

# ESTIMASI DINAMIK JANGKA PANJANG TERHADAP KUALITAS AIR UNTUK PENGENDALIAN EUTROFIKASI PADA WADUK JATILUHUR

Eko Winar Irianto<sup>1)</sup>, RW Triweko<sup>2)</sup>, Doddi Yudianto<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Peneliti Madya Bidang Teknik Lingkungan SDA,  
<sup>2,3)</sup> Pengajar Pasca Sarjana, Universitas Katolik Parahayangan

Diterima: 13 Juni 2011; Disetujui: 7 November 2011

## ABSTRAK

Waduk di Indonesia pada umumnya telah mengalami masalah eutrofikasi. Untuk menanggulangi permasalahan tersebut, diperlukan langkah-langkah teknis melalui model konseptual dan diselesaikan menggunakan model numerik. Karena itu, tujuan dari penulisan ini adalah membuat simulasi numerik dinamika kualitas air waduk untuk pengendalian eutrofikasi. Parameter kualitas air yang disimulasikan adalah parameter kunci penyebab eutrofikasi yaitu total Nitrogen dan total Fosfor, sedangkan indikator eutrofikasi adalah konsentrasi fitoplankton dan klorofil-a. Simulasi dinamik diperlukan dalam kajian ini, agar dapat diketahui pengaruh perubahan beban zat pencemar terhadap dinamika eutrofikasi waduk. Kajian ini menggunakan data morfometri dan data kualitas air Waduk Jatiluhur sebagai studi kasus. Piranti lunak yang digunakan adalah Powersim Constructor dan WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) yang dibuat oleh US-EPA. Berdasarkan simulasi menggunakan piranti lunak Powersim dan WASP, maka pengendalian dan pemulihan kembali eutrofikasi yang telah terjadi pada Waduk Jatiluhur harus dilakukan secara terintegrasi yaitu dengan menurunkan beban nutrisi internal minimal 50% dan penurunan beban pencemar eksternal lebih dari 90% dari yang ada saat ini.

**Kata kunci:** Fitoplankton, eutrofikasi, klorofil-a, WASP, Waduk Jatiluhur, powersim, model dinamik

## ABSTRACT

Eutrophication is a regularly faced problem by reservoirs in Indonesia. However, this problem can be solved by technical measures including the conceptual model and numerical solution. In the context of such, objective of this paper had focused on the numerical simulation of reservoir water quality dynamics in controlling eutrophication. The water quality parameters simulated include the parameters as prime cause of eutrophication such as total Nitrogen dan total Phosphorus, whereas eutrophication is indicated by the phytoplankton concentration and chlorophyll-a. Dynamic simulation is needed to know the affect of pollutant loading variations to eutrophication dynamics. This study concentrated on the Jatiluhur Reservoir mainly on its morphometry and water quality parameters. Softwares used for this study include the Powersim Constructor and WASP (Water Quality Analysis Simulation Program). Simulation results show that to remedy the eutrophicated Jatiluhur reservoir, an integrated method, that is, reduction of internal and external loading mainly on Total Nitrogen dan Total Phosphorus loadings can be applied. Internal loading needs 50% nutrient loading reduction, while nutrients from external loading require at least 90% reduction.

**Keywords:** Phytoplankton, eutrophication, chlorophyll-a, WASP, Jatiluhur Reservoir, powersim, dynamics model

## PENDAHULUAN

Eutrofikasi adalah proses gradual timbulnya penyuburan pada waduk secara berlebihan yang diakibatkan oleh senyawa nutrisi terutama nitrogen dan fosfor. Balcerzak (2006) menyatakan bahwa proses eutrofikasi ini berlangsung beberapa tahun terutama disebabkan oleh aktivitas antropogenik. Proses penyuburan pada ekosistem waduk akan meningkat seiring dengan bertambahnya beban nutrisi melalui inflow yang memasuki waduk, yaitu dimulai dari fase mesotrofik menuju fase eutrofik dan akan

meningkat mencapai fase hipereutrofik, termasuk yang terjadi pada Waduk Jatiluhur.

Dua tipe sumber beban pencemaran senyawa nutrisi yang memasuki waduk adalah sumber pencemar titik atau *point source* dan sumber pencemar tersebar atau *non-point sources*. Lee dan Jones-Lee (2007) menyatakan bahwa kedua sumber beban pencemaran nutrisi menyebabkan pertumbuhan populasi alga yang berlebihan dan secara signifikan berpengaruh terhadap konsentrasi oksigen terlarut. Kemp (2009) juga menjelaskan bahwa meningkatnya beban nutrisi akan meningkatkan

potensi pertumbuhan alga yang berbahaya atau *harmful alga bloom* dan kondisi anaerobik atau *hipoxia* pada dasar waduk. Balcerzak (2006) juga menyatakan bahwa konsentrasi oksigen terlarut yang rendah dan pertumbuhan fitoplankton yang berlebihan menyebabkan penurunan ekosistem waduk.

Melendez, dkk (2009) menyatakan bahwa akibat pertumbuhan alga yang berlebihan, menyebabkan proses pemulihan kondisi waduk yang telah berstatus hipereutrofik akan lebih sulit untuk kembali berstatus mesotrofik. Karena itu, pemulihan waduk melalui penurunan beban nutrisi dan peningkatan konsentrasi oksigen terlarut pada dasar waduk perlu dilakukan. Melendez, dkk (2009) menyatakan bahwa dinamika beban pencemar yang masuk akibat fluktuasi debit dan konsentrasi juga sangat berpengaruh terhadap status trofikasi waduk.

Scheffer, dkk (2001) menjelaskan bahwa air waduk untuk mencapai kondisi eutrofikasi, dan pemulihan kembali dari proses eutrofikasi adalah bersifat gradual serta dinamik nonlinear. Kondisi tersebut disebabkan oleh proses fisik waduk seperti laju aliran, proses pencampuran, intensitas cahaya, sedangkan kecepatan angin lebih berpengaruh terhadap proses biogeokimia daripada akibat proses biologi internal (Soetaert dan Miedelborg, 2008).

Dengan dasar tersebut, maka hasil kajian ini adalah estimasi pengaruh dalam jangka panjang penurunan beban pencemar input waduk terhadap dinamika fitoplankton dan klorofil-a, yang merupakan indikator eutrofikasi, melalui model dinamika waduk. Dengan demikian upaya-upaya pengendalian masalah eutrofikasi waduk dapat dilakukan.

## METODOLOGI KAJIAN

Untuk mengkaji lebih detil pengaruh penurunan beban pencemar yang masuk melalui inflow waduk terhadap kualitas badan air waduk khususnya terhadap dinamika eutrofikasi dari waktu ke waktu, maka dilaksanakan metodologi sebagai berikut:

1. Melakukan proses analisis secara deduksi atau analisis manfaat dari hasil kajian pustaka dari penelitian dan kajian tentang permasalahan hasil eutrofikasi. Hasil proses deduksi ini adalah usulan konseptual penerapan "*System dynamics*" untuk pengendalian eutrofikasi pada waduk, terutama bila diaplikasikan pada Waduk Jatiluhur.
2. Membuat simulasi dinamik menggunakan data kualitas air dan morfometri Waduk Jatiluhur. Piranti lunak yang digunakan dalam kajian ini

adalah Powersim Constructor dan WASP. Agar dapat diketahui kecenderungan dalam jangka waktu yang panjang, maka simulasi dilakukan lebih dari satu tahun. Siergiev (2009) menjelaskan bahwa simulasi jangka panjang atau lebih dari 1 tahun diperlukan agar diketahui stabilitas model yang telah disusun.

### a. Piranti Lunak Powersim

Muhammadi, dkk (2001) menyatakan bahwa Piranti lunak Powersim adalah salah satu di antara piranti lunak yang sering digunakan untuk membangun dan melakukan simulasi suatu model dinamik yang terdiri dari variabel-variabel yang saling mempengaruhi antara satu dan lainnya dalam suatu kurun waktu. Siergiev (2009) menyatakan bahwa piranti lunak Powersim memungkinkan menyusun simulasi dinamik yang bergantung waktu dengan jumlah variabel dan fungsi yang banyak.

Muhammadi, dkk (2001) menjelaskan bahwa setiap variabel berkorespondensi dengan suatu besaran yang nyata maupun besaran yang dibuat sendiri. Semua variabel tersebut memiliki nilai numerik dan sudah merupakan bagian dari dirinya, yang digambarkan dalam beberapa simbol. Penggunaan simbol-simbol untuk aplikasi dan analisis model dinamik fenomena lingkungan tercantum pada Tabel 1.

**Tabel 1** Komponen-komponen kualitas air dan kategori pemodelan berorientasi obyek

Komponen kualitas air	Kategori pemodelan berorientasi obyek
Danau dan waduk, kolam retensi, Deposisi, Beban Pencemar	Stock
aliran sungai, beban pencemar	Flow
Hubungan matematis (debit dan beban pencemar), peluruhan	Converter
Sistem DAS, outlet	Source and Sink
Hubungan fungsional dan korelasi	Connector

Sumber: *High Performance Sistem, Stella (2000)*

### b. Piranti Lunak Dinamik WASP

Balcerzak (2006) menyatakan salah satu dari piranti lunak yang sering digunakan dalam estimasi eutrofikasi adalah piranti lunak WASP (*Water quality Analysis Simulation Program*). Piranti lunak ini diproduksi oleh US EPA sebagai "*public domain*". Balcerzak (2006) juga menjelaskan bahwa parameter pendukung terjadinya proses eutrofikasi yaitu parameter nutrisi yang terdiri dari nitrogen dan fosfor serta parameter organik pada epilimnion dan

hipolimnion dapat diprediksi dengan WASP seiring perubahan waktu.

Wool, dkk (2001) menyatakan bahwa WASP terdiri dari dua sub program, yaitu EUTRO dan TOXI. Sub program EURO digunakan untuk analisis model eutrofikasi yang diakibatkan oleh senyawa nutrisi dan dinamika oksigen terlarut. Pada sub program EUTRO ini mensimulasi senyawa nutrisi pada proses eutrofikasi, sedangkan TOXI digunakan untuk memprediksi kadar zat kimia pencemar yang terdiri dari zat organik, logam berat pada air permukaan maupun sedimen. Balcerzak (2006) juga menjelaskan bahwa piranti lunak WASP dapat mensimulasikan dinamika perkembangan fitoplankton pada suatu waduk yang kompleks jumlah parameter yang disimulasikan seperti Oksigen terlarut, BOD, senyawa nitrogen, senyawa fosfor, suhu dan bakteri coli.

Persamaan dasar dari piranti lunak WASP ditunjukkan pada persamaan (1) sampai (3):

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta(A \cdot D_x \cdot \frac{\delta C}{\delta x})}{A \cdot \delta x} - \frac{\delta(A \cdot U_x \cdot C)}{A \cdot \delta x} + S_k + (S_b + S_L) \quad (1)$$

Akumulasi Dispersi Adveksi Reaksi Internal Sumber Eksternal  
dimana:

C, konsentrasi zat pencemar (g/m<sup>3</sup>)

t, waktu (hari)

A, luas permukaan dari aliran (m<sup>2</sup>)

D<sub>x</sub>, koefisien dispersi sepanjang arah x (m/hari)

x, jarak sepanjang aliran (m)

U, kecepatan adveksi sepanjang arah x (m/hari)

S<sub>k</sub>, hasil maupun hilang masa akibat reaksi internal, dihitung secara segmen volume (g/m<sup>3</sup>)

S<sub>b</sub>, perubahan masa antara segmen i dan j akibat dispersi longitudinal, diperhitungkan pada segmen [g/m<sup>3</sup> d]. S<sub>b</sub> didefinisikan sebagaimana persamaan (2) sebagai berikut:

$$S_{Bi} = \frac{E_{t0}(t) \cdot A_{t0}}{V_t \cdot L_{t0}} * (C_A - C_B) \quad (2)$$

Dimana :

E<sub>i0</sub>(t), koefisien dispersi sebagai fungsi waktu dimulai pada segmen i [m<sup>3</sup>/hari]

A<sub>i0</sub>, Luas permukaan pada permulaan penampang i [m<sup>2</sup>]

V<sub>i</sub>, volume segmen i [m<sup>3</sup>]

L<sub>i0</sub>, Panjang segmen i [m]

C<sub>jk</sub>, konsentrasi zat pencemar k pada segmen j [g/m<sup>3</sup>]

C<sub>ik</sub>, konsentrasi zat pencemar k pada segmen j [g/m<sup>3</sup>]

SL, beban zat pencemar dari sisi aliran diperhitungkan volume air dan pencemar sebagaimana persamaan (3):

$$S_{Li} = \frac{1000 * L_{ik}(t)}{V_t} \quad (3)$$

L<sub>ik</sub>(kt), beban pencemar dari aliran external [kg/hari]

Menarik kesimpulan dari hasil simulasi tersebut.

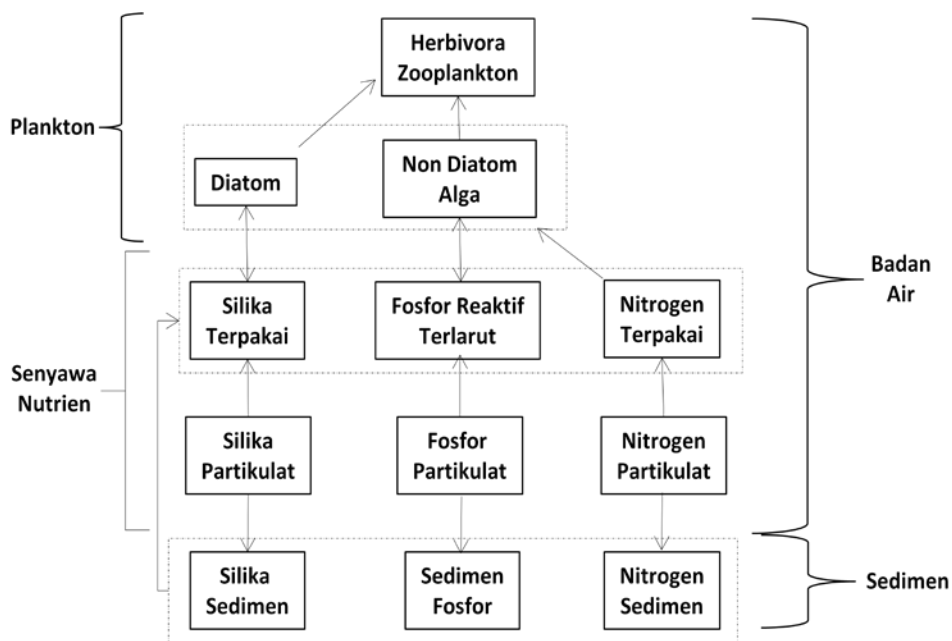
## KAJIAN PUSTAKA

### 1 Pengaruh Beban Senyawa Nutrien terhadap Eutrofikasi

Eutrofikasi disebabkan oleh kelebihan beban input senyawa nutrisi dan sejak tahun 1970 telah dilakukan penelitian untuk menentukan strategi pengendalian eutrofikasi (Pauer, dkk, 2008). Senyawa nutrisi menjadi faktor pembatas utama untuk fitoplankton, sementara silika merupakan faktor pembatas untuk diatom pada endapan dasar waduk. Gambar 1 menunjukkan alur pengaruh beban input senyawa nutrisi terhadap pertumbuhan fitoplankton dan diatom. Gambar 2 menggambarkan skematisasi sumber dan kehilangan beban senyawa nutrisi pada waduk. Beban senyawa nutrisi umumnya berbentuk partikulat nitrogen dan partikulat fosfor, bila melarut akan menjadi fosfor reaktif terlarut (*Soluble Reactive Phosphor*) dan nitrogen terlarut (*available Nitrogen*) yang berguna untuk perkembangbiakan fitoplankton. Namun, dinamika perkembangbiakan fitoplankton dan diatom juga dibatasi oleh zooplankton dan laju kematian plankton tersebut. Dinamika proses senyawa nutrisi tersebut berlangsung tergantung waktu retensi waduk.

Carpenter (2005) menjelaskan beban senyawa fosfor cenderung mengendap dan terakumulasi pada sedimen dan biota. Namun, Pauer, dkk (2008) menyatakan bahwa 60 persen fosfor yang mengendap dapat masuk kembali ke kolom air. Kondisi masuknya dan lepasnya beban senyawa nutrisi terutama fosfor menyebabkan timbulnya dinamika eutrofikasi yang memunculkan golongan Cyanobacteria pada waduk yang dapat menghasilkan zat toksin microcystis (Brahmana, dkk., 2002).

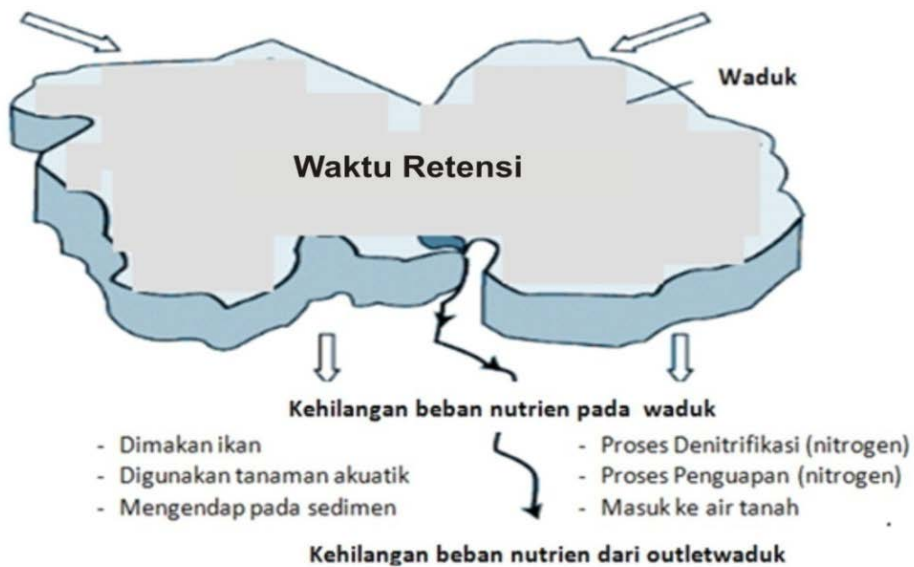
Kiirikki, dkk (2001) juga menyatakan bahwa penurunan beban senyawa fosfor dari DAS melalui perbaikan sistem pengolahan limbah domestik dapat mengurangi secara signifikan intensitas kejadian marak alga termasuk Cyanobacteria pada badan air di Finlandia. Namun, waktu pemulihan kembali suatu waduk yang telah berstatus eutrofik, dengan diturunkannya beban senyawa nutrisi yang memasuki badan air waduk, masih belum diketahui.



(Sumber: Pauer, dkk, 2008)

**Gambar 1** Diagram alir pengaruh beban senyawa nutrien terhadap pertumbuhan fitoplankton dan diatom.

- |  |                            |   |
|--|----------------------------|---|
| <p><b>Sumber beban Nutrien Alami:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpasan dari hutan dan rawa</li> <li>- Erosi lahan</li> <li>- Lepasannya Sedimen dasar</li> <li>- Fiksasi oksigen dari udara</li> <li>- Air tanah</li> </ul> | <p>Presipitasi (hujan)</p> | <p><b>Sumber beban Nutrien Kultural:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpasan permukiman</li> <li>- Limpasan pertanian dan perkebunan</li> <li>- Limbah domestik dan industri</li> <li>- Leachet TPA</li> <li>- Efluent septic tank</li> </ul> |
|--|----------------------------|---|



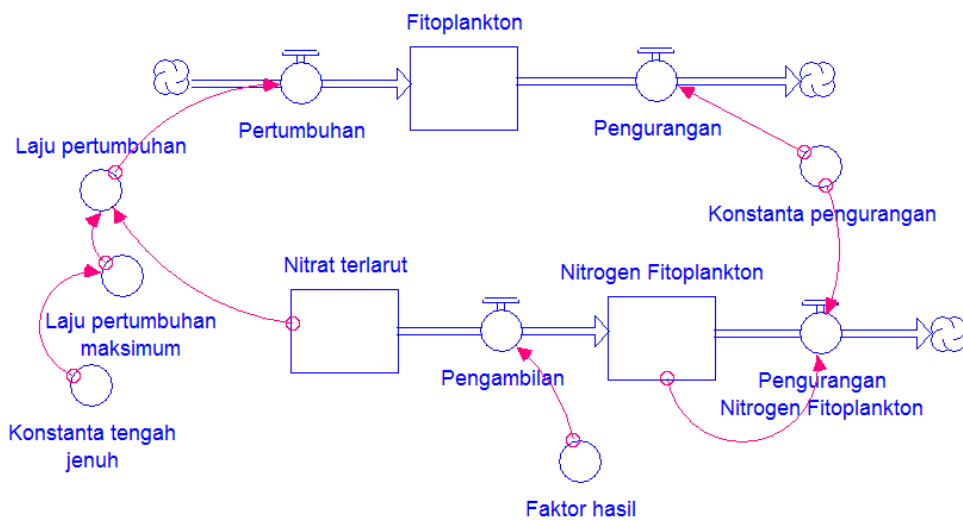
(Sumber: <http://www.ilo.org/ch5waterpollution>, diunduh Maret 2011)

**Gambar 2** Skema sumber dan kehilangan beban senyawa nutrien pada waduk

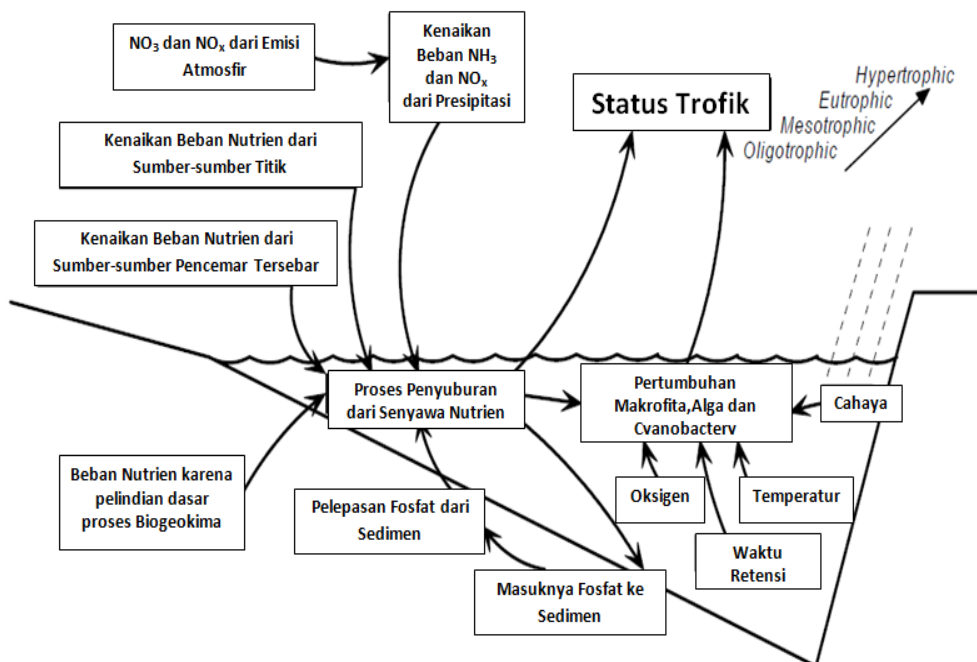
## 2 Simulasi Dinamik Eutrofikasi

Forester (1961) pada Tangirala,dkk (2003) menjelaskan bahwa ide utama dalam pemodelan "system dynamics" adalah untuk mengerti perilaku suatu sistem dengan menggunakan struktur matematika yang sederhana. Dengan demikian, dapat membantu para perencana dalam hal-hal sebagai berikut: a) menggambarkan suatu sistem; b) mengerti suatu sistem; c) mengembangkan model secara kualitatif dan kuantitatif; d) mengidentifikasi perilaku umpan-balik dari suatu

sistem; e) mengembangkan kendali kebijakan untuk pengelolaan sistem yang lebih baik. Huang dan Chang (2003) menjelaskan bahwa penerapan "system dynamics" untuk permasalahan lingkungan adalah melalui simulasi yang berorientasi obyek. Nirmalakhandan (2002) juga menyatakan bahwa faktor-faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap dinamika proses eutrofikasi waduk diperlihatkan pada Gambar 3 dan 4, sedangkan Tabel 1 menunjukkan daftar komponen kualitas air dan pemodelan yang digunakan.



**Gambar 3** Model dinamik berorientasi obyek pertumbuhan fitoplankton (Sumber: Gurung,.2007)



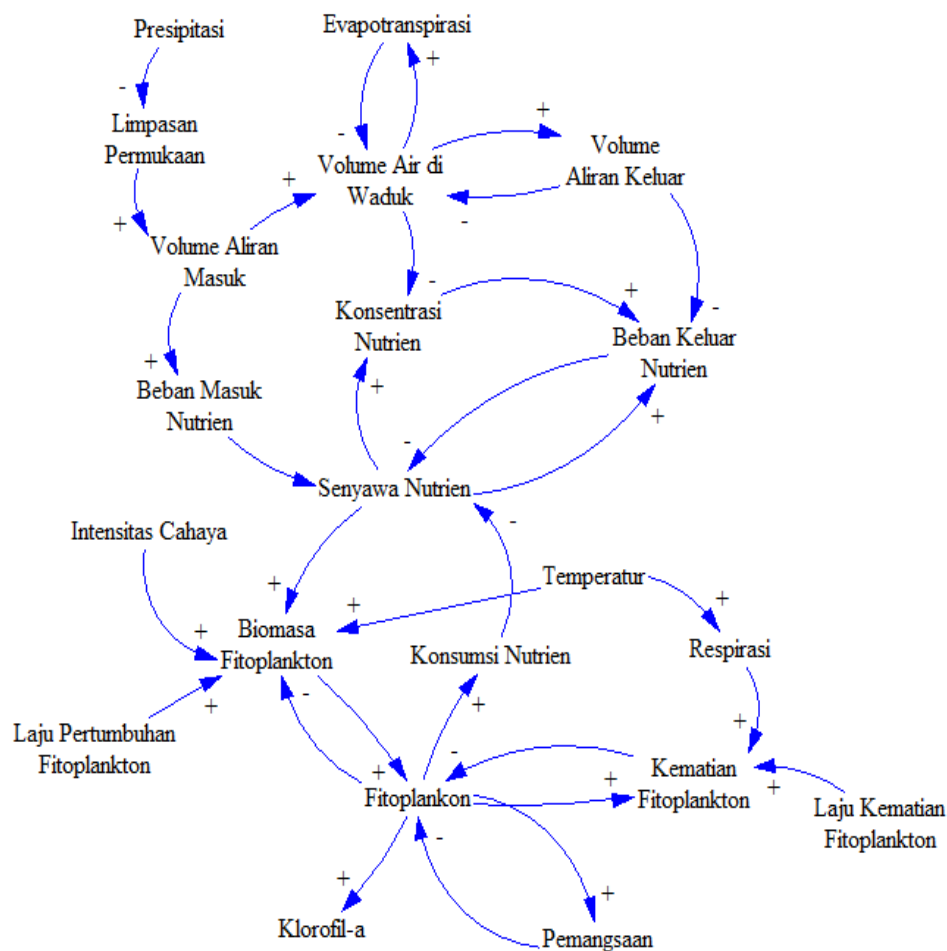
**Gambar 4** Skema pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap proses status trofik waduk (Sumber: Van Niekerk, 2004)

Gambar 5 menjelaskan sebagai berikut: a) Volume air waduk: jumlah air dalam waduk yang akan meningkat dengan masuknya aliran masuk dan menurun dengan adanya aliran keluar dan evaporasi; b) aliran masuk: jumlah air yang masuk ke waduk, sehingga jumlah air waduk meningkat ditambah presipitasi; c) Beban masuk nutrisi: diasumsikan bahwa sumber nutrisi berasal dari sumber titik dan tersebar atau limpasan permukaan, sehingga jumlah nutrisi meningkat dengan meningkatnya aliran masuk ke waduk; d) Beban masuk nutrisi dan konsumsi nutrisi: Aliran keluar akan mengurangi konsentrasi nutrisi yang juga akan tereduksi karena dikonsumsi oleh zooplankton; e) Biomassa Fitoplankton: biomassa fitoplankton meningkat dengan pertumbuhan dan menurun dengan kematian fitoplankton; f) Pertumbuhan fitoplankton, sangat dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu cahaya matahari, nutrisi dan suhu (Ryding, dkk, 1989).; g) Kematian Fitoplankton: reduksi biomassa fitoplankton yang

disebabkan oleh kematian, konsumsi zooplankton dan ikan, respirasi endogen. Jumlah konsumsi oleh zooplankton proporsional dengan biomassa fitoplankton, demikian juga dengan laju kematian secara positif.

### 3 Model Pemulihan Eutrofikasi Jangka Panjang

Beban internal waduk disebabkan kondisi badan air dan sedimen pada waduk yang kaya nutrisi. Upaya pemulihan akibat sumber titik dapat dilakukan melalui saluran pengelak, pengolahan internal lanjutan. Pengendalian zat pencemar akibat sumber pencemar tersebar adalah melalui pengelolaan limbah domestik, pengendalian pencemaran limpasan permukaan, sirkulasi buatan dan biomanipulasi. Pengendalian pencemaran internal dilakukan melalui aerasi lapisan hipolimnion, pengaliran lapisan hipolimnion, dan pengerukan sedimen dasar (Cook dkk, 2005).



**Gambar 5** Diagram sebab-akibat sistem operasional waduk terhadap timbulnya eutrofikasi (Sumber: Gurung, 2007)

Paur, dkk (2005) menjelaskan bahwa respon perilaku biogeokimia terhadap timbulnya maupun pemulihan eutrofikasi pada waduk cenderung lambat dan berbeda pada tiap waduk dan badan air lainnya. Karena itu, pengendalian eutrofikasi waduk perlu dilakukan secara tepat dan terintegrasi melalui penurunan beban senyawa nutrisi dan perbaikan lingkungan waduk. Kondisi tersebut ditunjukkan Gambar 6, yaitu simulasi pemulihan eutrofikasi di Danau Michigan melalui penurunan beban nutrisi.

Model Eutro digunakan oleh Pauer, dkk (2005) untuk mensimulasikan pemulihan eutrofikasi Danau Michigan dengan menggunakan saluran pengelak untuk mengurangi beban senyawa fosfor yang masuk ke danau tersebut. Hasil simulasi, menunjukkan bahwa pemulihan waduk yang berada pada kondisi eutrofik menggunakan saluran pengelak untuk mengurangi beban fosfor bisa terjadi setelah 10 tahun, yaitu konsentrasi klorofil-a menurun dari 2,3-2,5 ug/L menjadi 2-2,3 ug/L pada epilimnion (Gambar 6). Selain konsentrasi klorofil-a, konsentrasi senyawa fosfor dan organik karbon juga menjadi target perbaikan.

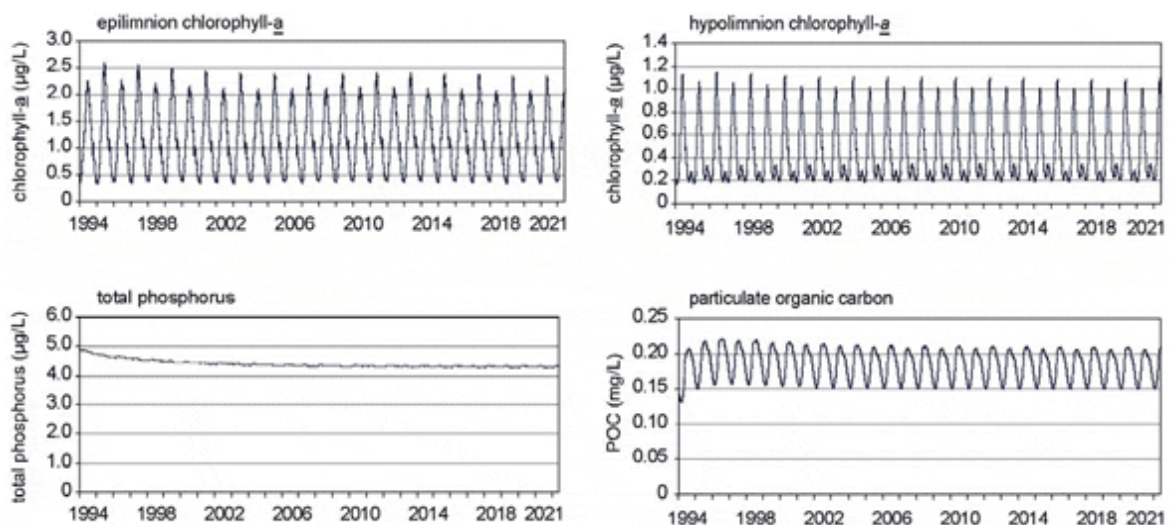
Respon yang gradual tersebut diduga akibat proses resuspensi fosfor dari sedimen yang 60% melarut kembali ke kolom air. Karena itu diperlukan pengangkutan sedimen dasar, pemanfaatan teknologi bakteri dan penggunaan herbisida untuk pengurangan alga Paur dkk (2005).

Martin, dkk (2010) menunjukkan fenomena perbaikan kualitas air pada Danau Bere di Perancis yang telah berstatus eutrofik, dengan ciri-ciri air berwarna hijau, penurunan kecerahan dan tumbuh makro alga terutama *Ulva sp* serta kondisi yang anoksik. Simulasi dilakukan menggunakan piranti lunak DELWAQ. Input model perbaikan kualitas air

pada danau dilakukan secara simultan, yaitu: a) reduksi beban nutrisi dari DAS; b) pengelolaan lingkungan sekitar waduk; c) pengambilan makro alga; d) pencampuran air dan penyuntikan oksigen pada dasar danau. Data-data tersebut menunjukkan bahwa waduk maupun danau yang telah mengalami eutrofikasi memerlukan waktu yang lama untuk pemulihan. Karena itu, estimasi dinamika pemulihan kualitas air waduk yang telah berstatus eutrofik di Indonesia perlu diketahui.

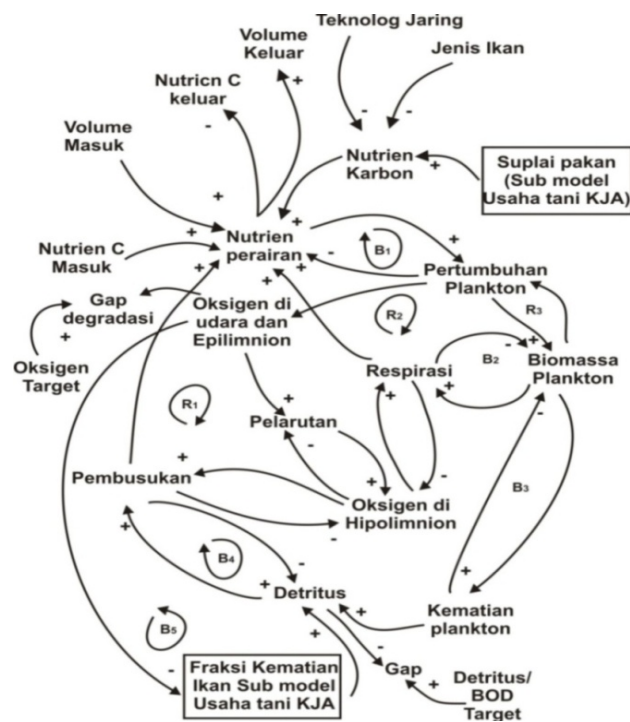
### 1) Aplikasi "System Dynamics" untuk Analisis Eutrofikasi di Indonesia

Tasrif (2001) menjelaskan bahwa model yang dibentuk haruslah memenuhi syarat-syarat sebagai berikut a) Efek suatu intervensi, misal: suatu kebijakan dalam bentuk perilaku yang merupakan suatu kejadian berikutnya, maka untuk melacak unsur komponen waktu perlu "system dynamics"; b) Mampu mensimulasikan berbagai macam intervensi dan dapat memunculkan perilaku sistem, karena adanya intervensi akan dapat dilakukan perubahan perubahan baik parameter maupun struktur model; c) Memungkinkan mensimulasikan suatu intervensi yang efeknya dapat berbeda secara dramatik baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang sesuai kompleksitas perilaku dinamik; d) Perilaku sistem dapat merupakan perilaku yang pernah dialami dan teramati, yaitu melalui data historis, ataupun perilaku yang belum pernah teramati yang meliputi perilaku yang pernah dialami tetapi tidak teramati maupun perilaku yang belum pernah dialami tetapi kemungkinan besar terjadi; e) Mampu menjelaskan bahwa suatu perilaku tertentu dapat terjadi. Wawan (2007) mengaplikasikan metoda "system dynamics" untuk pengelolaan Waduk Cirata, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Contoh hasil simulasi dinamik jangka panjang pemulihan eutrofikasi (Sumber: Pauer,dkk, 2005).





**Gambar 7** Hubungan sebab-akibat proses Eutrofikasi di Waduk Cirata (Sumber: Wawan dkk,2007)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1 Usulan Penerapan “*Sistem Dynamics*”

Permasalahan eutrofikasi terjadi akibat masuknya beban senyawa nutrisi secara berlebihan ke badan air, khususnya waduk atau danau. Beban senyawa nutrisi yang masuk tersebut berasal dari beban pencemar eksternal maupun internal. Beban eksternal adalah beban pencemar yang berasal dari luar waduk, yang umumnya berasal dari kegiatan manusia atau sering disebut dengan beban kultural. Beban internal adalah beban yang berasal dari lingkungan sekitar maupun di dalam waduk, sebagai contoh adalah beban pencemar dari sisa pakan ikan dan lepasnya zat nutrisi dari sedimen dasar ke kolom air akibat pengaruh kecepatan aliran. Kedua jenis beban tersebut memicu terjadinya pertumbuhan alga secara berlebihan.

Berbagai upaya pengendalian dan pemulihan kembali eutrofikasi telah dilakukan oleh berbagai negara, yaitu melalui perbaikan struktural dan nonstruktural. Upaya pengendalian eutrofikasi yang dilaksanakan secara struktural adalah mereduksi beban senyawa nutrisi yang akan masuk ke waduk menggunakan instalasi pengolahan air limbah, membangun saluran pengelak, melakukan pengelolaan lahan yang ramah lingkungan, mengeruk lapisan sedimen dasar dan menambah pasokan oksigen pada

lapisan hipolimnion. Perbaikan dan pemulihan kembali waduk terereutrofikasi melalui upaya nonstruktural adalah memperbaiki lingkungan waduk dengan cara meningkatkan kesadaran masyarakat tentang arti pentingnya waduk bagi kehidupan manusia. Kegiatan yang dapat dilakukan adalah melalui penyuluhan-penyuluhan dan penegakan hukum.

Upaya-upaya pengendalian dan pemulihan kembali waduk yang mengalami eutrofikasi di berbagai negara menunjukkan bahwa pengendalian eutrofikasi waduk perlu dilakukan secara terintegrasi antara upaya pengendalian secara struktural dan nonstruktural. Namun demikian, sebagaimana pengalaman negara-negara maju dalam upaya pemulihan eutrofikasi waduk memerlukan waktu yang cukup lama. Karena itu, pengetahuan tentang dinamika kualitas air yang memicu terjadinya dinamika eutrofikasi waduk sangat diperlukan. Dengan diketahuinya dinamika permasalahan tersebut, maka simulasi untuk menentukan kebijakan-kebijakan pengelolaan waduk dapat diketahui.

“*System dynamics*” merupakan suatu metodologi untuk mengetahui interaksi dinamik antar unsur-unsur dari suatu sistem untuk dipelajari perilakunya sebagai suatu sistem secara menyeluruh. *System dynamics* dapat diterapkan pada masalah sumber daya air, termasuk masalah

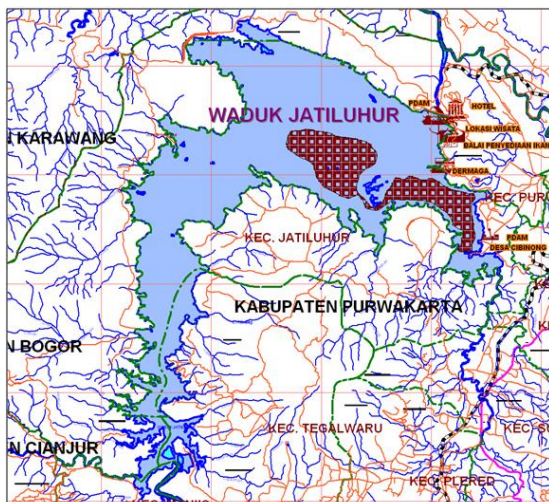


eutrofikasi waduk secara terukur. Pemodelan komponen-komponen kualitas air yang memicu terjadinya proses eutrofikasi dan berorientasi obyek merupakan aplikasi sistem dinamik dengan menggunakan diagram sebab-akibat dan model simulasi berorientasi obyek untuk menganalisis timbulnya masalah eutrofikasi waduk.

## 2 Penerapan “System Dynamics” pada Waduk Jatiluhur

Waduk Djuanda atau sering disebut dengan Waduk Jatiluhur merupakan waduk serbaguna dengan fungsi untuk pemberian air irigasi, PLTA, pengendali banjir, penyedia air baku air minum dan industri, pariwisata, serta perikanan. Waduk ini memiliki luas genangan mencapai 8.300 ha dengan kapasitas tampung ± 3 milyar m<sup>3</sup> pada TMA +107 m dpl, waduk ini bersifat serbaguna dan strategis karena menjadi sumber air baku untuk PAM DKI Jakarta (16,31 m<sup>3</sup>/det), Air baku untuk PDAM Kabupaten Purwakarta, air irigasi untuk sawah seluas 288.860 ha (2003), air baku untuk perikanan air tawar dan payau, air baku untuk industri, air baku untuk PLTA (187 MW) dan serta penggelontoran Kota Jakarta (Siregar dan Mayasari, 2010).

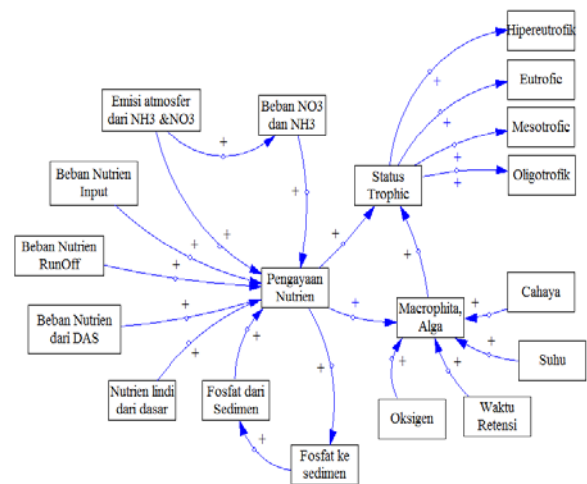
Namun pada saat ini, tingkat kesuburan perairan menurut kandungan fosfat dan nitrogen pada perairan Waduk Jatiluhur telah berubah dari eutrofik pada tahun 2004 menjadi hipereutrofik pada tahun 2005 dan 2006. Degradasi tersebut cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah unit KJA di Waduk Cirata dan Waduk Jatiluhur. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengembangan kegiatan budidaya dalam KJA telah melampaui daya dukungnya, sehingga cenderung telah mencemari perairan. Sumber utama degradasi kualitas air di Waduk Jatiluhur adalah bahan organik dari Waduk Cirata (Cahyo, 2010).



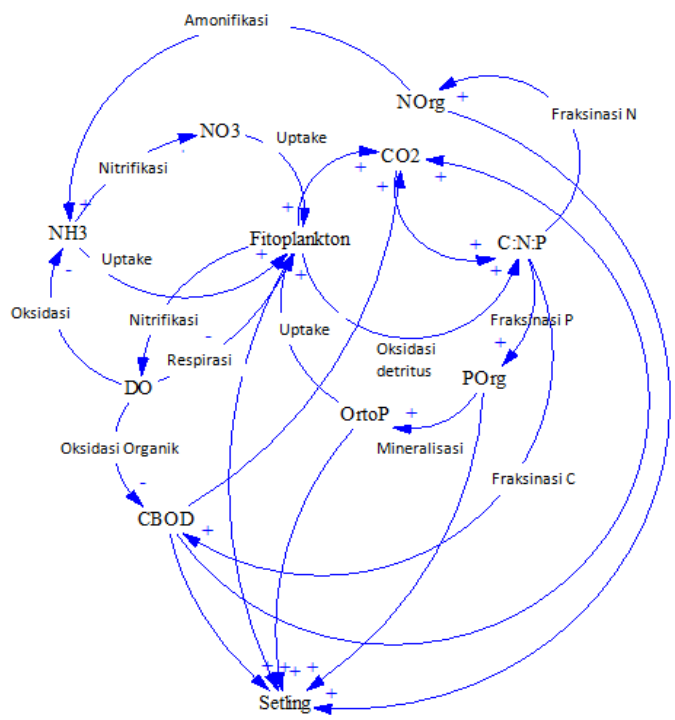
**Gambar 8** Peta sebaran keramba jaring apung di Waduk Jatiluhur (Sumber: Badruddin, 2010)

Bedasarkan distribusi vertikal oksigen di perairan ini terjadi stratifikasi dengan kedalaman epilimnion sangat tipis (Cahyo, 2010). Siregar dan Mayasari (2010) menjelaskan bahwa berdasarkan Keputusan Bupati Purwakarta No. 06/2000, jumlah KJA ditetapkan maksimum 2.100 petak, sedangkan hasil inventarisasi oleh PJT II, pada Desember 2009, ditemukan 19.845 petak. Nastiti (2001) pada Haryani (2010) menyatakan beban N dan P masing-masing mencapai 36.531 ton/tahun dan 33.968 ton/tahun, sehingga menyebabkan waduk dalam keadaan eutrofik. Sebaran beban jaring apung pada Waduk Jatiluhur sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8, yang merupakan salah satu sumber beban pencemar yang menjadi penyebab terjadinya eutrofikasi Waduk Jatiluhur (Badruddin, 2010). Karena itu, untuk pengendalian eutrofikasi diusulkan model konsep sebagaimana Gambar 9 dan 10.

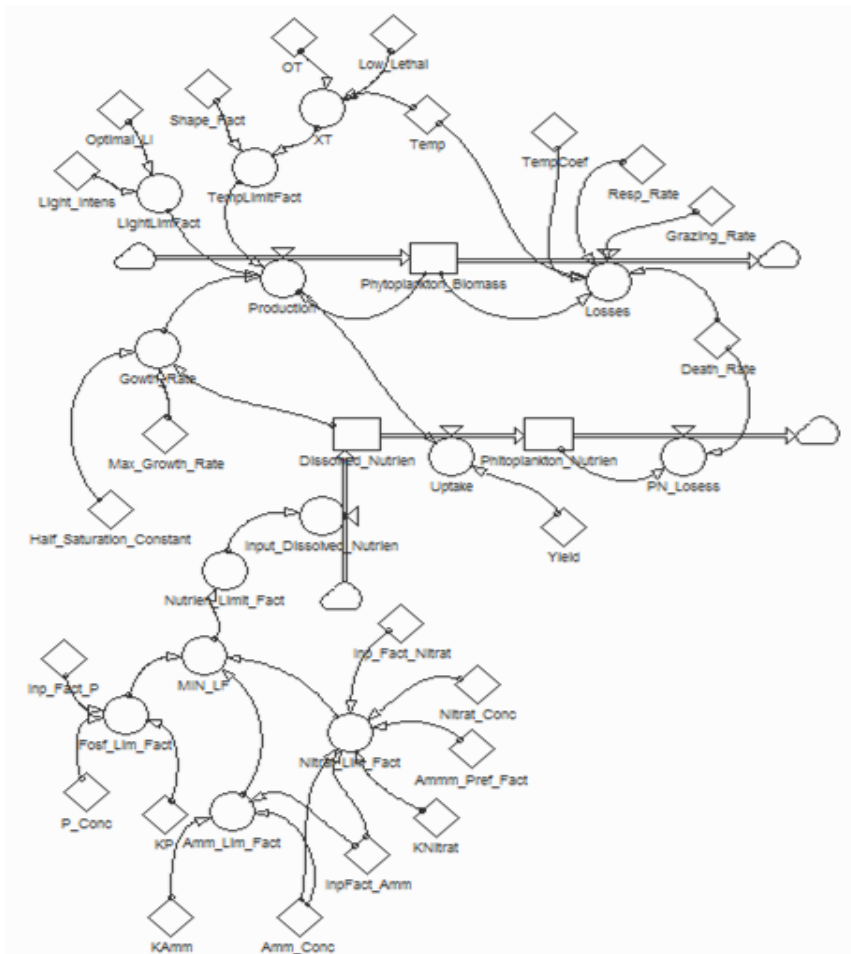
Untuk mengetahui pengaruh senyawa nutrisi dan organik terhadap proses eutrofikasi Waduk Jatiluhur terhadap parameter fitoplankton, diusulkan model diagram sebab-akibat sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 9. Gambar 10 mengindikasikan adanya dua lingkaran positif atau memiliki pengaruh yang bersifat “snow ball effect” terhadap terjadinya proses pertumbuhan fitoplankton yang berlebihan. Lingkaran pertama adalah dimulai dari *uptake* NH<sub>3</sub> oleh fitoplankton - Penguraian fitoplankton menjadi Detritus (C:N:P) - Fraksinasi N menjadi N Organik - Amonifikasi Norganik menjadi NH<sub>3</sub>. Lingkaran ke-2 dimulai dari *uptake* orto Fosfat oleh fitoplankton - penguraian Fitoplankton menjadi Detritus (C:N:P) - fraksinasi P menjadi P Organik-Proses mineralisasi P-Organik menjadi orto Fosfat. Dengan demikian, kedua senyawa nutrisi tersebut merupakan pemicu timbulnya proses eutrofikasi waduk.



**Gambar 9** Diagram sebab-akibat faktor-faktor penting yang mendorong timbulnya proses Eutrofikasi.



**Gambar 10** Diagram sebab-akibat pengaruh parameter kualitas air terhadap fitoplankton

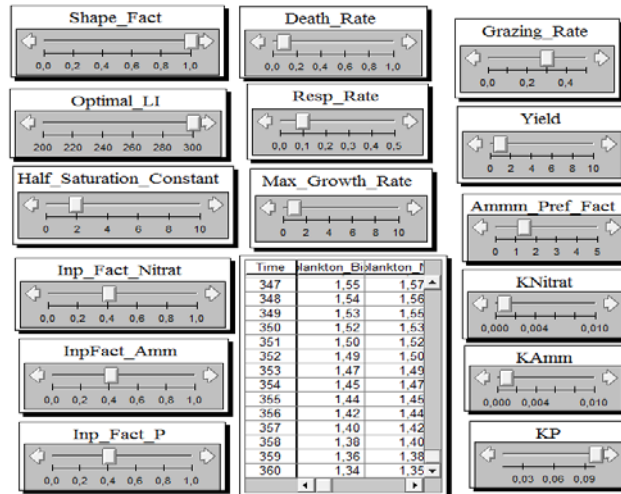


**Gambar 11** Struktur program simulasi dinamik berorientasi obyek pengaruh parameter kualitas air terhadap pertumbuhan fitoplankton

### 3 Simulasi Dinamik Berorientasi Obyek

Detil program simulasi dinamik berorientasi obyek diperlihatkan pada Gambar 11, sedangkan tombol kendali simulasi ditunjukkan pada Gambar 12 dan konstanta-konstanta yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2. Gambar 13 adalah hasil simulasi yang menggambarkan Waduk Jatiluhur

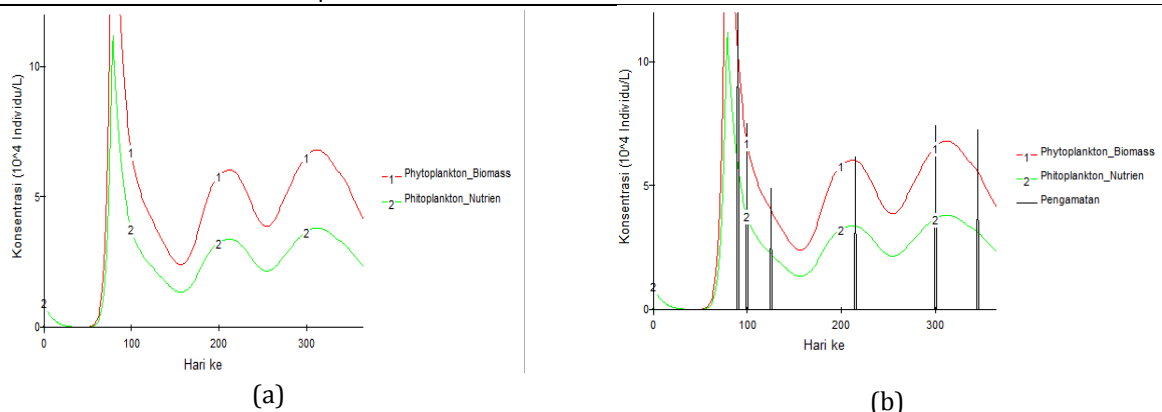
berpotensi mengalami eutrofikasi yang lebih besar bila tanpa kebijakan pengendalian pencemaran nutrisi. Gambar 13 juga menunjukkan perbandingan data observasi dan simulasi dinamika fitoplaknton dalam jangka waktu 1 tahun.



Gambar 12 Tombol kendali simulasi dinamik pertumbuhan fitoplankton

Tabel 2 Konstanta yang digunakan pada model dinamik eutrofikasi (Sumber: Gurung, 2007)

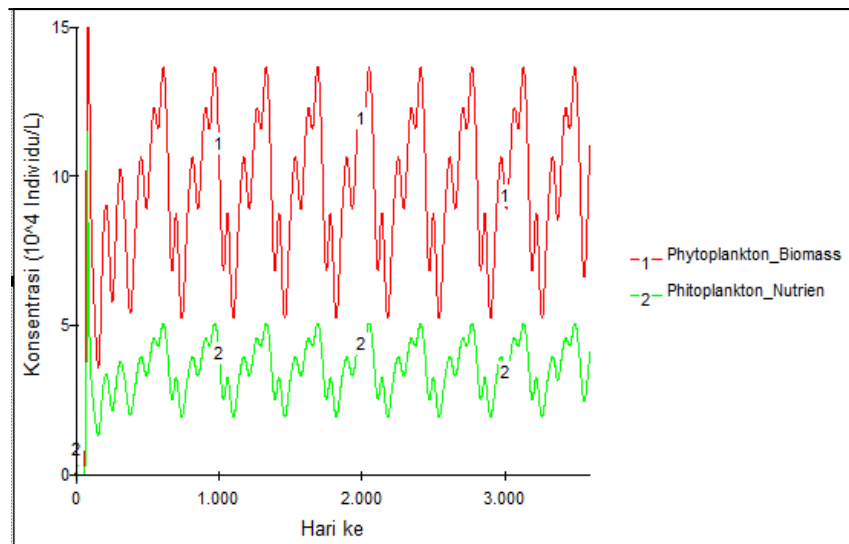
No	Konstanta	Nilai	Satuan
1	Konstanta monod nitrat nitrogen	0,001	mg/L N
2	Konstanta monod amonia nitrogen	0,001	mg/L N
3	Konstanta monod fosfor	0,001	mg/L P
4	Faktor preferensi ammonia	1,46	mg/L N
5	Intensitas cahaya optimal	250	W/m <sup>2</sup>
6	Suhu optimal	23	°C
7	Faktor bentuk untuk pembatas suhu	0,6	-
8	Batas ambang rendah suhu	5	°C
9	Laju pertumbuhan maksimum	0,9	1/hari
10	Laju pemangsaan	0,265	1/hari
11	Laju kematian	0,3	1/hari
12	Laju respirasi	0,1	1/hari
13	Koefisien suhu untuk respirasi	1	-



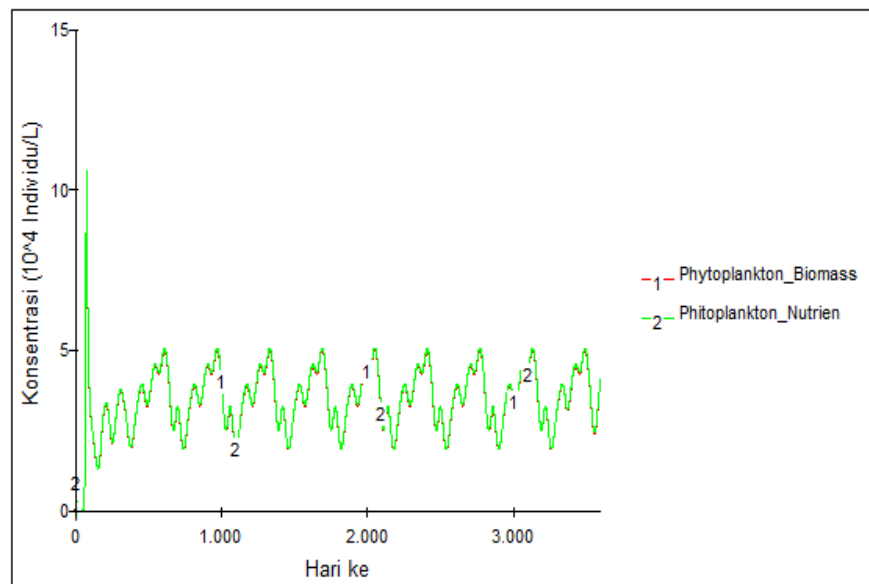
Gambar 13 Uji simulasi dinamik fitoplankton di Waduk Jatiluhur: (a) Simulasi tanpa kebijakan; (b) Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengamatan

Gambar 14 menunjukkan simulasi jangka panjang yang menggambarkan bahwa perbaikan internal waduk belum cukup memperbaiki eutrofikasi, sehingga perlu dikombinasikan dengan penurunan faktor kunci lainnya yaitu penurunan 20% beban fosfor. Perbaikan internal waduk dan penurunan beban fosfor 20% dapat menurunkan

biomassa fitoplankton hingga 50% atau mencapai  $(2-5) \cdot 10^4$  individu/liter. Namun demikian, penurunan beban nutrisi eksternal yaitu beban total nitrogen dan total fosfor diturunkan hingga 60%, sehingga kadar fitoplankton pada kisaran  $(1-3) \cdot 10^4$  individu/liter, seperti diperlihatkan Gambar 15.

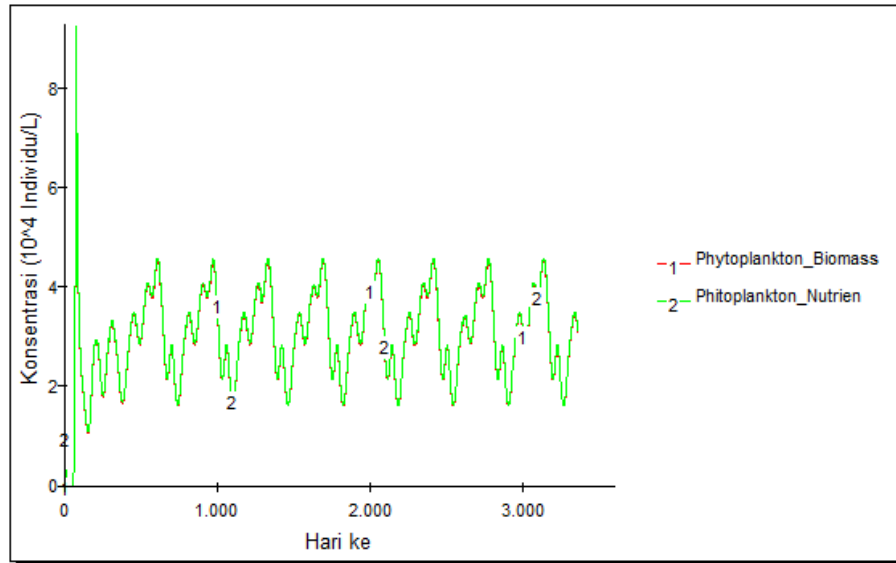


(a)

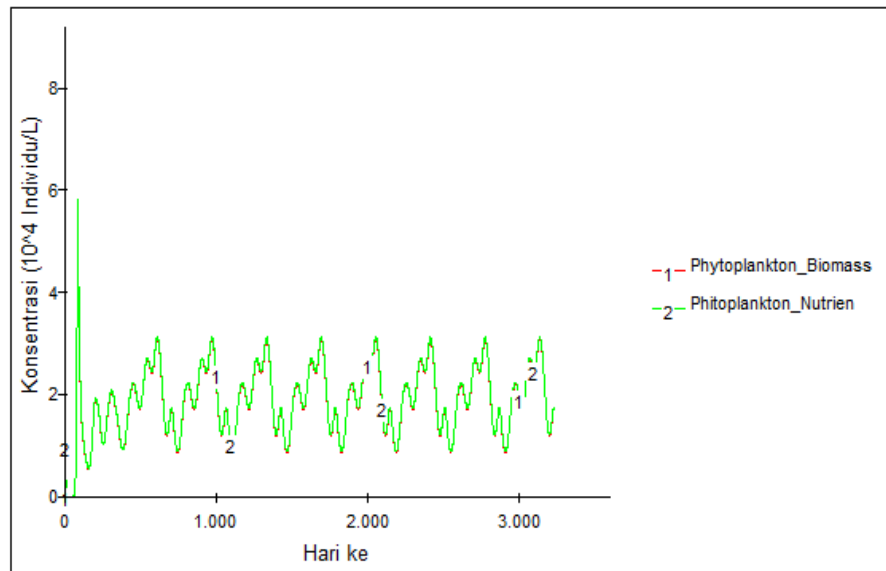


(b)

**Gambar 14** Simulasi eutrofikasi jangka panjang Waduk Jatiluhur: (a) tanpa kebijakan; (b) perbaikan internal waduk 50%.



(a)

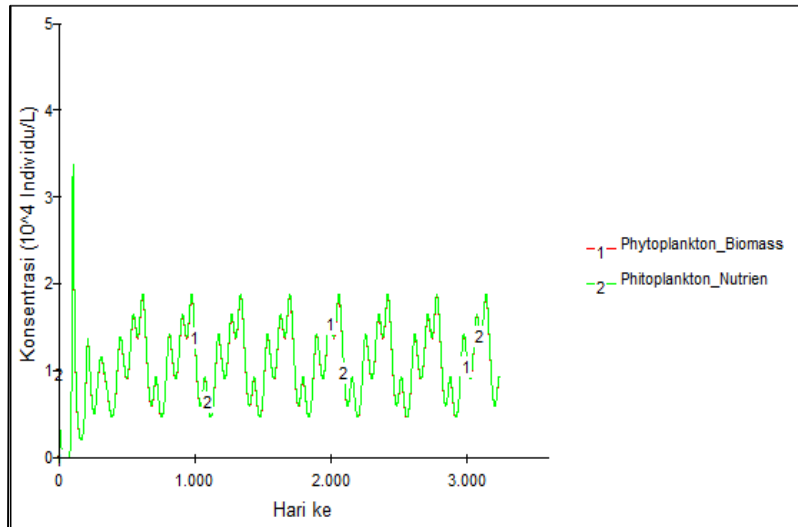


(b)

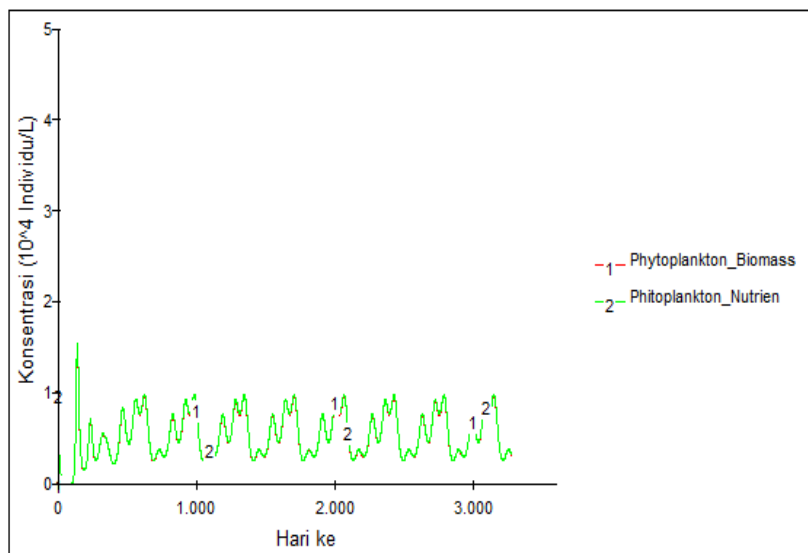
**Gambar 15** Simulasi eutrofikasi jangka panjang Waduk Jatiluhur: (a) Perbaikan internal waduk 50% dan reduksi beban eksternal P 20%; (b) Perbaikan internal waduk 50% dan pengurangan Total N dan Total P 60%

Hasil simulasi menggunakan pemodelan dinamik berorientasi obyek dengan dibantu piranti lunak Powersim yang diperlihatkan Gambar 16, menunjukkan bahwa secara konseptual pengendalian dan pemulihan eutrofikasi pada waduk harus dilakukan secara terintegrasi melalui kombinasi penurunan beban nutrisi eksternal sampai 90% dengan pengkondisian lingkungan

internal waduk, sehingga potensi tumbuhnya fitoplankton dapat dikurangi hampir 50%. Gambar 15 juga menunjukkan bahwa penurunan beban eksternal mencapai 90% dan beban internal 50% akan lebih mengamankan Waduk Jatiluhur dari masalah eutrofikasi kadar biomassa fitoplankton hanya dalam kisaran  $(0,3-1) \cdot 10^4$  individu/l.



(a)



(b)

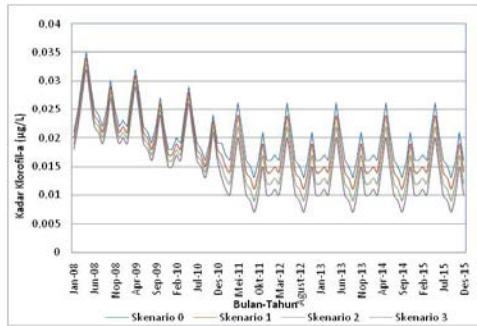
**Gambar 16** Simulasi eutrofikasi jangka panjang Waduk Jatiluhur: (a) Perbaikan internal waduk 50% dan Pengurangan TN dan TP 80%; (b) Perbaikan internal waduk 50% dan pengurangan Total N dan Total P 90%

#### 4 Simulasi Dinamik Jangka Panjang dengan WASP

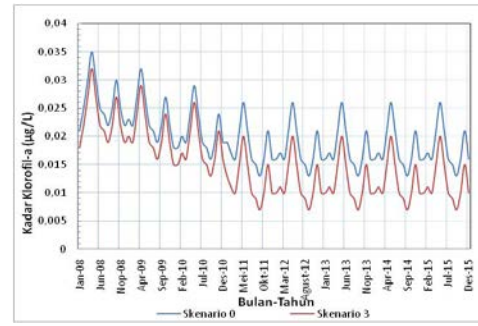
Simulasi menggunakan piranti lunak WASP (*Water quality Analysis Program*) dilakukan dengan menggunakan berbagai skenario sebagai berikut: a) skenario 0, yaitu tidak ada kebijakan apa pun; b) skenario 1, yaitu beban nutrisi input diturunkan 50%, namun beban pakan tidak diturunkan; c) Skenario 2, yaitu beban nutrisi input diturunkan 50%, adapun beban pakan diturunkan 50%; d) Skenario 3, beban nutrisi input diturunkan 50%, sedangkan beban pakan ikan dikurangi 90%.

Gambar 17 memberikan gambaran bahwa hasil simulasi dengan berbagai skenario kebijakan, namun menghasilkan pola dan hasil simulasi yang hampir sama. Gambar 17 juga menunjukkan bahwa upaya penurunan beban nutrisi input 50% dan reduksi beban pakan ikan sampai 90% menghasilkan kadar klorofil dalam kisaran 0,008 sampai 0,02  $\mu\text{g/L}$ , dan selanjutnya memerlukan waktu agar indikator klorofil-a stabil berada di bawah 0,02  $\mu\text{g/L}$ .





(a)



(b)

**Gambar 17** Hasil uji-coba dinamika indikator klorofil-a dengan WASP dengan skenario 0 (tanpa kebijakan) dan skenario 3 (beban input dikurangi 50% dan beban pakan 90%)

## KESIMPULAN

Hasil uji coba pemodelan dinamik berorientasi obyek dengan dibantu piranti lunak Powersim menunjukkan bahwa secara konseptual pengendalian dan pemulihan eutrofikasi pada waduk, seharusnya dilakukan secara terintegrasi melalui kombinasi penurunan beban nutrisi eksternal sampai 90% dan dengan pengelolaan lingkungan internal waduk, sehingga potensi tumbuhnya fitoplankton dapat dikurangi hampir 50% dari jumlah yang terjadi sekarang. Dengan langkah pengendalian terintegrasi tersebut, maka kadar fitoplankton pada Waduk Jatiluhur dapat ditekan hingga dibawah  $1 \times 10^4$  individu/Liter

Hasil uji-coba model dinamik dengan piranti lunak WASP memberikan gambaran bahwa dalam jangka panjang Waduk Jatiluhur yang telah mengalami eutrofikasi dapat dipulihkan melalui penurunan beban nutrisi input minimal 50% dan penurunan beban pakan ikan sampai 90% dari kondisi yang ada sekarang ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balcerzak, W. 2006. The Protection of Reservoir Water Against the Eutrophication Process, Institute of Water Supply and Environmental Protection, Kraków University of Technology, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland, *Polish J. of Environ. Stud.* 15(6),pp: 837-844.
- Badruddin, M. 2010. Model Perhitungan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau Dan Waduk. *Jurnal Sumber Daya Air. Vol. 6 No. 2, November 2010.* Pusat Litbang Sumber Daya Air, Bandung.
- Brahmana. S, Suyatna. U., Fanshury, R dan Bahri. S., 2002. Pencemaran Air dan Eutrofikasi Waduk Karangates dan Upaya Penanggulangannya. *Jurnal Litbang Pengairan*, 12(49), Bandung.
- Cahyo, Hendro. 2010. Biolimnologi dan Komunitas Ikan pada Waduk Cascade Citarum. Dipresentasikan pada *Round Table Discussion on Cascade Citarum Reservoir 4* Februari 2010, Puslit Limnologi, Bogor.
- Carpenter, Stephen. 2005. Eutrophication of Aquatic ecosystems: Bistability and Soil Phosphorus. Center for Limnology, This contribution is part of the special series of Inaugural Articles by members of the National Academy of Sciences May 12, 2005.
- Chunmeng, Jiao. 2007. *Successful recovery from eutrophication and a recent problem of a benthic minimum oxygen layer in Lake Biwa, Japan*, Lake Biwa Environmental Research Institute, 5-34 Yanagasaki, Otsu, Shiga, Japan 520-0022.
- Cooke D, Welch E., Peterson S., Nichols S., 2005. Decision tree for choosing the best procedures in Controlling the algae problems. Restoration and management of lakes and reservoirs, Taylor&Francis Group.
- Gurung, R. P. 2007. *Modelling of Eutrophication in Roxo Reservoir, Alentejo, Portugal -, A System Dynamic Based Approach*, March, 2007, Thesis, Master of Science (Msc), March 2007, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- High Performance Sistem. 2000, Stella User Guide and Reference Manual, www.hps-inc.com, diunduh Januari 2010.
- Huang, G. H dan N. B. Chang. 2003. Prespectives of Environmnetal System Analysis, *Journal of Environmnetal Informatics*, 1, 2003.
- Kemp, W. M. 2009. Dead Zone and Eutrophication: Case Study of Cheese Peak Bay. *Presented in COSEE Trends*, University of Mariland. Cambridge.

- Kiirikki, M., Inkala, A., Kuosa, H., Pitkänen, H., Kuusisto, M. and Sarkkula, J. 2001. Evaluating The Effects of Nutrient Load Reductions On The Biomass of Toxic Nitrogen Fixing Cyanobacteria In The Gulf Of Finland, Baltic Sea. *Boreal Environmental Research*. 6: Helsinki, Finland, ISSN 1239-6095.
- Lee, G. F., and Jones-Lee, A. 2007. Role of Aquatic Plant Nutrients in Causing Sediment Oxygen Demand Part II – Sediment Oxygen Demand, Report of G. Fred Lee & Associates, El Macero, CA, June (2007).
- Martin, Laurent dan Emma Gouze,. 2010. 3D flow and water quality (eutrophication) Berre Lagoon – TELEMAC - Delft3D WAQ. , Jean-Michel Hervouet Laboratoire National 'Hydraulique et Environnement; EDF Electricité de France – Research & Development; International Delft3D Users Meeting 2010; Delft – The Netherlands – 11 & 12 October 2010.
- Melendez, W., M. Settles, J. J. Pauer, and K. R. Rygwelski. 2009. A High-Resolution Lake Michigan Mass Balance Water Quality Model. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Mid-Continent Ecology Division, Large Lakes Research Station, Grosse Ile, Michigan. EPA/600/R-09/020, 329 pp.
- Muhammadi, E. Aminullah, B Soesilo. 2001. *Analisis Sistem Dinamis Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen*. UMJ Press, Jakarta.
- Nirmalakhandan, N. 2002. *Modelling Tools for Environmental Engineers and Scientist*, CRC Press, Boca raton, USA.
- Pauer, J. J., A. Anstead, W. Melendez, R. Rossmann, K.W. Taunt, and R.G. Kreis. 2008. The Lake Michigan eutrophication model, LM3-Eutro: Model development and calibration. *Water Environ. Res.* 80:853-861.
- Pauer, J.J., K. Taunt, W. Melendez, R.G. Kreis, and A. Anstead. 2007. Resurrection of the Lake Michigan eutrophication model, MICH1. *J. Great Lakes Res.* 33:554-563.
- Scheffer, M dan Carpenter, S. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*. 18 (12). Elsevier. England.
- Siergiev, Dmytro. 2009. Simulation of Nitrogen Transformation in The Mine Water Recipient at Boliden, Sweden, Using System Dynamics Modelling. *MSc Thesis, Lulea University of Technology, Sweden*
- Siregar dan Mayasari. 2010. Pengelolaan Dan Pemanfaatan Waduk Ir. H. Djuanda Untuk Perikanan Budidaya KJA. Dipresentasikan pada *Round table discussion on Cascade Citarum Reservoir* 4 februari 2010, Puslit Limnologi, Bogor.
- Soetaert, K dan Middelburg, J., 2009. Modeling eutrophication and oligotrophication of shallow-water marine systems: the importance of sediments under stratified and well-mixed conditions Published online: 21 April 2009. Springerlink.com
- Tasrif, Muhammad. 2001. Model System Dynamics untuk Sarana Analisis dalam Merancang Kebijakan Energi yang Berwawasan Lingkungan di Negara Sedang Berkembang. Disertasi ITB. Tidak Dipublikasikan.
- Van Niekerk. 2004. South African Monitoring Programme Design, "Unep Global Environmental Monitoring System/Water Programme", Department Of Water Affairs And Forestry, Pretoria-South Africa.
- Warren, G. J. and R. G. Kreis, Jr. 2005. Recent and Long-Term Nutrient Trends in Lake Michigan. In: T. Edsall and M. Munawar (Eds.), *State of Lake Michigan: Ecology, Health and Management*, pp. 141-155. Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Wawan G. 2007. Model Eutrofikasi untuk Merancang Kebijakan Pengelolaan Waduk yang Berkelanjutan melalui Pendekatan System Dynamics (The System Dynamics Approach of Eutrofication Model of the policy design on Reservoir Sustainability Management). Disertasi Doktor UNPAD.
- Wool T. A., Ambrose R. B., Martin J. L., Comer. E. A. 2001. *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) – version 6.0, Draft: User's Manual*, US Environmental Protection Agency, Atlanta G.A.