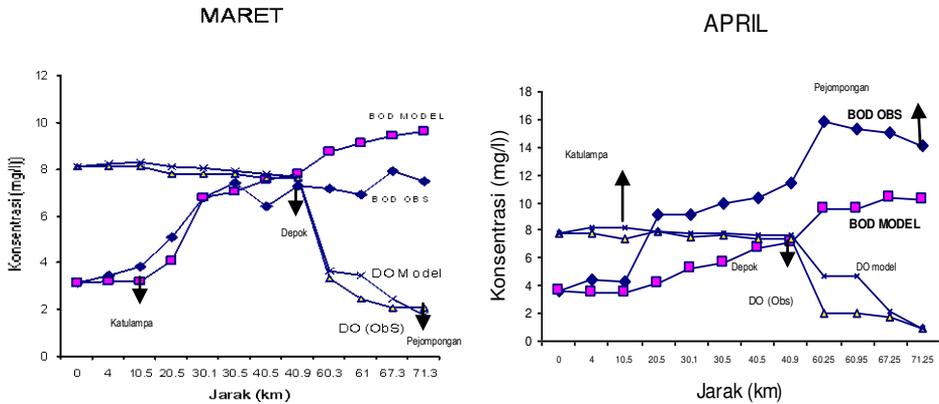
Berdasarkan kurva respons DO-BOD (Gambar 2), terlihat adanya 3 zone karakteristik yang membedakan potensi kemampuan asimilasi Sungai Ciliwung.

- (1) Zone reoksigenasi, terdapat pada Ruas₁₋₆, yaitu antara Cisarua dan Depok yang bertopografi curam melandai dan beraliran turbulensi kuat hasil dari kombinasi kecepatan dan kedalaman sungai yang beraliran deras dan dangkal. Kondisi ini telah memicu kelarutan oksigen atmosfer ke dalam perairan berlangsung cepat dan efektif sebagaimana tampak dari nilai DO 8 mg/l di hulu dan menurun perlahan ke arah Depok 7 mg/l. Berlimpahnya oksigen di ruas ini dapat merupakan *buffer* oksigen yang diperlukan apabila terjadi pembebanan tiba-tiba (*shock loading*) dari limbah organik penduduk di sekitarnya.
- (2) Zone degradasi, dimulai dari Ruas₆₋₇, yaitu antara Depok dan Kalibata yang bertopografi landai-mendatar dan beraliran semi turbulen hasil dari kombinasi kecepatan dan kedalaman sungai yang tenang dan sedang. Kondisi ini berada pada taraf deplesi oksigen karena oksigen yang masuk mulai tidak sebanding dengan kebutuhan degradasinya, seperti tampak dari distribusi DO berkisar 7.43-7.63 mg/l di Depok kemudian turun secara gradual menjadi 2.01-3.30 mg/l di Kalibata.
- (3) Dekomposisi aktif, terdapat pada Ruas₇₋₉, yaitu antara Kalibata dan Pejompong yang bertopografi relatif datar dan beraliran laminar hasil dari kombinasi kecepatan dan kedalaman sungai yang tenang dan dalam. Kondisi ini bergerak ke titik defisit oksigen kritis karena oksigen yang masuk tidak dapat memenuhi kebutuhan degradasinya. Tampak distribusi DO menurun hingga mencapai 0.98-2.05 mg/l di Pejompong, sehingga tidak efektif untuk digunakan sebagai air baku air minum.

Beberapa faktor kemungkinan penyebab perbedaan antara respons DO-BOD hasil observasi dan hasil perhitungan adalah sebagai berikut.

- 1) Penerapan rumus Streeter-Phelps dibatasi oleh sifat hidrogeometri sungai dalam kondisi tunak (*steady state*). Sementara sifat hidrogeometri di lapangan menunjukkan kecenderungan yang selalu berubah. Asumsi beban emisi sumber pencemar organik hanya berasal dari hasil observasi, yaitu

dari influen sungai Ciparigi, Sugutamu, dan Condet, sehingga perhitungan analisis terhadap beban buangan dari setiap pencemar organik kurang terwakili secara keseluruhan.



Gambar 3. Perbandingan kurva DO-BOD (observasi dan model)

- 2) Penerapan linearitas peningkatan debit rata-rata pada rumus

$$q_x = \frac{Q_{hilir} - Q_{hulu}}{x - x_0}$$

tidak selalu sama pada setiap ruas sungai yang ditinjau sehingga terjadi bias pada perhitungan BOD *ultimate* dari sumber menyebar

$$S_L = \frac{(Q_{hilir}L_{hilir} - Q_{hulu}L_{hulu})}{q(x - x_0)}$$

dan sumber titik

$$L = L_0e^{-kr.t} + \frac{S_L}{k_r}(1 - e^{-kr.t})$$

ruas berikutnya. Dari grafik tampak bahwa bias yang terjadi pada distribusi BOD bulan April lebih besar jika dibandingkan dengan bulan Maret. Pada bulan Maret dengan kondisi aliran cenderung normal, penerapan model lebih mendekati lapangan. Namun, kedua model tersebut sudah mendekati kecenderungan yang sama, yaitu peningkatan BOD dan penurunan oksigen secara gradual ke arah Depok dan Kalibata dan menajam ke ruas berikutnya hingga ke Pejompongan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- (1) Keberhasilan model kualitas air Streeter-Phelps sangat ditentukan oleh kondisi hidrodinamika, efek pembebanan, dan asumsi parameter kunci yang mampu menghasilkan kesesuaian respons DO-BOD lapangan. Ruas hulu (Cisarua-Katulampa) yang beraliran deras dan dangkal dan ruas tengah (Katulampa-Depok) yang beraliran deras agak dalam menghasilkan

parameter kunci nilai konstanta reoksigenasi (k_a) yang mampu mempertahankan respons DO sekitar 7 mg/l dengan rata-rata penyimpangan 5% dan 7% terhadap respons BOD pada debit normal, 30% pada debit minimum. Ruas hilir (Depok-Pejompongan) yang beraliran tenang didominasi oleh konstanta dekomposisi (k_d) untuk penyisihan bahan organik mudah urai (*biodegradable*) sedang karakteristik hidrodinamika sungai menjadi tidak signifikan sehingga memperbesar penyimpangan respons sekitar 35% dari kondisi lapangan. Secara keseluruhan, asumsi akumulasi peningkatan debit (q) ke arah hilir, efek fotosintesis, nitrifikasi, kebutuhan oksigen sedimen (SOD), konstanta reoksigenasi (k_a), dan dekomposisi (k_d) merupakan parameter kunci yang mampu mendekatkan model ke kondisi lapangan.

- (2) Tingginya beban organik yang berasal dari buangan penduduk dan industri (tekstil) saat ini sudah melampaui kapasitas asimilasi sungai untuk menurunkan nilai BOD sesuai dengan peruntukannya.

Saran

Beberapa saran yang perlu ditindaklanjuti adalah sebagai berikut:

- (1) melakukan pembatasan beban secara proporsional di setiap ruas sungai dari setiap daerah yang dilalui Sungai Ciliwung sehingga dapat menjamin kualitas air sesuai peruntukannya;
- (2) mencegah masuknya limbah B3 ke dalam Sungai Ciliwung yang potensi mengganggu proses dekomposisi melalui penegakan hukum dan peraturan;
- (3) mempertahankan debit normal, terutama pada musim kemarau.

DAFTAR PUSTAKA

- Camp. and Thomas, R. 1974. *Water and its Impurities of Water Resources Planning*. Dowden: Hutchinson & Ross.
- Chapra, S.C.1997. *Surface Water Quality Modeling*. Toronto: McGraw-Hill.
- Lohani. 1980. *Mathematical optimization for regional water quality management, a case study for Chao Phraya River*. Bangkok: AIT.
- Ritmann, B.E. 2001. *Environmental Biotechnology*. California: McGraw-Hill.
- Saeni, M.S. 1986. Kemampuan saringan pasir, ijuk, dan arang dalam meningkatkan kualitas fisik dan kimia air DAS Ciliwung [diseriasi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, Fakultas Pascasarjana.
- Thomann, R.V. 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. New York: McGraw Hill.