

Kajian Hubungan Antara Fitoplankton dengan Kecepatan Arus Air Akibat Operasi Waduk Jatiluhur

Eko Harsono

Pusat Penelitian Limnologi LIPI Jl. Raya Cibinong Km 47 Cibinong Bogor

ABSTRACT

Study on The Relationship Between Phytoplankton and Current Velocities due to Operation of Jatiluhur Reservoir. High abundance of phytoplankton may create oxygen depletion within water column, in which may also lead as a threat to the fisheries activities of floating cage in the Jatiluhur reservoir. In addition, phytoplankton may also clog the filter within water treatment plant that is currently using the water from Jatiluhur reservoir. The research objective was investigate effects of changing water current velocity to the abundance of phytoplankton in the Jatiluhur reservoir. Phytoplankton, measured as chlorophyll-a, were sampled at 10 different sampling points of 0, 4, 8 and 10 m depth. While current water velocities were calculated using two-dimensional multilayer equation. The equation will calculate x and y axis current velocities within different depth of the reservoir. Result shows that in the area in which the current velocities higher than 15 cm/s less phytoplankton would be found. These velocities found if the operation of water discharge from reservoir was more than 70 m³/s. The research suggests that discharging operation from reservoir can be used as an indicator for the early warning system for the fisheries activities in the reservoir.

Keywords: Jatiluhur reservoir, current velocity, phytoplankton abundance, reservoir operation, two-dimensional multilayer equation

PENDAHULUAN

Waduk H.Ir. Juanda Jatiluhur (selanjutnya disebut waduk Jatiluhur) pada elevasi muka air 107 m (mean sea level, msl) mempunyai luas permukaan dan volume air 8132,51 m² dan 2447840800 m³ (Puslitbang Teknologi Sumber Daya Air 2000). Waduk ini digunakan untuk kebutuhan irigasi terhadap 24.000 Ha sawah, sumber tenaga pembangkit listrik 150 M.W, serta budidaya ikan dengan karamba jaring apung yang saat ini telah mencapai 17.000 petak (1 petak = 7 m x 7m).

Kualitas air waduk Jatiluhur yang sesuai dengan kriteria sumber baku air bersih (Sri Hernowo 2001), saat ini juga telah direncanakan untuk pemasok air bersih DKI Jakarta (GHP 2010). Dalam rencana itu, air baku diambil dari waduk Jatiluhur dan diolah dengan sistem pengilang air bersih (*water treatment plan*, WTP) yang dibangun di dekat waduk tersebut. Air bersih yang telah diolah tersebut, akan dialirkan ke DKI Jakarta dengan pipa sepanjang 70 km.

Perairan waduk Jatiluhur yang tergolong hiperautotrof, komposisi fitoplankton didominasi *Mycrosytis*.sp.

yang berbau anyir dan berlendir (Garno 2002). Perairan yang demikian, apabila digunakan sebagai sumber baku air bersih akan menyebabkan terjadinya penyumbatan oleh fitoplankton pada satuan operasi penyaring (filter) dalam sistem WTP (Bourke 2006). Kejadian kelimpahan fitoplankton yang demikian terjadi juga di waduk Cirata yang menyebabkan terjadinya deplesi oksigen terlarut pada malam hari dan defisit oksigen pada dini hari (Eko Harsono 2006). Apabila kondisi tersebut terjadi di Waduk Jatiluhur dan dibiarkan terjadi terus menerus, maka biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) WTP yang terbangun nantinya dapat meningkat, di samping itu ancaman kematian massal ikan budidaya di dalam waduk tersebut juga akan meningkat.

Fitoplankton yang merupakan organisme-tumbuhan mikroskopis, mampu berfotosintesis dan tidak punya daya gerak serta tumbuh dengan cara membelah diri menjadi dua (Davis 1951). Organisme yang pada umumnya mempunyai kepadatan (*densities*) antara 1 g/l sampai dengan 1,2 g/l dan berukuran antara 2 μm sampai dengan 20 μm ini, memiliki bentuk morfologi yang teradaptasi untuk mudah melayang di dalam air. Dengan kondisi demikian itu, organisme ini peka terhadap pergerakan air terutama arus air.

Arus merupakan pergerakan air yang dibangkitkan oleh kerja dari suatu gaya di badan air (Olson 1990). Terdapat bermacam-macam gaya yang dapat membangkitkan arus di suatu badan air, di antaranya adalah gaya dorong dan hisap dari massa air masuk dan keluar badan air serta gaya gesek dari dinding

wadah badan air yang dapat memperlambat arus air tersebut. Melalui arus ini, fitoplankton ditransportasikan dari satu tempat ke tempat lain, yaitu dengan cara dispersi dan adveksi (Tsnis 2007). Mekanisme yang demikian, di perairan dapat menyebabkan terjadinya akumulasi fitoplankton karena masukan dan pertumbuhannya, sedangkan di area lainnya dapat terjadi pengurangan fitoplankton karena keluaran dan atau fitoplankton tidak sempat tumbuh. Hal ini dibuktikan dalam penelitian yang dilakukan di waduk Asahi Jepang (Kawara 2002) yang melaporkan bahwa, konsentrasi fitoplankton yang tinggi terjadi di area dengan kecepatan arus air kurang dari 10 cm/det, sedangkan konsentrasi fitoplankton semakin menurun terjadi di area-area dengan kecepatan arus air lebih dari 25 cm/det.

Morfologi waduk Jatiluhur disusun oleh genangan sungai Citarum. Masukan air Waduk Jatiluhur yang berasal dari keluaran Waduk Cirata terletak di bagian hulu waduk. Air Waduk Jatiluhur keluar melalui pintu air dan pipa yang terletak di bendung (dam) waduk tersebut. Melalui masukan dan keluaran air ini waduk dioperasikan sesuai dengan penggunaannya, sehingga elevasi muka air waduk tersebut berubah-ubah. Berdasarkan pencatatan operasi waduk yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta Jatiluhur dari tahun 2006 sampai dengan tahun 2007, debit aliran air masuk bervariasi dari 11 m³/dt sampai dengan 450,15 m³/det. Debit aliran keluar bervariasi dari 57 m³/det sampai dengan 226,66 m³/det, sedangkan elevasi muka air waduk bervariasi dari 92,9 m sampai

dengan 105,6 m. Kondisi operasi demikian dapat menyebabkan perubahan kecepatan, pola arus air dan berdampak merubah distribusi spasial fitoplankton di perairan waduk tersebut.

Dinamika fitoplankton dipelajari dalam penelitian ini melalui kajian hubungan antara fitoplankton dengan kecepatan arus akibat operasi waduk Jatiluhur. Selanjutnya, informasi mengenai perubahan fitoplankton tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan pengelolaan air waduk Jatiluhur untuk sumber baku air bersih dan budi daya ikan karamba jaring apung.

BAHAN DAN CARA KERJA

Arus Air Pada Kondisi Operasi Waduk

Pola arus air waduk Jatiluhur dapat diperoleh dengan melakukan perhitungan vektor (kecepatan dan arah) arus air. Perhitungan vektor arus dilakukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas dan momentum 2-dimensi lapis ganda (quasi 3-dimensi). Persamaan tersebut diperoleh dari penurunan yang berdasarkan pada teori kekekalan massa dan momentum (Kolditz 2002), dimana hasil penurunan tersebut adalah sebagai berikut.

Persamaan kontinuitas :

$$\text{Lapisan permukaan, } \frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \{u_1(h_1 + \zeta)\} - \frac{\partial}{\partial y} \{v_1(h_1 + \zeta)\} + w_{3/2} + R_i - R_o$$

$$\text{Lapisan antara, } \frac{\partial}{\partial x} (u_k h_k) + \frac{\partial}{\partial y} (v_k h_k) + w_{k-1/2} - w_{k+1/2} = 0$$

$$\text{Lapisan dasar, } \frac{\partial}{\partial x} (u_k h_k) + \frac{\partial}{\partial y} (v_k h_k) + w_{k-1/2} = 0$$

Persamaan momentum :

Lapisan permukaan dengan arah x:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + w_{3/2} \frac{(u_{3/2} - u_1)}{h_1 + \zeta} + f v_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_i^2 (u_1 - u_2) \left\{ (u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 \right\}^{0,5}}{h_1 + \zeta}$$

Lapisan permukaan dengan arah y:

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = -u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} - v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + w_{3/2} \frac{(v_{3/2} - v_1)}{h_1 + \zeta} + f u_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} + u \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_i^2 (v_1 - v_2) \left\{ (u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 \right\}^{0,5}}{h_1 + \zeta}$$

Lapisan antara dengan arah x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} = & -u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} - w_{k-1/2} \frac{(u_{k-1/2} - u_k)}{h_k} + w_{k+1/2} \frac{(u_{k+1/2} - u_k)}{h_k} \\ & + f v_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} + \frac{\gamma_i^2 (u_{k-1} - u_k) \left\{ (u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k) \right\}^{0,5}}{h_k} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (u_k - u_{k+1}) \left\{ (u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1}) \right\}^{0,5}}{h_k} \end{aligned}$$

Lapisan antara dengan arah y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} = & -u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} - w_{k-1/2} \frac{(v_{k-1/2} - v_k)}{h_k} \\ & + w_{k+1/2} \frac{(v_{k+1/2} - v_k)}{h_k} + f u_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (v_{k-1} - v_k) \left\{ (u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k) \right\}^{0,5}}{h_k} \\ & - \frac{\gamma_i^2 (v_k - v_{k+1}) \left\{ (u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1}) \right\}^{0,5}}{h_k} \end{aligned}$$

Lapisan dasar dengan arah x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} = & -u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} - w_{k-1/2} \frac{(u_{k-1/2} - u_k)}{h_k} + f v_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (u_{k-1} - u_k) \left\{ (u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k) \right\}^{0,5}}{h_k} - \frac{\gamma_b^2 u_k (u_k^2 + v_k^2)^{0,5}}{h_k} \end{aligned}$$

Lapisan dasar dengan arah y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} = & -u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} - w_{k-1/2} \frac{(v_{k-1/2} - v_k)}{h_k} + f u_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (v_{k-1} - v_k) \left\{ (u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k) \right\}^{0,5}}{h_k} - \frac{\gamma_b^2 v_k (u_k^2 + v_k^2)^{0,5}}{h_k} \end{aligned}$$

Keterangan:

u_1 = kecepatan arus air dengan arah x pada lapisan permukaan (m/det)

v_1 = kecepatan arus air dengan arah y pada lapisan permukaan (m/det)

ζ = tinggi permukaan air dari tinggi muka air rata-rata (m)

h_1 = tinggi (tebal) lapisan permukaan (m)

$w_{3/2}$ = kecepatan arus air waduk dalam arah vertikal (z) pada lapisan permukaan dikurangi setengah tinggi lapisan kedua (m/det)

R_1 = laju kenaikan permukaan karena masukan air (m/det)

R_0 = laju penurunan permukaan karena pengeluaran air (m/det)

u_k = kecepatan arus air waduk dengan arah x pada lapisan ke k (m/det)

v_k = kecepatan arus air waduk dengan arah y pada lapisan ke k (m/det)

h_k = tinggi lapisan ke k (m)

$w_{k+1/2}$ = kecepatan arus vertikal pada lapisan $k + \frac{1}{2}$ (m/det)

$w_{k-1/2}$ = kecepatan aurs vertikal pada lapisan $k - \frac{1}{2}$ (m/det)

f = faktor Coriolis (1/det)

g = percepatan gaya gravitasi (m/det²)

ρ_1 = kerapatan air lapisan permukaan (kg/m³)

h_1 = tinggi lapisan ke 1 (m)

Y_i = koefisien gesekan pada antar lapisan

$$\rho_k = g\rho_1\zeta + \sum_{i=1}^{k-1} g\rho_i h_i + 0,5g\rho_k h_k$$

$$\rho_1 = g\rho_1\zeta + 0,5g\rho_1 h_1$$

$$\rho_k = g\rho_1 + \sum_{i=1}^{k-1} g\rho_1 h_i + 0,5g\rho_k h_k$$

Koreksi kerapatan air terhadap perubahan suhu air di tiap lapisan didekati dengan deret pangkat polinomial sebagai berikut:

$$\rho_k = a_0 + a_1(T_k - 273) + a_2(T_k - 273)^2 + a_3(T_k - 273)^3 + a_4(T_k - 273)^4 + a_5(T_k - 273)^5$$

T (suhu air) dalam penelitian ini diperoleh dengan persamaan yang diturunkan dari neraca panas (*heat balance*) pada volume terkontrol yang hasilnya sebagai berikut:

Lapisan permukaan

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h_1 + \zeta)T_1}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_{x1}T_1) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{y1}T_1) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_{x1}(h_1 + \zeta)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_{y1}(h_1 + \zeta)\frac{\partial T_1}{\partial y}\right] \text{La} \\ & - K_z(T_1 - T_2) + w_{3/2}T^* + \frac{1}{\rho_w c_p}\left(q_o - q_{3/2}\right) - \frac{1}{\rho_1 c_p}(q_e + q_c + q_r) + R_{in}T_{in} \end{aligned}$$

Lapisan antara :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_k h_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_{xk}T_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{yk}T_k) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_{xk}h_k\frac{\partial T_k}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_{yk}h_k\frac{\partial T_k}{\partial y}\right] \\ & - K_z(T_{k-1} - T_k) - K_z(T_k - T_{k+1}) - w_{k-1/2}T^* + w_{k-1/2}T^* + \frac{1}{\rho_k c_p}\left(q_{k-1/2} - q_{k+1/2}\right) \end{aligned}$$

Lapisan dasar :

$$\frac{\partial T_k h_k}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{xk} T_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{yk} T_k) + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right] - K_z (T_{k-1} - T_k) - w_{k-1/2} T^* + \frac{1}{\rho_k c_p} \left(q_{k-1/2} - q_{k+1/2} \right)$$

Keterangan:

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 = konstanta

T = suhu air (°K)

T_k = suhu air pada lapisan ke k (°K)

M_{xk}, M_{yk} = Kecepatan aliran air vertikal-terintegrasi pada arah x dan arah y (m²/det)

K_x, K_y = difusitas panas eddy pada arah x dan arah y (m²/det)

K_z = koefisien pengadukan panas (m/det)

q_0 = kuantitas insolisasi pada permukaan air (J/m²/det)

$q_{k+1/2}$ = kuantitas insolisasi pada antar-muk air (J/m²/det)

q_c = kehilangan panas di lapisan permukaan karena evaporasi (J/m²/det)

q_{lc} = kehilangan panas di lapisan permukaan karena konduksisasi thermal (J/m²/det)

q_r = kehilangan panas di lapisan permukaan karena radiasi efektif (J/m²/det)

R_{in} = laju kenaikan permukaan air karena hujan dan masukan air (m/det)

T_{in} = suhu aliran air masukan (°K)

C_p = panas spesifik dari air (J/kg/°K)

Untuk menyelesaikan persamaan 2 dimensi lapis ganda tersebut, dalam penelitian ini dilakukan dengan metode numerik beda hingga (*finite difference*) skema eksplisit pada kondisi pembatas terbuka (*open boundary condition*). Sedangkan perhitungannya dilakukan melalui komputer dengan menggunakan program dalam bahasa Fortran (Compaq Visual Fortran 6).

Kondisi pembatas dari skema numerik yang telah dipilih dalam penelitian ini terdiri debit aliran air masuk (Q_i), debit aliran air keluar (Q_o) waduk, dan segmen-segmen bentuk morfologi waduk. Debit aliran masukan (Q_i) dan keluaran (Q_o) waduk Jatiluhur dalam penelitian ini menggunakan data sekunder. Data Q_i dan Q_o yang merupakan hasil dari pencatatan operasi waduk, diperoleh dari Perum .Jasa Tirta Jatiluhur.

Segmentasi bentuk morfologi waduk Jatiluhur dilakukan dengan metode *grid* peta batimetri yang menggunakan perangkat lunak ArcView 3.1. Peta batimetri tersebut diperoleh dari Puslibang Teknologi Sumber Air Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2000) (Gambar 1). Selanjutnya, dimensi segmen (panjang dan lebar) dalam segmentasi ini diperoleh melalui optimasi, yaitu waktu hitung “ t (*time step*)” sebesar-besarnya dengan “ x (panjang dan lebar segmen) sekecil-kecilnya dan tidak terjadi kesalahan numerikal dalam *running* program komputer. “ x tersebut didekati dengan persamaan berikut.

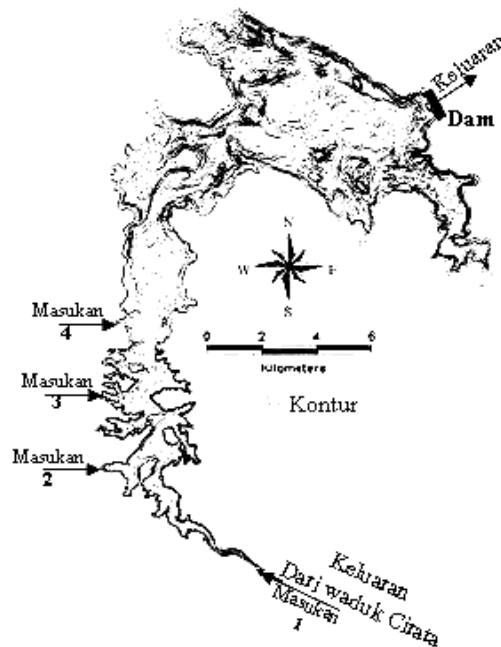
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{maks}}}$$

Keterangan:

“ t = dalam detik

“ x = dalam m

h_{maks} = kedalaman waduk maksimum (m)



Gambar 1. Batimetri waduk Jatiluhur

Berdasarkan hasil segmentasi tersebut, diperoleh koordinat Cartesien dan kedalaman maksimum dari segmen. Berdasarkan kedalaman maksimum tersebut, dapat ditentukan lapisan kedalaman air.

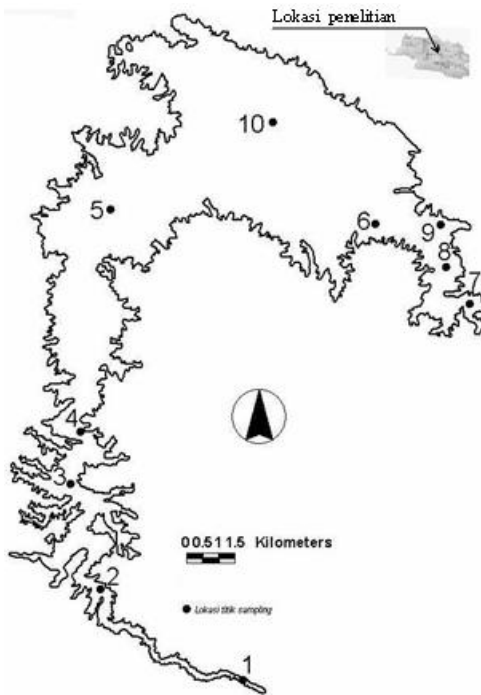
Penentuan vektor arus air pada kondisi operasi waduk Jatiluhur dilakukan pada kondisi pembatas (*boundary condition*) tiga elevasi muka air akibat operasi yang berbeda. Tiga elevasi tersebut didekati dengan elevasi muka air minimum, rerata, dan maksimum dari data pencatatan operasi waduk tahun sebelumnya (tahun 2006 s/2007).

Fitoplankton pada Kondisi Operasi Waduk

Kuantitas fitoplankton air waduk Jatiluhur diukur dengan konsentrasi

klorofil-a yang dilakukan melalui pengambilan contoh air di titik-titik yang telah ditentukan. Penentuan titik pengambilan contoh air dalam penelitian ini disesuaikan dengan lokasi titik pemantauan kualitas air yang telah dilakukan oleh Perum Jasa Tirta Jatiluhur (Gambar 2)

Untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi fitoplankton pada kondisi operasi waduk, pengambilan contoh air dilakukan sebanyak tiga kali, yaitu pada elevasi muka air minimum, rata-rata dan maksimum seperti yang telah diterangkan sebelumnya. Pengambilan contoh air pada titik titik yang telah ditentukan tersebut dilakukan di permukaan (0 m) serta kedalam 4 m, 8 m, dan 20 m dengan menggunakan



Gambar 2. Lokasi titik pengambilan sampel

Kamerer *water sampler* dari Wildco volume 3 liter.

Contoh air yang telah diambil diawetkan dengan $MgCO_3$, kemudian diambil satu liter untuk disaring dengan kertas saring Whatmann GF/F. Subtrat tersaring disimpan di dalam aluminium foil untuk menghindari paparan cahaya, kemudian dibawa ke laboratorium untuk dilakukan analisis kandungan klorofil-a

Hubungan antara Fitoplankton dengan Kecepatan Arus Air.

Hubungan antara fitoplankton dengan kecepatan arus air pada koordinat Cartesien yang sama diperagakan melalui persamaan kecenderungan dengan koefisien determinasi terbesar. Hubungan tersebut diperoleh dengan

cara coba-salah (*trial and error*) menggunakan Microsoft excel 2003. Berdasarkan hubungan tersebut, dilakukan kajian hingga dapat diketahui hubungan antara pola operasi terhadap perubahan fitoplankton yang terjadi di perairan waduk Jatiluhur.

HASIL

Elevasi Muka Air pada Waktu Survei

Hasil pencatatan kondisi hidrologi harian akibat operasi waduk Jatiluhur yang dilakukan oleh Perum. Jasa Tirta dari tahun 2006 sampai dengan tahun 2007 disajikan pada Gambar 3. Berikutnya, hasil pembacaan elevasi muka air dari *Peilschal* dam waduk

Jatiluhur pada saat survei lapang dilakukan disajikan dalam Tabel 1

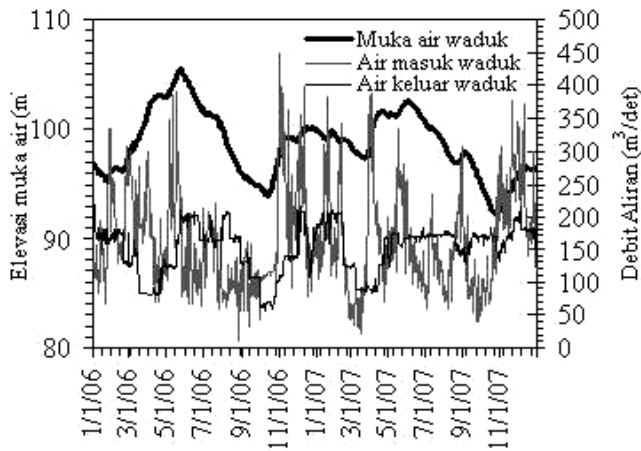
Berdasarkan hasil pencatatan operasi waduk tersebut (Gambar 3) diperoleh elevasi muka air minimum 92,3 m (rerata 98,72 m), dan elevasi muka air maksimum 105 m. Sementara itu Tabel 1 dapat dilihat, hasil pembacaan elevasi muka air dari *Peilschal* dam Jatiluhur pada saat survei lapang dilakukan. Survei ke 1 yang dilakukan pada elevasi muka air 95 m, mendekati elevasi muka air minimum. Survei ke 2 yang dilakukan pada elevasi muka air 98 m, mendekati elevasi muka air rerata. Sedang survei ke 3 yang dilakukan pada elevasi muka

air 102 m mendekati elevasi muka air maksimum.

Vektor Arus Air Waduk Jatiluhur

Kondisi pembatas (*baunday condition*) setiap elevasi muka air yang digunakan untuk perhitungan arus telah diperoleh, yaitu hasil segmentasi dalam Gambar 4 serta debit aliran air masuk dan keluar waduk dalam Tabel 2.

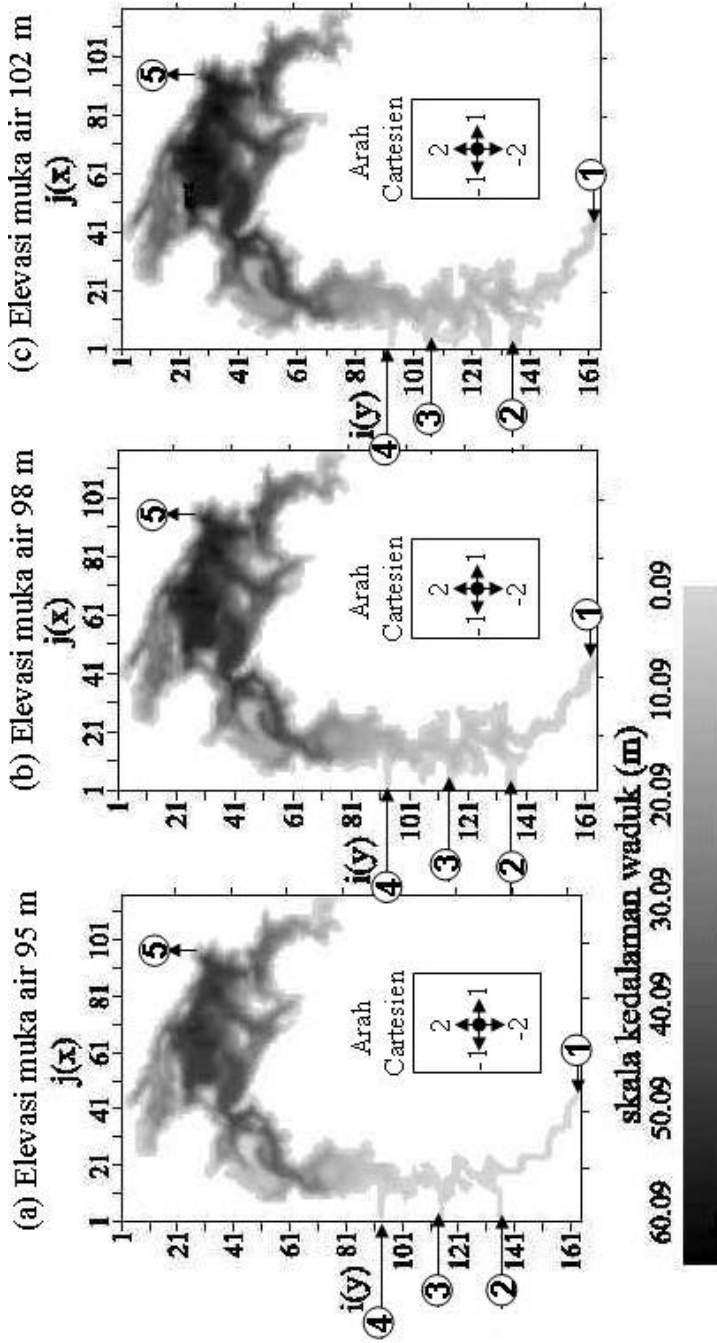
Berdasarkan Gambar 5(a) dapat dilihat, bahwa peningkatan elevasi muka air diikuti oleh peningkatan luas dan volume air waduk. Namun apabila diperhatikan Gambar 5(b), peningkatan elevasi muka air diikuti oleh penurunan



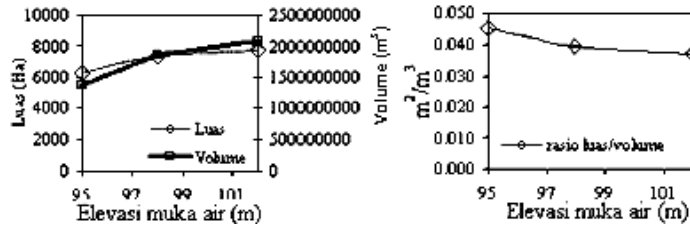
Gambar 3. Kondisi hidrologi waduk Jatiluhur dari tahun 2006 sampai dengan tahun 2007

Tabel 1. Hasil pembacaan elevasi muka air pada saat pengambilan contoh air

Survey ke	Elevasi muka air (m)
1	95
2	98
3	102



Gambar 4: Hasil segmentasi waduk Jatiluhur



Gambar 5. Perubahan elevasi muka air terhadap perubahan luas dan volume waduk

rasio luas-volume air waduk. Ini menunjukkan, bahwa peningkatan volume waduk karena peningkatan elevasi muka air tidak diikuti oleh peningkatan (perubahan) luas permukaan waduk secara berarti. Pada kondisi yang demikian itu, berarti bentuk morfologi waduk tidak berubah secara nyata dengan perubahan elevasi muka air waduk.

Tabel 2 menunjukkan adanya perubahan Q_i (1) dan Q_o (5) di setiap elevasi muka air. Pada elevasi muka air 95 m dan 102 m, Q_i lebih tinggi daripada Q_o , ini berarti sedang terjadi pengisian air waduk, dan tinggi muka air sedang dalam proses peningkatan. Sebaliknya pada elevasi muka air 98 m, Q_i lebih rendah dari pada Q_o , ini berarti waduk sedang dalam proses pengurangan air dan tinggi muka airnya dalam proses penurunan.

Sementara itu dari hasil segmentasi juga telah diperoleh kedalaman air maksimum waduk Jatiluhur, yaitu di koordinat (i,j) (27,69). Berdasarkan kedalaman maksimum dilakukan pembagian lapisan (layer), hasil pembagian lapisan tersebut dapat dilihat dalam Tabel 3.

Berdasarkan kondisi pembatas (Gambar 4, Tabel 2 dan Tabel 3) dan

waktu hitung (*time step*, Δt) sebesar 3,6 detik, telah diperoleh vektor arus air waduk. Distribusi vektor yang menggambarkan pola arah arus waduk tersebut disajikan dalam Gambar 6. Sedangkan distribusi besarnya kecepatan arus air di waduk disajikan dalam Gambar 7.

Seperti telah diuraikan sebelumnya waduk Jatiluhur dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu hulu, tengah dan hilir. Berdasarkan koordinat (i,j) dari Gambar 6, hulu di (100 s/d 165, 1 s/d 117), tengah (60 s/d 100, 1 s/d 117), dan hilir di (1 s/d 60, 1 s/d 117). Dengan demikian dapat dilihat bagian hulu, tengah dan hilir di setiap kedalaman waduk pada elevasi muka air 95 m, 98 m dan 102 m pola arah arus airnya cenderung mirip. Bagian hulu, kecenderungan pola arah arusnya masih dipengaruhi oleh arah masukan aliran air ke dalam waduk. Bagian tengah yang merupakan pertemuan antara arus dari hulu dan hilir, pola arah arusnya cenderung mengarah ke -j(x) atau -1. Sedangkan pola arah arus air di bagian hulu cenderung menuju ke titik keluaran aliran waduk, sehingga di sekitar koordinat (i,j) (50,70) telah terjadi pusaran arus air.

Gambar 7 dapat dilihat penyebaran kecepatan arus air waduk Jatiluhur.

Tabel 2. Debit aliran masukan dan keluaran di waduk Jatiluhur

No Titik	Koordinat		Arah	Lapis ke	Elevasi M.A 95 m		Elevasi M.A 98 m		Elevasi M.A 102 m	
	i (y)	j (x)			Debit m ³ /det	Suhu °C	Debit m ³ /det	Suhu °C	Debit m ³ /det	Suhu °C
1	163	46	-1	1	110	26,2	90	26,3	240	26,1
2	136	2	1	1	0,21	25,8	0,37	26,4	0,41	25,8
3	115	2	1	1	0,28	25,6	0,39	26,2	0,51	26,2
4	94	2	1	1	0,32	26,3	170	25,9	0,71	26,2
5	27	95	-2	1	70				165	

Tabel 3. Hasil pelapisan di waduk Jatiluhur

Elevasi Muka Air (m)	Kedalaman maksimm (m)	I (j)	J (x)	Tebal lapisan (m) ke											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
102	67,40	27	69	1	1	2	2	2	2	5	5	10	10	10	17,4
98	64,11	27	69	1	1	2	2	2	2	5	5	10	10	10	14,10
95	57,05	27	69	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5	10	17

Kecepatan arus tertinggi hanya terjadi pada titik masukan dan keluran aliran Waduk Jatiluhur, sedang di lokasi lainnya relatif sama besarnya. Dari gambar tersebut juga dapat dihitung rerata kecepatan arus air di setiap elevasi muka air waduk, hasilnya dapat dilihat dalam Gambar 8.

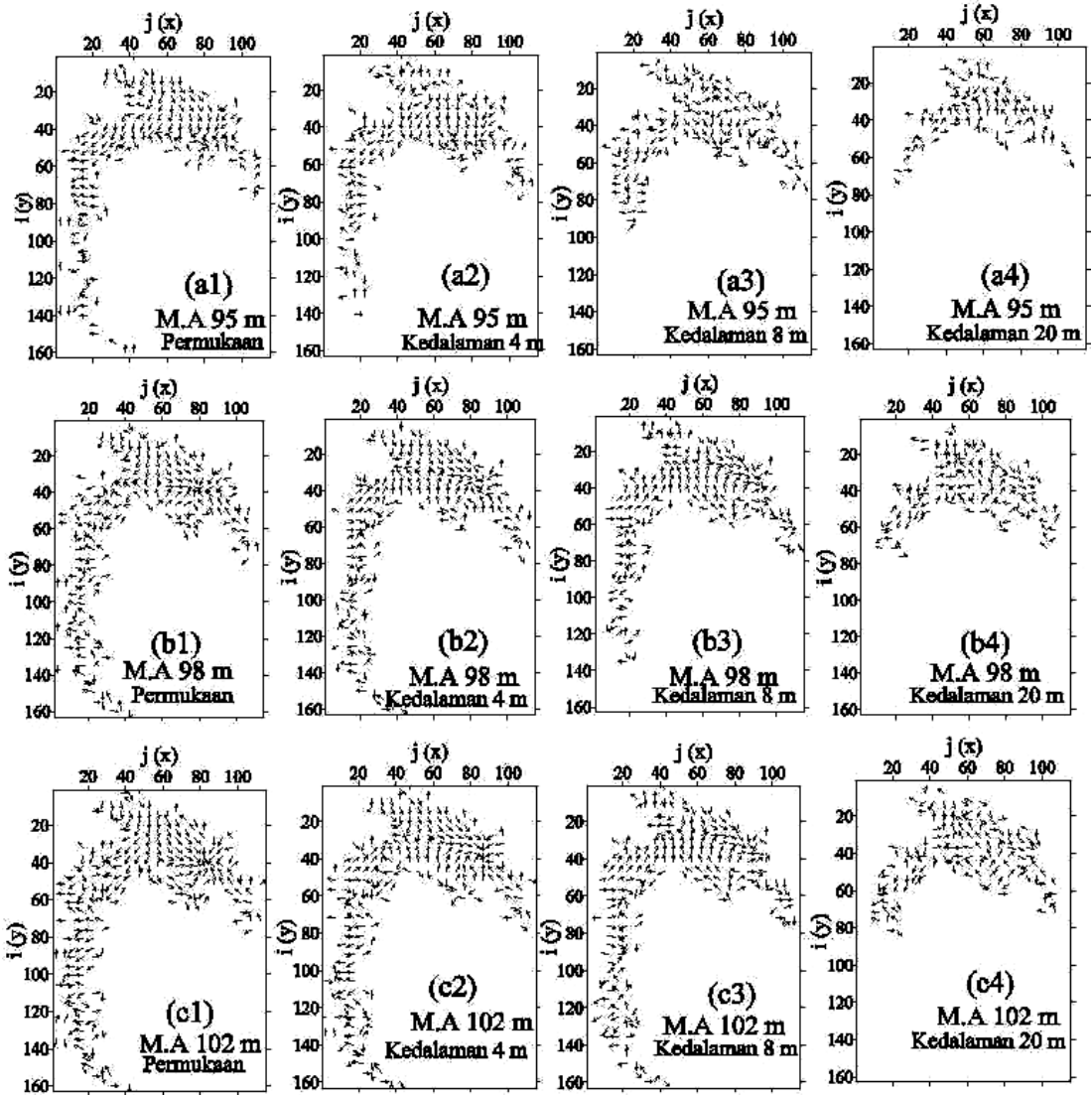
Dari Gambar 8 dapat dilihat, seiring turunnya elevasi muka air maka rerata kecepatan arus air juga turun. Demikian juga dengan rerata kecepatan arus air terhadap kedalaman air waduk, yaitu semakin dalam air waduk, rerata kecepatan arus airnya semakin kecil. Selanjutnya, apabila rerata kecepatan arus air waduk tersebut dihubungkan dengan Qi dan Qo setiap elevasi muka air pada saat survei lapang dilakukan, maka diperoleh hubungan seperti dalam Gambar 9.

Gambar 10a dan 10b menunjukkan, bahwa semakin besar Qi dan Qo semakin

tinggi pula rerata kecepatan arus air waduk. Apabila koefisien determinasi (R²) hubungan tersebut diplotkan dengan kedalaman air waduk (Gambar 9c). Tampak bahwa R² untuk Qi, semakin turun seiring dengan makin dalamnya air waduk. Sebaliknya R² untuk Qo, semakin meningkat seiring dengan makin dalamnya air waduk. Dari Gambar 10c juga dapat dilihat, bahwa R² untuk Qo (0,990 < R² < 0,827) lebih besar dari pada R² untuk Qi (0,499 < R² < 0,194). Ini dapat diartikan bahwa, kecepatan arus air Waduk Jatiluhur di elevasi muka air tertentu lebih banyak dipengaruhi oleh debit aliran air keluaran (Qo) dari pada debit aliran air masukan (Qi).

Fitoplankton

Hasil analisis di laboratorium telah diperoleh konsentrasi klorofil-a dari setiap titik pengambilan contoh air. Hasil tersebut disajikan dalam Gambar 10.



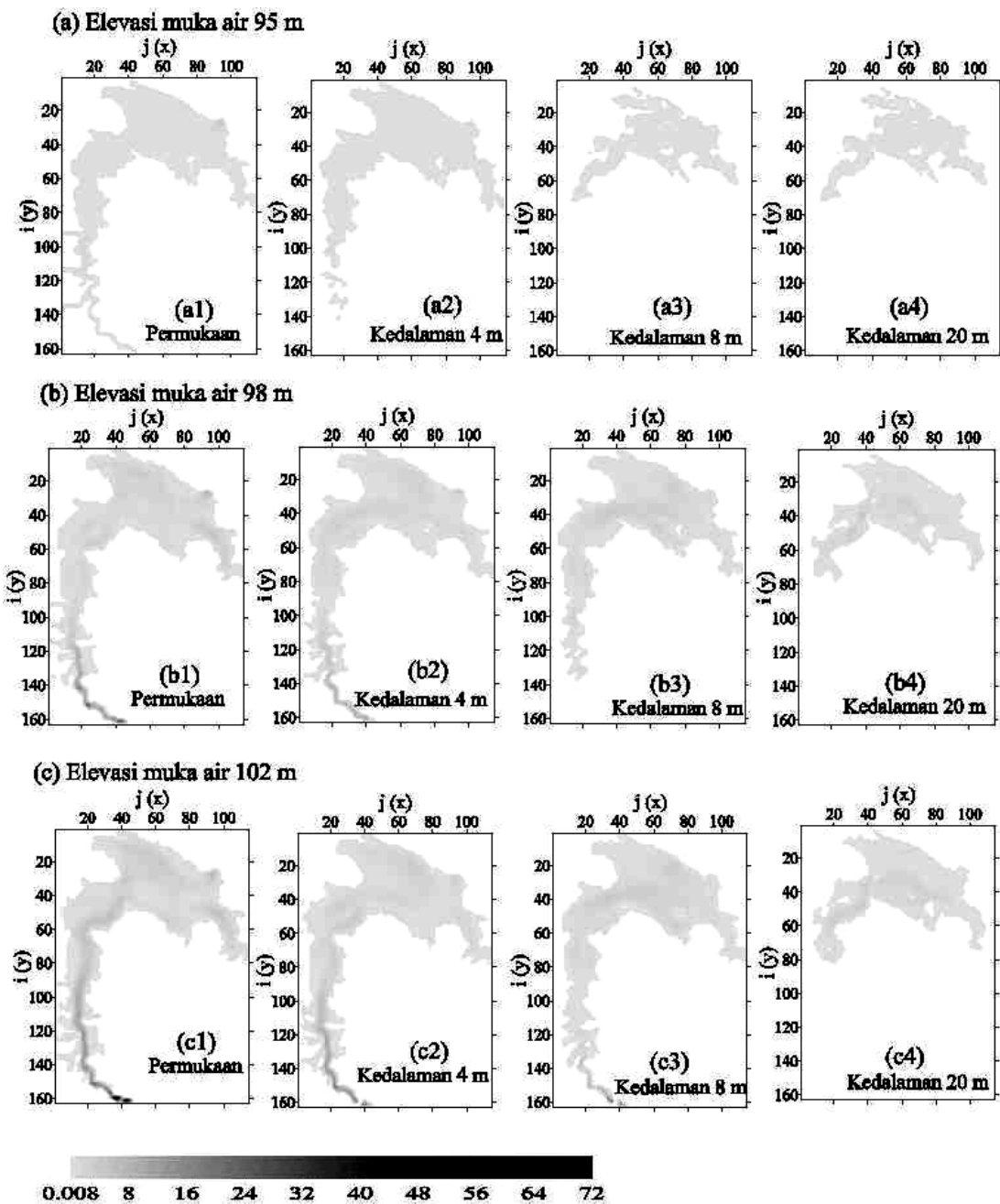
dalam cm/det

0.008 72.2

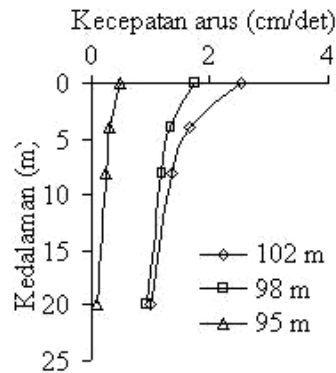
Gambar 6: Vektor arus air di waduk Jatiluhur

Gambar 10 memperlihatkan kecenderungan perubahan vertikal dari konsentrasi klorofil-a. Konsentrasi klorofil-a cenderung semakin rendah seiring dengan semakin dalamnya air waduk. Selanjutnya, kecenderungan perubahan

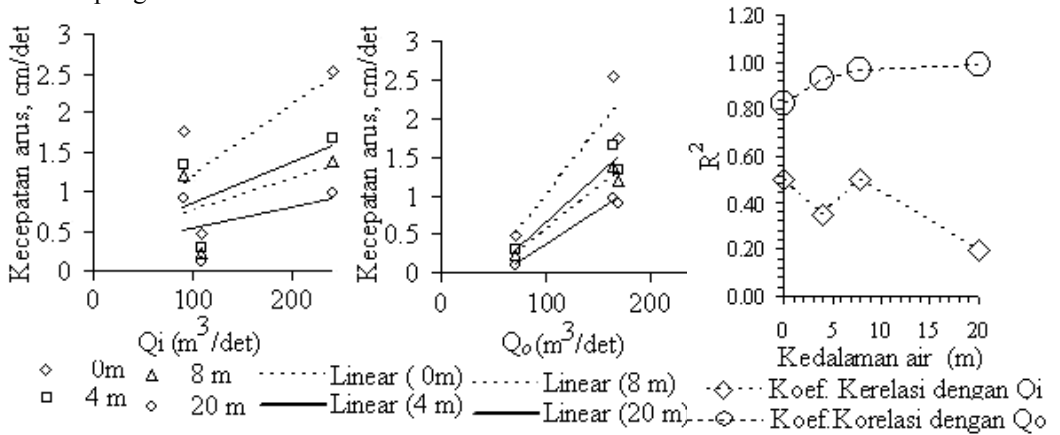
konsentrasi klorofil-a terhadap perubahan elevasi muka air, dapat diketahui dari hubungan antara rerata konsentrasi klorofil-a dengan kedalaman air di setiap elevasi muka air waduk (Gambar 11).



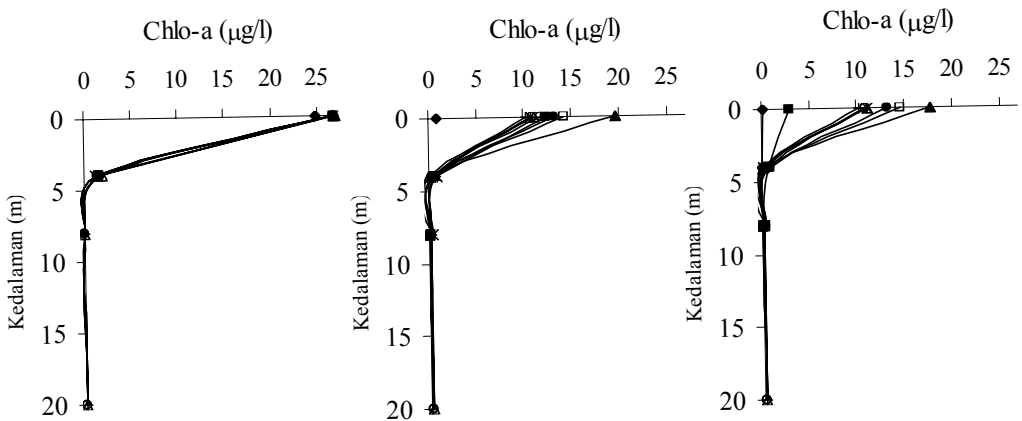
Gambar 7. Distribusi kecepatan arus air waduk Jatiluhur



Gambar 8. Kecepatan rerata arus air waduk Jatiluhur setiap elevasi muka air saat survei lapang



Gambar 9. Hubungan antara rerata kecepatan arus air waduk dengan Qi dan Qo



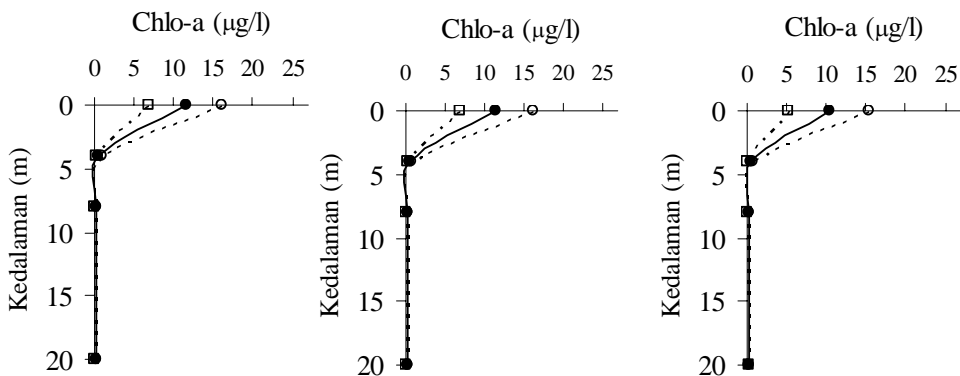
Gambar 10. Klorofil-a waduk Jatiluhur

Dari Gambar 11 dapat diketahui, bahwa semakin rendah elevasi muka air semakin tinggi pula konsentrasi klorofil-a. Berdasarkan Gambar 11 juga dapat diketahui perubahan horisontal dan lateral dari konsentrasi klorofil-a terhadap perubahan elevasi muka air waduk. Tampak bahwa semakin rendah elevasi muka air waduk, semakin kecil penyimpangan konsentrasi klorofil-a yang terukur. Demikian pula dengan penyimpangan secara vertikal, yaitu semakin dalam perairan maka semakin kecil penyimpangan yang terjadi. Ini berarti bahwa dengan semakin rendahnya elevasi muka air waduk, perubahan konsentrasi klorofil-a secara horisontal dan lateral cenderung semakin kecil atau semakin homogen. Demikian juga dengan perubahan kedalaman air di setiap elevasi muka air, semakin dalam air waduk perubahan konsentrasi klorofil-a juga cenderung semakin kecil atau semakin homogen

Hubungan Antara Fitoplankton dengan Arus Air Waduk

Berdasarkan pada koordinat vektor arus air dan koordinat titik-titik pengambilan contoh air yang sama, dapat diperoleh hubungan antara konsentrasi klorofil-a dan kecepatan arus air. Hubungan tersebut disajikan dalam Gambar 12.

Berdasarkan Gambar 12 dapat dilihat kecenderungan hubungan antara konsentrasi klorofil-a dengan kecepatan arus di permukaan air waduk (0 m). Hubungan tersebut mengikuti persamaan eksponensial negatif dengan koefisien determinasi 0,8322. Menyimak kecenderungan tersebut, kecepatan arus di bawah 15 cm/det belum berpengaruh secara berarti terhadap konsentrasi klorofil-a. Kemudian setelah terjadi peningkatan kecepatan air dari 15 cm/det hingga 75 cm/det konsentrasi klorofil-a cenderung semakin kecil, dan setelah kecepatan arus air di atas 75 cm/det maka konsentrasi klorofil-a cenderung sangat



Gambar 11. Hubungan antara rerata konsentrasi chlorofil-a dengan kedalaman air di setiap elevasi muka air waduk

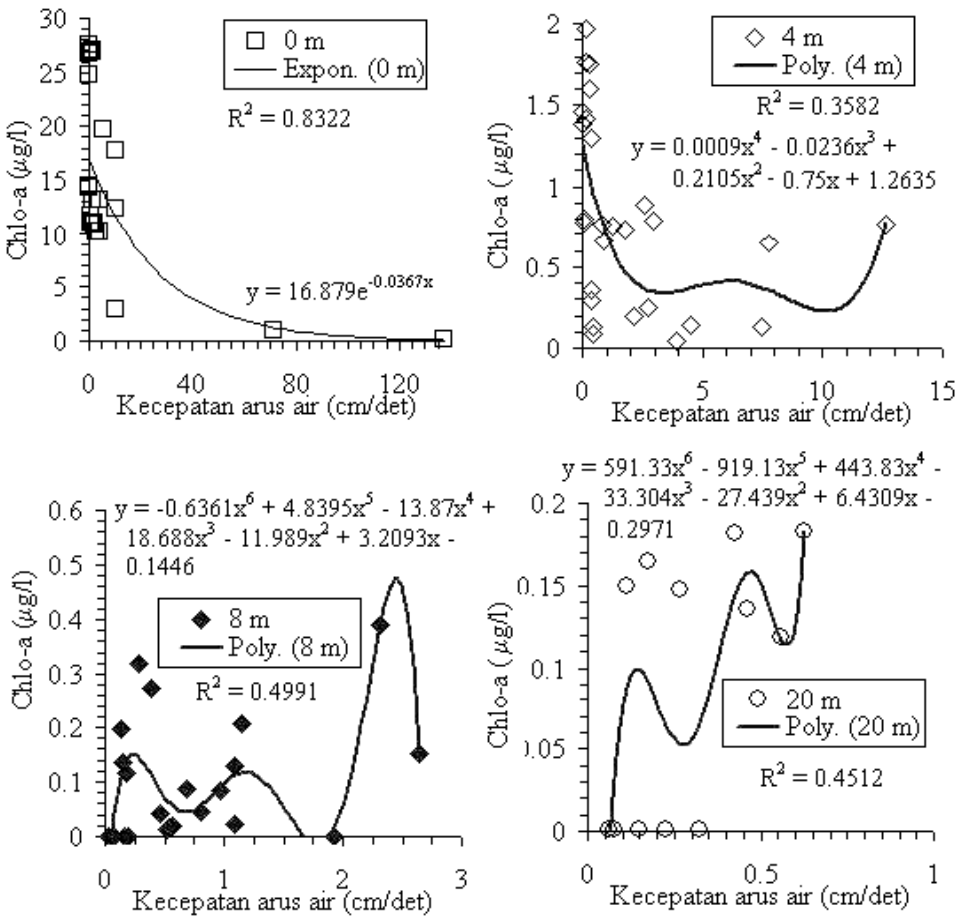
rendah, dengan pola asimtot mendekati 0 mg/l.

Menyimak Gambar 7 juga dapat dilihat, bahwa kecepatan arus air waduk pada kedalaman 4 m, 8 m dan 20 m kurang dari 15 cm/det. Pada kedalaman tersebut, hubungan kecepatan arus dengan konsentrasi klorofil cenderung mengikuti persamaan polinomial. Ini dapat diartikan bahwa, peningkatan arus

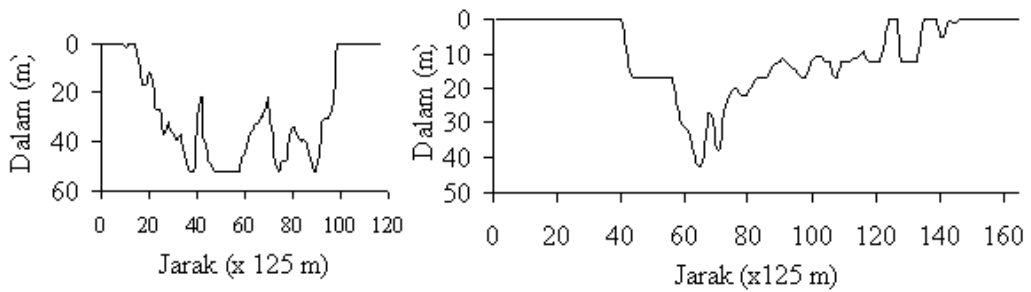
air waduk dari 0 cm/det hingga 15 cm/det pada kedalaman air 4 m, 8 m dan 20 m tidak selalu diikuti oleh perubahan konsentrasi klorofil-a secara konsisten.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa, elevasi muka air waduk pada saat



Gambar 12. Hubungan antara konsentrasi chlorofil-a dengan kecepatan arus tiap kedalaman air di waduk Jatiluhur



Gambar 13. Penampang melintang waduk Jatiluhur

kunjungan survei dilakukan tidak merubah bentuk morfologi waduk secara berarti. Sebagaimana diketahui bahwa waduk Jatiluhur merupakan sungai Citarum yang menggenang karena dibendung. Penampang melintang waduk arah j (x) dan arah i(y) dapat dilihat dalam Gambar 13.

Berdasarkan Gambar 14 dapat dilihat bahwa tebing dari waduk Jatiluhur mempunyai sudut hampir 90°. Dengan sudut demikian, perubahan elevasi muka air hanya sedikit merubah bentuk morfologi dari waduk tersebut.

Peubah arus di dalam badan air waduk adalah gaya yang bekerja pada badan air tersebut. Gaya utama dalam perairan waduk yang dapat membangkitkan arus air adalah gaya dorong dari laju massa aliran masuk, gaya hisap dari laju aliran keluar, gaya gesekan dasar dan dinding waduk, serta gaya gesek antarlapisan air itu sendiri (Tsanis 2007). Gaya yang diakibatkan oleh laju massa air Q_i dan Q_o dari ketiga elevasi muka air yang tidak mengalami perubahan bentuk morfologi waduk secara berarti, relatif sama. Dengan kondisi demikian, pola arah arus air dari hasil penelitian ini juga relatif mirip.

Gaya dari kecepatan aliran massa air yang masuk ke dalam waduk telah menumbuk massa dari badan air waduk. Hal ini memunculkan arus dengan kecepatan yang melemah seiring dengan bertambahnya jarak dari titik asal masukan massa air tersebut. Semakin tinggi kecepatan aliran massa air yang masuk kedalam waduk, semakin luas permukaan waduk yang terkena gaya kecepatan tersebut. Demikian pula dengan gaya hisap akibat pengeluaran massa air dari waduk. Semakin jauh dari titik keluaran, semakin rendah kecepatan arus air yang menuju ke titik keluaran tersebut.

Hasil penelitian juga menunjukkan debit aliran masukan dan keluaran waduk dari setiap elevasi muka air pada saat survei dilakukan. Apabila debit tersebut dibagi dengan luas penampang segmen titik masukan dan keluaran, akan diperoleh kecepatan arus masukan dan keluaran. Sementara itu, pada kondisi luas segmen masukan dan keluaran aliran massa air yang konstan, adanya perubahan besarnya debit masukan dan keluaran pada perubahan elevasi muka air akan merubah gaya yang diakibatkan

oleh kecepatan arus masukan dan keluaran tersebut.

Seperti telah dikemukakan sebelumnya, perairan waduk Jatiluhur dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu hilir, tengah, dan hulu. Berdasarkan pembagian tersebut, genangan bagian hilir lebih luas dibanding bagian tengah dan hulu waduk. Sementara itu, titik keluaran aliran air di hulu melalui dam, dan titik masukan aliran air terletak di hulu ujung waduk tersebut. Dengan kondisi demikian, seperti hasil dalam Gambar 9c, perubahan pola arah dan kecepatan arus perairan waduk Jatiluhur lebih banyak dipengaruhi oleh fluktuasi aliran air keluaran waduk dari pada fluktuasi aliran air masukannya.

Garno (2002) dalam penelitiannya di perairan waduk Jatiluhur telah melaporkan, bahwa klorofil-a di permukaan waduk berkisar antara 20,4-28,0 ig/l. Dalam penelitian tersebut tidak dilaporkan kondisi elevasi muka air pada saat pengambilan contoh air. Sementara, dalam hasil penelitian ini, klorofil-a permukaan air waduk berkisar antara 24,8138-27,0454 ig/l untuk elevasi muka air 95 m, 0,9318-19,7305 ig/l untuk elevasi muka air 98 m, dan 0,1406-17,7451 ig/l untuk elevasi muka air 102 m. Apabila hasil penelitian Garno(2002) dianggap pada elevasi muka air 95m, maka hasil klorofil-a yang dihasilkannya tidak berbeda jauh dengan hasil penelitian ini. Ini menunjukkan bahwa kondisi fitoplankton perairan waduk Jatiluhur dari tahun 2002 hingga tahun 2009, tidak mengalami penurunan yang berarti.

Fitoplankton dalam berfotosintesa untuk menghasilkan klorofil-a

memerlukan cahaya matahari (Chapra, 1997). Sementara itu cahaya matahari semakin lemah seiring dengan makin dalamnya air waduk, sehingga konsentrasi klorofil-a juga semakin kecil. Menurut Garno (2002), kecerahan (Secchi disk) di Waduk Jatiluhur adalah 80-115 cm. Berdasarkan pada kondisi yang demikian itu, maka pada kedalaman 4 m, 8 m dan 20 m di perairan waduk Jatiluhur dapat diperkirakan tidak ada klorofil-a. Namun hasil penelitian ini, pada kedalaman tersebut masih diperoleh klorofil-a.

Kepadatan fitoplankton (*algal densities*) berkisar antara 1 g/l sampai dengan 1,2 g/l (Davis 1951), sementara kepadatan air 1 g/l, maka fitoplankton mempunyai potensi terendap. Endapan fitoplankton tersebut yang diduga penyebab pada kedalaman 4 m, 8 m dan 20 m masih diperoleh konsentrasi klorofil-a dalam penelitian ini. Dugaan tersebut juga diperkuat dari konsentrasi klorofil-a di kedalaman 4 m, 8 m dan 20 m pada elevasi muka air 95 m. Pada elevasi muka air tersebut, rerata kecepatan arus airnya lebih rendah daripada kecepatan arus air pada elevasi lainnya. Kecepatan arus air demikian akan memberi kesempatan mengendap fitoplankton lebih lama, sehingga konsentrasi klorofil-a di kedalaman 4 m, 8m dan 20 m pada elevasi muka air 95 m lebih tinggi bila dibandingkan konsentrasi klorofil-a di kedalaman yang sama pada elevasi muka air yang lainnya.

Telah dikemukakan sebelumnya, bahwa kepadatan fitoplankton (*algal densities*) lebih dari 1. Namun dengan daya apung karena bentuk morfologinya,

maka fitoplankton akan mengikuti pergerakan arus yang terjadi. Pada elevasi muka air waduk tinggi dan keluaran aliran air yang besar, pada tempat-tempat tertentu terjadi arus yang tinggi. Pada kondisi demikian fitoplankton akan mengikuti pergerakan arus, sehingga distribusi konsentrasi secara lateral-horisontal semakin tidak merata. Kondisi demikian diduga menyebabkan konsentrasi klorofil-a di permukaan air waduk tidak merata dari satu tempat ke tempat lainnya. Sebaliknya semakin dalam air waduk dimana kecepatan arus semakin rendah, maka distribusi klorofil-a akan semakin rata (homogen).

Arus air di dalam badan air waduk akan mentransportasikan material, baik yang berbentuk terlarut maupun yang berbentuk partikulat (Gang Ji 2008). Kemampuan arus air dalam mentransportasikan tersebut, tergantung pada kecepatan arus air dan berat massa dari material itu sendiri. Pada berat material yang relatif konstan, seperti halnya fitoplankton di dalam air waduk, kemampuan transportasi tersebut akan didominasi oleh kecepatan arus air waduk tersebut. Pada hubungan antara konsentrasi klorofil-a dengan kecepatan arus (Gambar 12), diperkirakan bahwa kecepatan air waduk 15 cm/det merupakan batas kemampuan transportasi fitoplankton yang terjadi di dalam waduk Jatiluhur. Apabila arus air lebih dari 15 cm/det, maka fitoplankton akan tertransportasikan ke tempat lain. Kondisi di suatu area dalam waduk demikian terjadi secara menerus, sehingga pada area-area yang mempunyai kecepatan

antara 15 cm/det-75 cm/det, akan memiliki konsentrasi klorofil-a yang semakin rendah. Selanjutnya, bila kecepatan arus air melebihi 75 cm/det, maka konsentrasi klorofil-a menjadi sangat rendah, asimtot mendekati 0 mg/l.

Batas kemampuan arus air dalam mentransportasikan fitoplankton tersebut juga dikuatkan dengan kecenderungan hubungan antara konsentrasi klorofil-a dengan kecepatan arus pada kedalaman 4m, 8m, dan 20m. Pada kedalaman ini kecepatan arus air kurang dari 15 cm/det, dan fitoplankton yang ada merupakan hasil akumulasi dari laju pengendapan. Oleh karena itu pada kedalaman ini, peningkatan kecepatan arus air tidak selalu diikuti oleh kecenderungan konsentrasi klorofil secara konsisten.

Menurut Kawara (2002) dalam studinya di Waduk Asahi Jepang, peningkatan fitoplankton hanya didapatkan pada area dengan kecepatan arus kurang dari 10 cm/det, kemudian fitoplankton akan mulai menurun setelah kecepatan arus air lebih dari 25 cm/det. Menurut penelitian tersebut, akumulasi fitoplankton di area dengan kecepatan arus air kurang dari 10 cm/det, di samping karena keterbatasan daya transportasi dari arus air juga oleh laju pertumbuhan fitoplankton yang lebih cepat dari kecepatan transportasi karena arus air. Sebaliknya, penyusutan kuantitas fitoplankton di area dengan kecepatan lebih dari 25 cm/det, di samping karena tertransportasikan oleh arus air juga karena laju pertumbuhan lebih lambat dari kecepatan transportasi karena arus air.

Apabila penelitian ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh

Kawara (2002), diperoleh hasil yang serupa. Pertumbuhan dan jenis fitoplankton di perairan dibatasi oleh beberapa faktor, antara lain nutrien, lama pencahayaan matahari, dan faktor lingkungan lainnya (Håkanson 1995). Perbedaan hasil penelitian ini dengan yang dilakukan oleh Kawara (2002), diduga karena adanya perbedaan faktor pembatas di antara waduk yang diteliti. Apabila hasil penelitian Kawara (2002) digunakan untuk analogi, maka pada kedalaman 0 sampai dengan 1 m di area perairan waduk Jatiluhur yang mempunyai kecepatan arus kurang dari 15 cm/det akan terjadi akumulasi fitoplankton baik karena datang dari area lain maupun kecepatan laju pertumbuhannya. Kemudian pada kecepatan lebih dari 15 cm/det hingga 75 cm/det fitoplankton akan berkurang baik karena tertransportasikan maupun karena tidak sempat tumbuh.

Telah dikemukakan bahwa, debit aliran keluar mempengaruhi pola arah dan kecepatan arus air yang akan mempengaruhi konsentrasi klorofil-a (fitoplankton) di waduk Jatiluhur. Sementara itu, operasi waduk Jatiluhur, yang diutamakan untuk mengairi sawah irigas, debit aliran air keluar waduk terendah dapat terjadi di saat pengisian air waduk pada peralihan musim kemarau ke musim penghujan, dan di saat air waduk telah penuh pada peralihan musim penghujan ke musim kemarau. Pada kondisi debit aliran air terkecil demikian, akan terjadi puncak konsentrasi klorofil-a dan berpotensi untuk memunculkan terjadinya *blooming* fitoplankton.

KESIMPULAN

Kecepatan arus air lebih dipengaruhi oleh perubahan debit aliran air keluaran waduk daripada aliran air masukan waduk. Kecepatan arus air waduk Jatiluhur kurang dari 15 cm/det dapat terjadi apabila debit aliran keluaran kurang dari 70 m³/det. Pada area di dalam Waduk Jatiluhur dengan kecepatan arus air kurang dari 15 cm/det cenderung akan terjadi akumulasi fitoplankton, dan area dengan kecepatan arus air lebih dari 15 cm/det cenderung akan terjadi pengurangan fitoplankton. Dalam operasi waduk Jatiluhur dengan fungsi utama untuk pengairan sawah irigasi, debit aliran air keluar waduk kurang dari 70 m³/det dapat terjadi 2 kali dalam satu tahun, yaitu pada peralihan musim kemarau ke musim penghujan dan peralihan musim penghujan ke musim kemarau. Pada saat peralihan musim tersebut diperkirakan akan terjadi puncak konsentrasi klorofil-a yang berpotensi memunculkan *blooming* fitoplankton.

REKOMENDASI

Potensi *blooming* fitoplankton di Waduk Jatiluhur setidaknya dapat terjadi dua kali dalam satu tahun. *Blooming* fitoplankton dapat menyebabkan terjadinya penurunan (*depleksi*) oksigen terlarut badan air Waduk Jatiluhur pada malam hari dan menyebabkan kematian massal ikan budidaya karamba jaring apung. *Blooming* fitoplankton juga dapat menimbulkan penyumbatan filter sistem WTP. Oleh karena itu Perum. Jasa Tirta sebaiknya menginformasikan debit aliran

keluaran hasil operasi waduk setiap saat kepada petani ikan karamba dan Operator WTP yang akan dibangun. Dengan demikian petani dan operator tersebut dapat melakukan tindakan preventif dalam melakukan pencegahan kematian ikan dan penyumbatan filter WTP yang akan dibangun.

DAFTAR PUSTAKA

- Bourke, K. 2006, *The Efficiency of Clarification/Sedimentation and DAF in Reducing Phytoplankton at Warrnambool WTP*, 69th Annual Water Industry Engineers and Operators, Conference Bendigo Exhibition Centre 5 to 7 September 2006, 88 – 94.
- Davis, CC. 1951. *The Marine and Freshwater Plankton*. Michigan State University Press, USA
- Eko Harsono. 2006. Model Transformasi data Lama Penyinaran Matahari Ke Dalam Informasi Fluktuasi DO Air 24 Jam Di Waduk Cirata, *J.Limnotek*. 12 (1): 10-23.
- Gang, Ji.Z, 2008, *Hydrodynamics and Water Quality, Modeling River, Lakes, and Estuaries*, John Wiley & Sons Inc, New Jersey
- Garno,YS. 2002, *Beban Pencemar Limbah Perikanan Budidaya dan Yutrofikasi Di Perairan Waduk DAS Citarum*, *J. Tek Ling*. 2 (2): 112 - 120
- GHD. 2010, *Jatiluhur Pipeline and Water Treatment Plant Pre-feasibility Study*, Indonesia Infrastructure Initiative, Jakarta
- Håkanson.L & RH. Peters. 1995, *Predictive Limnology, Methods for Predictive Modelling*, SPB Academic Publishing, Amsterdam, The Netherlands.
- Henderson, B. Sellers & HR. Markland. 1987 : *Decaying Lakes “The Origins and Control of Culture Eutrophication”* John Wiley & Sons., Chichester-Singapore. Pp 254.
- Kawara,O., J. Li & Y.Ono. 2002, *A study on influence of current velocity on growth of phytoplankton*, *Water Intelligence Online* © IWA Publishing
- Kolditz, O. 2002, *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics*, Springer, Berlin, Jermany
- Olson, MR. 1990. “*Essential of Engineering Fluid mechanics* “, Harper & Row, New York,
- Puslitbang Teknologi Sumber Daya Air Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2000, *Pemeruman Waduk Ir.H.Juanda*, Laporan Akhir Tahun 2000.
- Sri Hernowo. 2001. *Pengelolaan Waduk Ir. H. Juanda di Jatiluhur*, Prosi-ding Lokakarya Selamatkan Air Citarum. Wetlands International 75-80,
- Tsanis.IK, Wu.J, H. Shen & C. Valeo, 2007, *Environmental Hydraulics, Hydrodynamic and Pollutant Transport Modelling of Lakes and Coastal Water*, Elsevier, New York.

Memasukkan: Desember 2010

Diterima: Februari 2011