

**Model Eutrofikasi 2-Dimensi Berlapis untuk Optimalisasi Lokasi Zona Budidaya Ikan Karamba Jaring Apung (KJA) Di Waduk Jatiluhur
(Two-Dimensional Layered Eutrophication Model to Optimize the Aquaculture Floating Net (KJA) Zones Location In Jatiluhur Reservoir)**

Eko Harsono

Pusat Penelitian Limnologi-LIPI
Email : eko@limnologi.lipi.go.id

Memasukkan: Januari 2016, Diterima Mei 2016

ABSTRACT

The development of floating net aquaculture in Jatiluhur reservoir that reach up 21000 to 26 717 plot have been resulted in eutrophication that interfere of water treatment raw water, tourism and water sports, so the reduction and redeployment zones floating net in the reservoir needs to be done. The purpose of this study looking for zone of floating net aquaculture in Jatiluhur reservoir. The zone is obtained from the optimization by maximizing the density plots floating net per segment in alternate zones with constraints status trophic allowed in the area of water treatment raw water in take, tourism and water sports in the downstream Jatiluhur reservoir through simulation of the chlorophyll-a concentration distribution from the 2 - dimensional layered eutrophication model for scenarios increase every 10 plots floating net in segments of alternative zones 1, 2, 3 in the downstream reservoirs and alternate zone 4 in the middle of the reservoir. The results of the eutrophication 2-dimensional layered model calculation been obtained segment length and width of 100 m. The optimization results show, the carrying capacity of water due to zoning plots Jatiluhur reservoir floating net per segment in the middle of the reservoir is greater than the downstream of the reservoir, and to get water Jatiluhur reservoir in oligotrophic status that does not interfere with other uses of the reservoir water, and to get water Jatiluhur reservoir in oligotrophic status that does not interfere with other uses of the reservoir water, the highest density of a plot floating net per segment is the alternative zone 4 of 10 plot floating net per segment or 4,420 plot floating net. For the the aquaculture fish in floating net in the area are currently recommended to be moved to alternative zone 4 which is located in the central part Jatiluhur reservoir.

Keywords: floating net plot zone, Jatiluhur reservoir, optimalitation, 2-dimensional layered eutrophication

ABSTRAK

Perkembangan budidaya ikan dengan karamba jaring apung di Waduk Jatiluhur yang mencapai 21.000 hingga 26.717 petak telah mengakibatkan eutrofikasi yang mengganggu air baku pengolahan air bersih, pariwisata dan olah raga air, sehingga pengurangan dan pemindahan zona karamba jaring apung di waduk tersebut perlu dilakukan. Tujuan penelitian ini mencari zona budidaya ikan dengan karamba jaring apung di Waduk Jatiluhur. Zona tersebut diperoleh dari optimalisasi dengan memaksimalkan kepadatan petak karamba jaring apung per segmen di alternatif zona dengan kendala status trofik yang diperbolehkan di area penyadap air baku pengolahan air, wisata dan olah raga air di bagian hilir Waduk Jatiluhur melalui simulasi sebaran konsentrasi khlorofil-a dari model eutrofikasi 2-dimensi berlapis karena skenario peningkatan setiap 10 petak karamba jaring apung di segmen-segmen zona alternatif 1, 2, 3 di bagian hilir waduk dan zona alternatif 4 di bagian tengah waduk. Hasil perhitungan model diperoleh dimensi panjang dan lebar segmen 100 m, sedang optimalisasi menunjukkan daya zonasi petak karamba jaring Waduk Jatiluhur di bagian tengah lebih besar dibandingkan dengan di bagian hilir, sehingga untuk mendapatkan air Waduk Jatiluhur dalam status oligotrofik yang tidak mengganggu peruntukan lainnya di air waduk tersebut maka kepadatan tertinggi dari petak karamba jaring apung per segmen adalah zone alternatif 4 dengan kepadatan 10 petak karamba jaring apung per segmen atau 4.420 petak karamba jaring apung. Untuk itu budi daya ikan dengan karamba jaring apung yang ada di area saat ini disarankan untuk dipindahkan ke zona alternatif 4 yang terletak di bagian tengah Waduk Jatiluhur.

Kata Kunci: model eutrofikasi 2-dimensi berlapis, optimalisasi, Waduk Jatiluhur, zona karamba jaring apung

PENDAHULUAN

Air Waduk Jatiluhur yang semula digunakan untuk pengairan irigasi teknis, PLTA, air baku pengolahan air bersih (WTP), *land scape* pariwisata, dan olah raga air, saat ini juga dimanfaatkan untuk budidaya ikan dengan karamba jaring apung (KJA). Jumlah maksimum KJA di perairan Waduk Jatiluhur

telah ditetapkan oleh Perum Jasa Tirta (PJT) II Jatiluhur sebanyak 4.000 petak, namun saat ini telah mencapai sekitar 21.000 sampai dengan 26.717 petak, sehingga air waduk tersebut telah terjadi eutrofikasi yang mengganggu peruntukan air lainnya (Garno 2001; Garno 2003; Abery *et al.* 2011; Badrudin 2010; Arifin 2011; Demetrio *et al.* 2011; Harsono 2012).

Menurut Badrudin (2010), sampai saat ini metode pembatasan petak KJA di perairan waduk masih berdasarkan pada daya tampung yang menganggap air waduk tercampur sempurna. Dengan metode demikian, jumlah maksimum KJA yang telah ditetapkan, dapat dibangun di semua tempat permukaan air Waduk Jatiluhur. Oleh karena itu, perkembangan KJA di waduk yang luasnya 6.312,5 Ha tersebut menjadi sangat sulit untuk dikendalikan. Untuk itu perlu dicari cara yang dapat membatasi jumlah dan sekaligus dapat merelokasi zona pengembangan KJA di Waduk Jatiluhur, sehingga eutrofikasi dapat dikendalikan dan peruntukan air Waduk Jatiluhur lainnya tidak terganggu.

Menurut Boegman *et al.* (2001), Xu *et al.* (2010), Dingguo *et al.* (2011) dan Lindim *et al.* (2011), eutrofikasi di setiap badan air dapat bervariasi secara spasial dan temporal karena adanya perbedaan kondisi hidrodinamika badan air. Sudjono (2003) dan Bo *et al.* (2008) juga menyatakan, perbedaan proses fisika dan biokimia di setiap bagian waduk panjang (*elongated reservoir*) telah menyebabkan kualitas air di waduk tidak seragam. Berdasarkan pada mekanisme hidrodinamika dan proses reaksi tersebut, Harsono (2015) telah berhasil mengembangkan model eutrofikasi 2-dimensi berlapis yang dapat memperagakan variasi spasial dan temporal konsentrasi khlorofil-a karena beban masukan (influen) limbah budidaya ikan KJA dan sungai di perairan waduk. Model tersebut, jika digunakan, dapat menjadi acuan untuk menetapkan zona budidaya ikan dengan KJA yang tidak menimbulkan eutrofikasi di air Waduk Jatiluhur. Untuk itu, tujuan penelitian ini mencari zona budidaya ikan dengan KJA yang tidak mengakibatkan eutrofikasi di area penyadapan air baku WTP dan PLTA, pariwisata, serta olah raga air di Waduk Jatiluhur dengan menggunakan model eutrofikasi 2-dimensi berlapis.

BAHAN DAN CARA KERJA

Zona KJA optimum diperoleh melalui optimalisasi dengan simulasi menggunakan sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air Waduk Jatiluhur dari skenario penempatan KJA di alternatif zona budidaya ikan dengan KJA. Tujuan optimalisasi tersebut adalah untuk mendapatkan zona dengan kepadatan KJA yang paling tinggi dengan kendala status trofik yang

diperbolehkan di area titik penyadapan air baku pengolahan air bersih untuk penduduk dan PLTA, pariwisata, serta olah raga air di Waduk Jatiluhur seperti yang ditampilkan di Gambar 1. Untuk mendapatkan sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a air model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air Waduk Jatiluhur dan skenario alternatif zona KJA dilakukan dengan cara sebagai berikut.

Model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air waduk tersebut terdiri dari sub-model hidrodinamika arus dan elevasi muka air, termodinamika suhu air, dan sistem eutrofikasi dengan variasi arah koordinat x dan y di setiap ketebalan lapisan badan air waduk (Harsono 2015). Persamaan-persamaan model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air waduk diselesaikan secara numerik beda hingga (*finite difference*) skema *explicit backward* dengan kondisi pembatas terbuka (*open boundary condition*), dan penghitungan-penghitungannya dilakukan dengan pemrograman komputer berbahasa FORTRAN. Untuk menghitung model tersebut, diperlukan data kondisi pembatas yang terdiri dari distribusi lapisan tiap segmen, beban (nutrien dan khlorofil-a) influen sungai, beban (nutrien) influen KJA, dan cuaca udara, beserta data observasi konsentrasi khlorofil-a untuk kalibrasi dan validasi model yang diperoleh dengan cara berikut.

Data kondisi pembatas model eutrofikasi 2-dimensi air Waduk Jatiluhur diambil diambil sebanyak 3 ulangan, yaitu bulan Januari 2009 pada saat kondisi elevasi muka air (EMA) waduk 95 m msl (*mean sea level*), bulan Agustus 2009 pada saat EMA 98 m msl, dan pada bulan Mei 2009 pada saat EMA 102 m msl.

Distribusi lapisan tiap segmen badan air pada EMA 95 m, 98, dan 102 m diperoleh dari peta batimetri Waduk Jatiluhur (Puslitbang Teknologi Sumber Daya Air Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah 2000). Formula analisis kesalahan numerikal (Harsono 2015). Data debit efluen (Q_{eff}), debit influen (Q_{inf}), beban nutrien influen sungai (total nitrogen T-N, NH_3 , NO_2 , NO_3 , total fosfor T-P dan PO_4), beban influen KJA (nitrogen organik terlarut DON dan fosfor organik terlarut DOP), dan cuaca Waduk Jatiluhur pada EMA 95 m, 98 m dan 102 m diperoleh dari penelitian sebelumnya (Harsono 2009, Harsono 2012, Harsono 2013; Harsono 2015). Selanjutnya, beban khlorofil-a (khlo-a) influen sungai diperoleh dengan cara sebagai berikut. Beban khlo-a influen sungai dihitung dengan formula rasional (James 1993). Konsentrasi khlo-a

formula tersebut diperoleh dari pengambilan contoh air di titik influen (Gambar 1) dengan menggunakan Kamerer *water sampler* dari Wildco volume 3 liter di 0,6 dari kedalaman sungai. Contoh air tersebut diambil 500 ml dan diawetkan dengan 2 ml $MgCO_3$ kemudian disaring dengan kertas saring Whatmann GF/F mesh size $0,7 \mu m$, substrat tersaring disimpan di dalam alumunium foil untuk menghindari dari cahaya matahari, kemudian dibawa ke laboratorium untuk analisis konsentrasi khlorofil-a dengan menggunakan metode standard (AWWA 2005).

Kalibrasi model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air Waduk Jatiluhur dilakukan menggunakan hasil penghitungan dengan data kondisi pembatas pada EMA 98 m msl. Validasi model dilakukan menggunakan hasil penghitungan model dengan data kondisi pembatas EMA 95 m dan 102 m. Proses kalibrasi dan validasi model selesai apabila nilai perbedaan antara konsentrasi khlorofil-a hasil penghitungan model dengan observasi (ϵ) sama atau kurang dari 0,5. Nilai ϵ dihitung dengan formula:

$$\epsilon = \frac{\sum_1^n (obs - hit)^2}{N}$$

dengan obs = konsentrasi khlorofil-a hasil observasi ($\mu g/l$), hit = konsentrasi khlorofil-a hasil penghitungan model ($\mu g/l$), N = jumlah observasi. Nilai konsentrasi khlorofil-a observasi diperoleh dari contoh air di titik-titik seperti yang ditampilkan pada Gambar 1. Contoh air tersebut diambil pada waktu bersamaan dengan pengambilan contoh air titik influen di kedalaman air 0,5 m, 2 m, dan 10 m. Alat

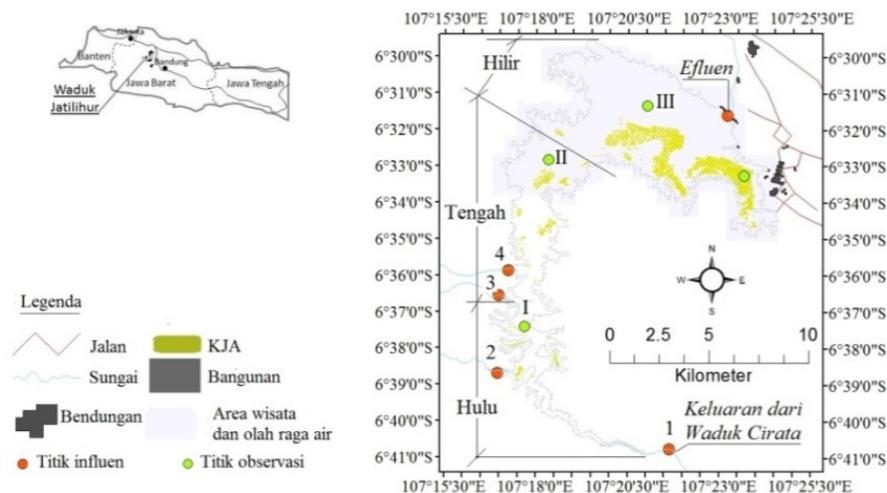
pengambil contoh air, penanganan, dan analisis laboratorium contoh air untuk mendapatkan konsentrasi khlorofil-a kalibrasi dan validasi tersebut, sama dengan alat pengambilan contoh air, penanganan, dan analisis laboratorium atas contoh air titik influen.

Alternatif zona KJA yang digunakan untuk simulasi berlokasi di bagian hilir dan tengah Waduk Jatiluhur, yaitu seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2. Skenario dalam simulasi tersebut dilakukan dengan menempatkan KJA setiap segmen sebanyak 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dan 100 petak KJA/segmen. Evaluasi status trofik dari sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a di area penyadapan air baku pengolahan air untuk air bersih dan PLTA, wisata, serta olah raga air Waduk Jatiluhur menggunakan status trofik konsentrasi khlorofil-a yang telah ditetapkan oleh Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau/Waduk.

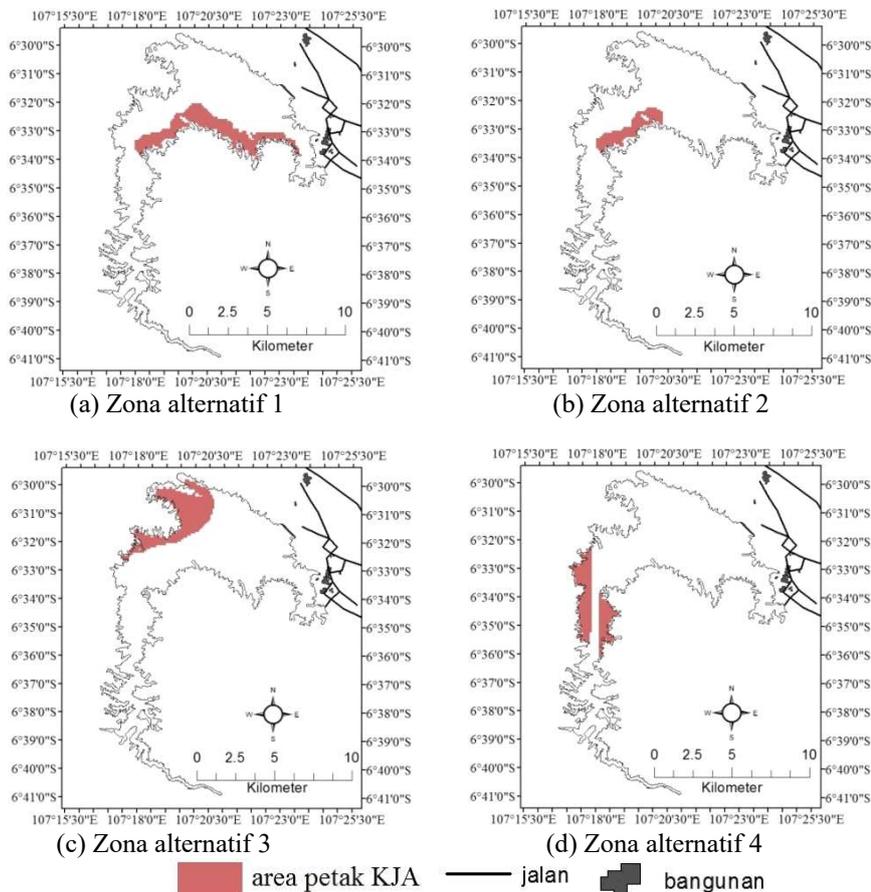
HASIL

Hasil segmentasi dan pelapisan air diperoleh panjang dan lebar segmen 100 m dan badan air Waduk Jatiluhur dibagi menjadi 15 lapisan air. Distribusi lapisan badan air Waduk Jatiluhur dan kondisi pembatas lainnya ditampilkan pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3b, 3c dan 3d dapat diketahui luas permukaan dan volume air Waduk



Gambar 1. Situasi perairan Waduk Jatiluhur



Gambar 2. Lokasi alternatif zona budidaya ikan dengan KJA di Waduk Jatiluhur

Jatiluhur adalah yaitu 6 152 Ha dan 1 494 350 000 m³ untuk EMA 95 m, 6 564 Ha dan 1 684 200 000 m³ untuk EMA 98 m, 7 484 Ha dan 214 500 000 m³ untuk EMA 102 m. Luas permukaan dan volume air Waduk Jatiluhur berdasarkan pada peta batimetri adalah 6.360 Ha dan 1.563.000.000 m³ untuk EMA 95 m, 6.790 Ha dan 1.764.000.000 m³ untuk EMA 98 m, 7.830 Ha dan 2.053.000.000 m³ untuk EMA 102 m (Harsono 2012). Perbedaan antara dua hasil penghitungan luas permukaan dan volume air Waduk Jatiluhur tersebut adalah 3,27% dan 4,39% untuk EMA 95 m, 3,33% dan 4,52% untuk EMA 98 m, dan 4,42% dan 4,48% untuk EMA 102 m. Perbedaan hasil peritungan tersebut kurang dari 5%, sehingga hasil segmentasi dan pelapisan dianggap dapat memperagakan badan air Waduk Jatiluhur.

Berdasarkan Gambar 3b, 3c dan 3d dapat diketahui perbandingan antara total debit influen sungai dengan debit efluen ($\sum_{inf=1}^4 Q_{inf}/Q_{eff}$), yaitu 1,58 untuk EMA 95 m, 0,53 untuk EMA 98 m dan 1,46 untuk EMA 102 m. Hasil penghitungan-penghitungan tersebut menunjukkan bahwa

permukaan air Waduk Jatiluhur pada EMA 98 m dan EMA 102 m sedang naik karena $\sum_{inf=1}^4 Q_{inf}/Q_{eff} > 1$, dan pada EMA 98 m sedang turun karena $\sum_{inf=1}^4 Q_{inf}/Q_{eff} < 1$.

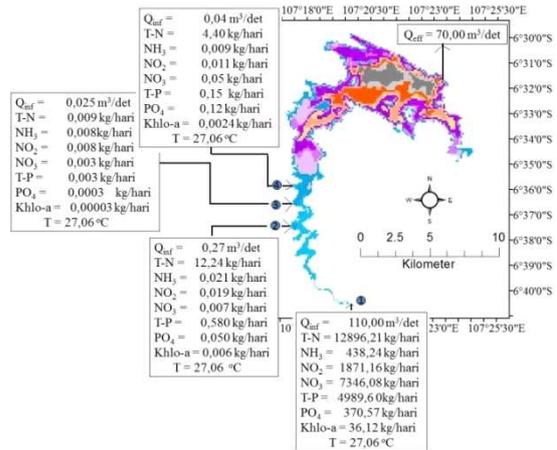
Gambar 3b, 3c, dan 3d menunjukkan persentase rata-rata beban influen sungai titik no. 1 sebesar 99,93% untuk EMA 95 m, 99,85% untuk EMA 98 m dan 99,78% untuk EMA 102 m, sedangkan sisa persentase beban tersebut terbagi ke pada titik influen sungai no. 2, 3 dan 4. Berdasarkan pada Gambar 1, titik influen sungai no.1 berasal dari keluaran Waduk Cirata dan titik-titik influen sungai lainnya berasal dari DAS Waduk Jatiluhur lainnya yang relatif kecil, sehingga debit aliran dan beban influen sungai titik no. 1 mendominasi debit aliran dan beban influen sungai di Waduk Jatiluhur.

Gambar 3e dan 3f memperlihatkan KJA yang ada di permukaan air Waduk Jatiluhur. KJA tersebut berjumlah 26.593 petak, dan sebagian besar terdapat di bagian hilir waduk. Berdasarkan pada segmentasi

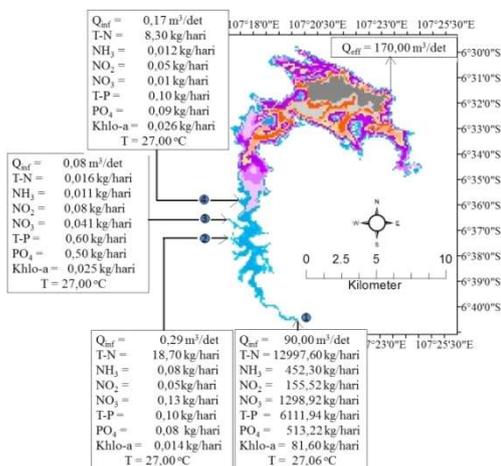
Tabel lapisan badan air Waduk Jatiluhur

Lapisan ke	Tebal lapisan (m)			Kedalaman (m)		
	EMA 95 m	EMA 98 m	EMA 102 m	EMA 95 m	EMA 98 m	EMA 102 m
1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
2	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9
3	0,5	0,5	0,5	1,4	1,4	1,4
4	0,6	0,6	0,6	2	2	2
5	3	3	3	5	5	5
6	5	5	5	10	10	10
7	5	5	5	15	15	15
8	5	5	5	20	20	20
9	5	5	5	25	25	25
10	5	5	5	30	30	30
11	5	5	5	35	35	35
12	5	5	5	40	40	40
13	5	5	5	45	45	45
14	5	5	5	50	50	50
15	5	8	12	55	58	62

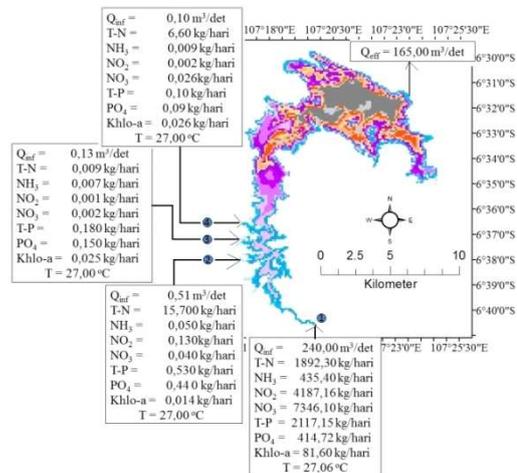
(a) Jumlah lapisan badan air



(b) Sebaran jumlah lapisan badan air, beban influen sungai dan debit efluen pada EMA 95 m

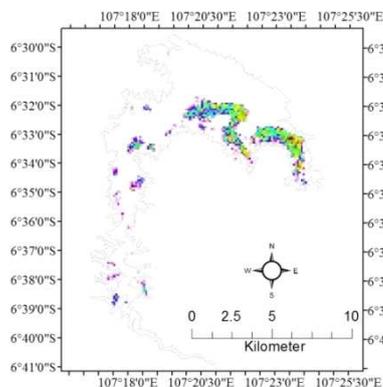


(c) Sebaran jumlah lapisan badan air, beban influen sungai dan debit efluen pada EMA 95 m

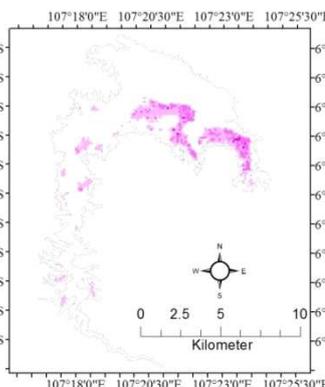


(d) Sebaran jumlah lapisan badan air, beban influen sungai dan debit influen sungai

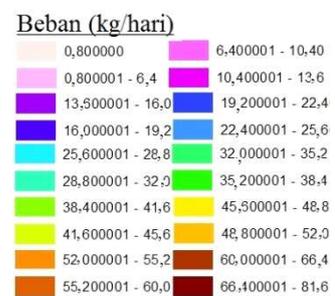
Jumlah lapisan air



(e) Beban organik nitrogen terlarut (DON) influen KJA



(f) Beban organik posfor terlarut (DOP) influen KJA



Gambar 3. Kondisi pembatas model eutrofikasi 2-dimensi berlapis air Waduk Jatiluhur

yang telah dilakukan, KJA tersebut masuk ke dalam 882 segmen dengan kepadatan antara 1 sampai dengan 102 KJA/segmen. Apabila sebaran petak KJA tersebut dihubungkan dengan kedalaman air waduk, diperoleh histogram Gambar 4.

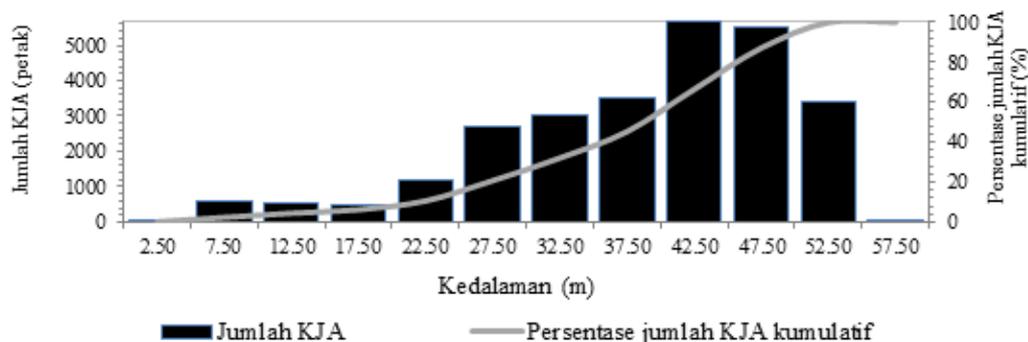
Gambar 4 menunjukkan bahwa 25% petak KJA di Waduk Jatiluhur terdapat di kedalaman air 1-35 m, sedangkan 75% di antaranya terdapat di kedalaman antara 36-60 m. Berdasarkan Gambar 3e dan 3f dapat diketahui sebaran beban influen KJA berkisar antara 0,8-81,60 kg/hari/segmen untuk DON dan 0,13-13,60 kg/hari/segmen untuk DOP.

Hasil kalibrasi dan validasi dengan distribusi lapisan kondisi pembatas tersebut diperoleh waktu hitung (Δt) 3 detik dan kondisi awal badan air Waduk Jatiluhur pada status oligotrofik menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau/atau Waduk. Konsentrasi khlorofil-a hasil observasi dan penghitungan ditampilkan dalam Gambar 5, parameter model hasil kalibrasi dan validasi ditampilkan dalam Tabel 1 dan hasil penghitungan model sebaran spasial konsentrasi

khlorofil-a di badan air Waduk Jatiluhur ditampilkan pada Gambar 6.

Dari Gambar 5 dapat dilihat konsentrasi khlorofil-a hasil penghitungan model telah mengikuti kecenderungan hasil observasi. Hasil penghitungan perbedaan (ϵ) rata-rata, antara konsentrasi khlorofil-a penghitungan dengan observasi diperoleh 0,26 untuk EMA 95 m, 0,18 untuk EMA 98 m; dan 0,25 untuk EMA 102 m. Hasil penghitungan ϵ kurang dari 0,5, maka model dianggap telah dapat memperagakan sebaran konsentrasi khlorofil-a di badan air Waduk Jatiluhur. Sementara itu dari Tabel 1 juga dapat dilihat parameter hasil kalibrasi berada di dalam nilai rentang parameter hasil penelusuran pustaka. Dengan demikian hasil penghitungan sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a air Waduk Jatiluhur dapat digunakan sebagai model yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Dari Gambar 6a, 6b dan 6c dapat dilihat konsentrasi khlorofil-a air Waduk Jatiluhur pada EMA 95 dan EMA 102 m di bagian hulu tergolong rendah dan cenderung meningkat ke arah hilir waduk. Selanjutnya, konsentrasi khlorofil-a pada

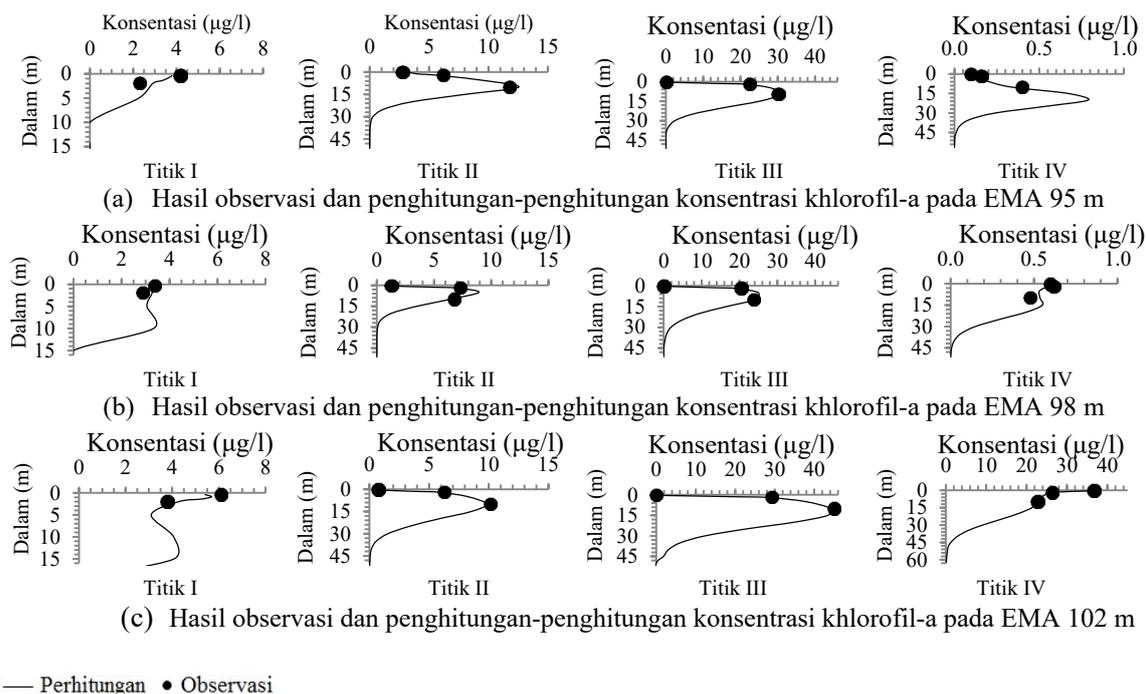


Gambar 4. Sebaran jumlah petak KJA pada berbagai kedalaman air Waduk Jatiluhur

Tabel 1. Parameter model eutrofikasi di Waduk Jatiluhur

Parameter	satuan	Hasil	Nilai tipikal	Parameter	Satuan	Hasil	Nilai tipikal
μ_{maks}	1/hari	1,2	1,0 - 2,0 ^(a)	$Gz_{p_{maks}}$	1/hari	1.6	1,5 - 4 ^(c)
v_{sp}	m/hari	0,004	0,005 - 0,08 ^(d)	I_p	mg/m ² /hari	0,317	0,2 - 6 ^(c)
d_{pp}	1/hari	0,06	0,05 - 0,25 ^(a)	k_{po}	1/hari	0,0016	0,001 - 0,2 ^(a)
E_{pp}	1/hari	0,11	0,1 ^(b)	r_{pp}	mg-P/mg-khlorofil-a	0,02	0,006 - 0,03 ^(a)
a		2		r_{pn}	mg-N/mg-khlorofil-a	0,053	0,04 - 0,09 ^(a)
K_p	$\mu g/l$	2	1, 6 - 25 ^(a)	r_{zp}	mg-P/mg-zooplankton	0,067	
K_{n1}	$\mu g/l$	3,1	1 - 20 ^(a)	r_{zn}	mg-N/mg-zooplankton	0,009	
K_{n2}	$\mu g/l$	4.8	1 - 30 ^(a)	k_{no}	1/hari	0,0018	0,001 - 0,2 ^(a)
K_e	cal/m ² /hari	350	100 - 400 ^(b)	I_n	mg/m ² /hari	24	22 - 32
α_s		1		k_{n1}	1/hari	0,05	
d_{zp}	1/hari	0,024	0,02 - 0,3	k_{n2}	1/hari	0,06	
E		0,01		k_{n3}	1/hari	0,06	0,09
K_{mz}	kg/m ³	2,9	2,0 - 25 ^(b)				

(a) Schnoor (1996) ; (b) Chapra (1997); (c) Thomann (1987); (d) Kuo *et al.* (2005)



— Perhitungan • Observasi

Gambar 5. Hasil observasi dan penghitungan-penghitungan model konsentrasi khlorofil-a di titik-titik stasiun observasi

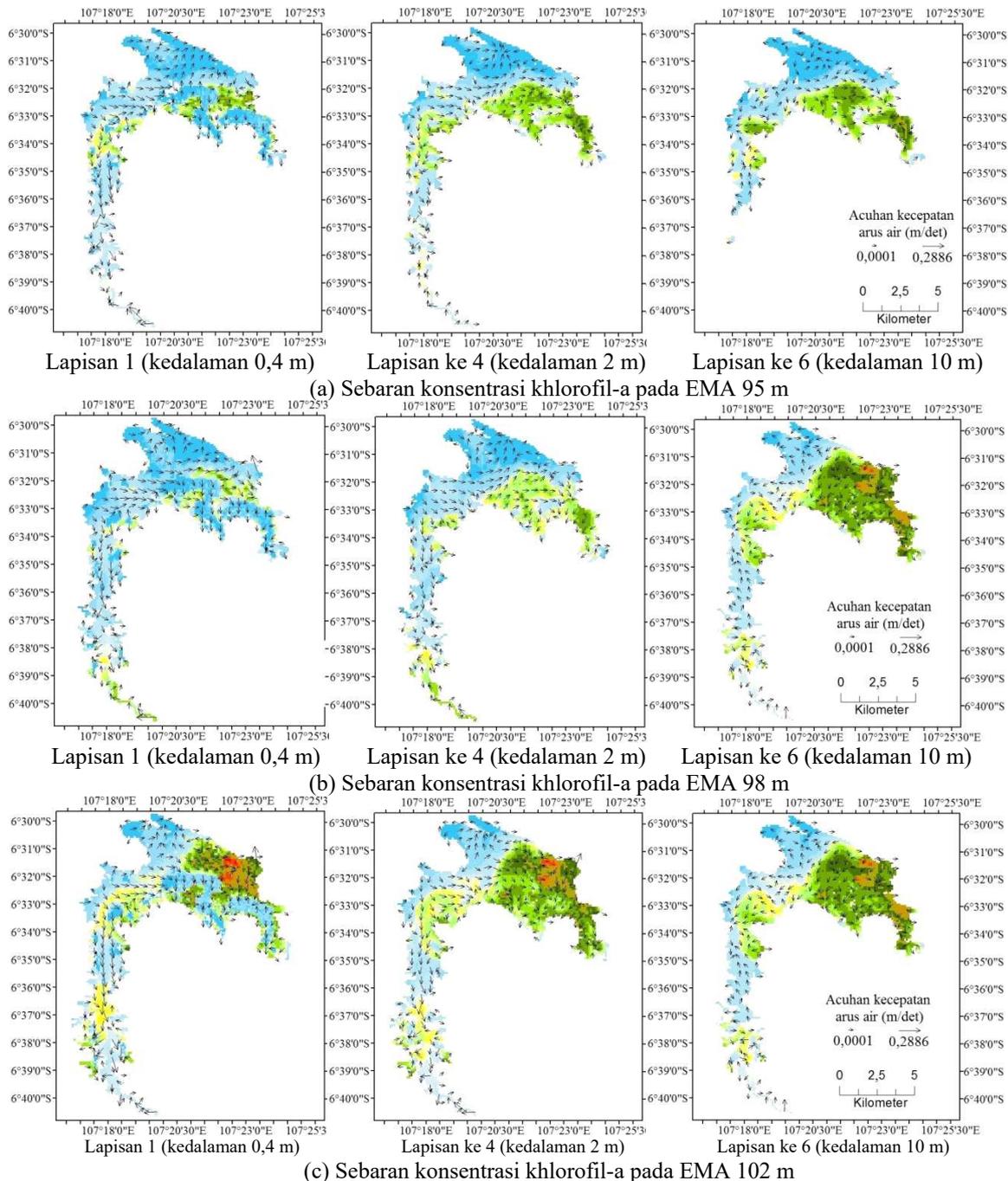
EMA 98 m di bagian hulu relatif tinggi, kemudian di bagian tengah menjadi rendah, dan di bagian hilir cenderung tinggi kembali. Pada bagian-bagian dengan konsentrasi khlorofil-a tinggi juga menunjukkan bahwa semakin dalam air waduk hingga kedalaman 10 m, semakin tinggi konsentrasi khlorofil-a di perairan.

Berdasarkan Gambar 6a, 6b, dan 6c juga dapat dilihat pola arus air di Waduk Jatiluhur pada EMA 95 m, 98 m, dan 102 m. Bagian hulu Waduk Jatiluhur pada EMA 95m, 98 m, dan 102 m memiliki pola arus air yang cenderung memutar. Sebagian arus air di bagian tengah Waduk Jatiluhur pada EMA 95 m, 98 m dan 102 m cenderung menuju ke bagian hilir waduk dan sebagian lainnya menuju ke bagian hulu waduk. Bagian hilir Waduk Jatiluhur pada EMA 95 m dan 102 m memiliki pola arus air yang cenderung berputar, sedangkan pada EMA 98 m terdapat pola arus air yang cenderung menuju ke titik effluen.

Merujuk Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau/atau Waduk, maka dari Gambar 6 dapat diketahui persentase luas status trofik sebaran konsentrasi khlorofil-a air Waduk Jatiluhur. Persentase luas status trofik dari sebaran konsentrasi khlorofil-a tersebut ditampilkan dalam Gambar 7.

Dari Gambar 7 dapat diketahui perubahan status trofik air Waduk Jatiluhur hanya terjadi di kedalaman 0 m (permukaan air) sampai dengan 30 m. Dari Gambar 7 juga dapat dilihat bahwa air Waduk Jatiluhur EMA 95m, 98 m, dan EMA 102 m berada pada status mesotrofik hingga hipertrofik. Status trofik tersebut, apabila mengacu Gambar 6, sebagian besar terjadi di bagian Hilir Waduk Jatiluhur pada kedalaman air lebih dari 15 m. Dari rangkaian Gambar 7 juga dapat dilihat persentase luas eutrofik hingga hipertrofik paling besar di air Waduk Jatiluhur adalah EMA 102 m, kemudian disusul oleh EMA 95 m dan EMA 98 m.

Sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a (Gambar 6), jika ditumpangtindihkan dengan sebaran beban influen dari KJA (Gambar 3e dan 3f), maka kedua sebaran spasial tersebut terlihat sangat berhubungan erat. Simulasi model dengan skenario menghilangkan beban influen dari KJA yang berada di bagian hilir waduk juga telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa air di bagian hilir Waduk Jatiuhur menjadi oligotrofik. Tjahjo & Purnamaningtyas (2008) di dalam kajian kualitas air di Waduk Jatiuhur juga menyatakan bahwa perkembangan budidaya ikan dengan KJA yang berada di bagian hilir Waduk Jatiluhur telah mengubah kondisi eutrofik menjadi hipertrofik.



Konsentrasi khlorofil-a (µg/l)

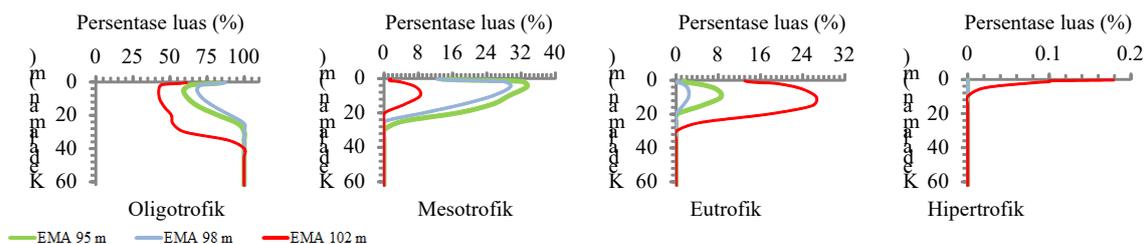
0,000001	2,500001 - 3,000000	4,400001 - 4,700000	5,660001 - 6,030000	11,070001 - 12,900000	34,920001 - 48,840000
0,000002 - 0,050000	3,000001 - 3,650000	4,700001 - 5,000000	6,030001 - 6,770000	12,900001 - 15,570000	48,840001 - 71,970000
0,050001 - 0,100000	3,650001 - 3,920000	5,000001 - 5,000000	6,770001 - 7,890000	15,570001 - 20,210000	71,970001 - 145,880000
0,100001 - 1,000000	3,920001 - 4,170000	5,000001 - 5,330000	7,890001 - 9,290000	20,210001 - 26,330000	145,880001 - 211,080000
1,000001 - 2,500000	4,170001 - 4,400000	5,330001 - 5,660000	9,290001 - 11,070000	26,330001 - 34,920000	211,080001 - 1200,00

Gambar 6. Model Sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a dan arus air Waduk Jatiluhur

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, simulasi yang diperoleh dianggap dapat memperagakan sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a yang terjadi di badan air Waduk Jatiluhur. Selanjutnya, tampak pula bahwa konsentrasi khlorofil-a di bagian hilir waduk tersebut

disebabkan oleh budidaya ikan dengan KJA yang ada di bagian hilir.

Berdasarkan model penghitungan sebaran konsentrasi khlorofil-a air Waduk Jatiluhur pada EMA 95m, 98 m, dan 102 m (Gambar 7) dapat



(d) Persentase luas Status trofik air Waduk Jatiluhur

Gambar 7. Persentase luas status trofik dari sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a di air Waduk Jatiluhur

diketahui bahwa badan air yang memiliki persentase luas eutrofik dan hipertrofik paling besar adalah pada EMA 102 m. Untuk itu, evaluasi daya tampung air Waduk Jatiluhur karena skenario budidaya KJA di zona alternatif 1, 2, 3, dan 4 dilakukan menggunakan simulasi sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a dengan model pada EMA 102 m.

Dari alternatif zona KJA (Gambar 2), telah diperoleh jumlah segmen di alternatif zona 1 adalah 581 segmen, alternatif zona 2 adalah 241 segmen, alternatif zona 3 adalah 591 segmen, dan alternatif zona 4 adalah 442 segmen. Berdasarkan segmen alternatif zona tersebut, hasil simulasi persentase luas status trofik di air Waduk Jatiluhur karena skenario budidaya ikan dengan KJA di alternatif zona 1, 2, 3 dan 4 ditampilkan pada Gambar 8.

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat perubahan persentase luas status trofik air Waduk Jatiluhur karena skenario penempatan KJA di zona alternatif 1, 2, 3, dan 4 yang hanya terjadi di kedalaman 0 m (permukaan) sampai dengan 30 m. Skenario penempatan 10 KJA/segmen di zona alternatif 1, 2, 3, dan 4 telah mengurangi persentase luas oligotrofik, sehingga persentase luas mesotrofik air Waduk Jatiluhur meningkat. Skenario penempatan 20 KJA/segmen di alternatif zona 1, 2, dan 3 telah mengurangi persentase luas oligotrofik dan meningkatkan persentase luas mesotrofik dan eutrofik air Waduk Jatiluhur, sedangkan di alternatif zona 4 juga telah mengurangi persentase luas oligotrofik namun hanya meningkatkan persentase luas mesotrofik air Waduk Jatiluhur. Skenario penempatan 30 KJA/segmen sampai dengan 50 KJA/segmen di zona alternatif 1, 2, 3, dan 4 telah mengurangi persentase luas oligotrofik dan meningkatkan persentase luas mesotrofik dan eutrofik air Waduk Jatiluhur. Skenario penempatan 60 KJA/segmen sampai 100 KJA/segmen di zona alternatif 1, 2, 3, dan 4 menyebabkan persentase luas oligotrofik semakin kecil dan persentase luas

mesotrofik dan eutrofik dan hipertrofik semakin meningkat.

PEMBAHASAN

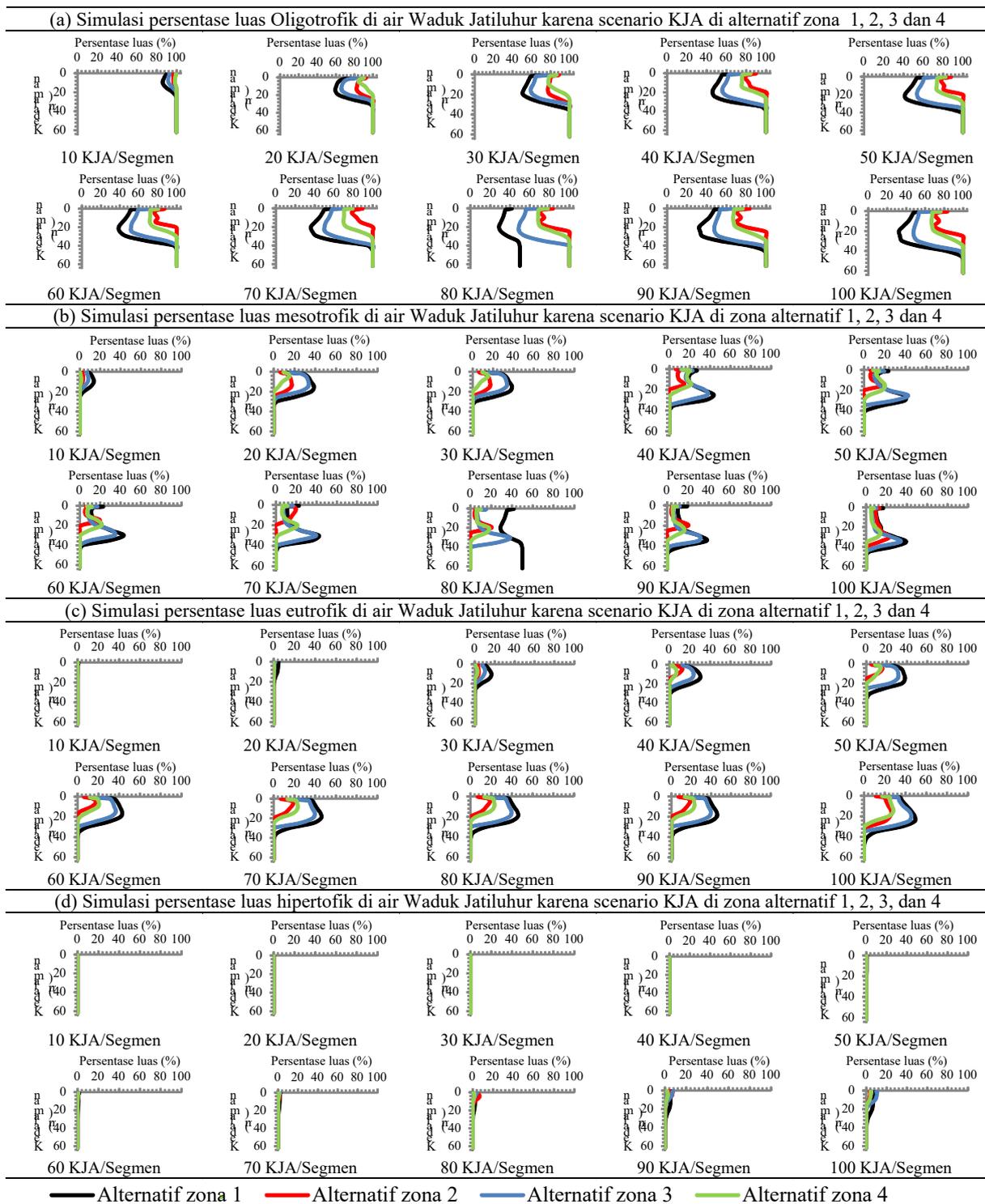
Bentuk morfometri Waduk Jatiluhur adalah memanjang, yaitu air di bagian hilir waduk paling dalam dan luas jika dibandingkan dengan bagian tengah dan hulu waduk. Di samping itu, di bagian hulu waduk tersebut juga terdapat titik efluen (Gambar 3b, 3c dan 3d). Waduk Jatiluhur pada saat EMA naik (EMA 95 m dan EMA 102 m), akan terjadi pengisian air di bagian hilir waduk dan menyebabkan terjadinya pola putaran arus air di bagian hilir waduk tersebut. Pada saat EMA sedang turun (EMA 98 m), akan terjadi pengurasan air (*“flushing”*) di bagian hilir waduk tersebut, sehingga menyebabkan aliran efluen air menyebabkan pola arus air di bagian waduk tersebut cenderung mengarah ke titik efluen. Dengan demikian, morfometri yang demikian itu telah menyebabkan waktu tinggal air di bagian hulu waduk pada EMA 95 m dan EMA 102 m lebih lama dibandingkan dengan EMA 98 m.

Budidaya ikan dengan KJA di Waduk Jatiluhur, saat ini, sebagian besar berada di bagian hilir waduk. Sementara itu, waktu tinggal air di bagian hulu waduk pada saat EMA waduk naik akan lebih lama dari saat EMA turun. Oleh karena itu, waktu tinggal nutrisi limbah budidaya ikan dengan KJA yang berada di bagian hilir waduk pada saat EMA waduk naik juga akan lebih lama dibandingkan dengan pada saat EMA waduk sedang turun. Dengan demikian, kesempatan tumbuh fitoplankton di bagian hilir waduk lebih besar pada saat kondisi elevasi muka air naik dibandingkan dengan pada saat elevasi muka air turun. Dengan hidrodinamika dan pertumbuhan fitoplankton demikian, konsentrasi khlorofil-a di bagian hilir waduk paling tinggi terdapat pada EMA 102 m, kemudian disusul EMA 95 m dan EMA 98

m. Berdasarkan hal tersebut, simulasi sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a dengan skenario penempatan KJA di alternatif zone 1, 2, 3, dan 4 dilakukan dengan model Waduk Jatiluhur pada EMA 102 m.

Lokasi alternatif zona 1, 2, dan 3 yang berada di

bagian hilir waduk, dan alternatif zona 4 yang terletak di bagian tengah waduk (Gambar 2), apabila ditumpangtindihkan dengan peta batimetri Waduk Jatiluhur, maka zona alternatif tersebut berada di kedalaman air antara 2 m sampai dengan 30 m.



Gambar 8. Simulasi persentase luas status dari skenario budidaya ikan KJA di alternatif zona air Waduk Jatiluhur

Sementara itu, petak KJA yang ada saat ini terdapat di kedalaman air antara 1 m sampai dengan 60 m. Dengan demikian, skenario alternatif zonasi KJA masih sesuai dengan kondisi empirik apabila ditinjau dari kedalaman air waduk.

Berdasarkan pada Gambar 2, skenario zona alternatif KJA yang mempunyai jarak paling dekat dengan area penyadapan air baku WT, PLTA, KJA saat ini, wisata dan olah raga air adalah zona alternatif 1, kemudian disusul zona alternatif 2, 3, dan 4. Zona alternatif 3 merupakan zona dengan segmen yang paling banyak (591 segmen), kemudian disusul oleh zona alternatif 1 (581 segmen), 4 (442 segmen), dan 2 (241 segmen).

Peningkatan persentase luas eutrofik air Waduk Jatiluhur, karena skenario peningkatan setiap 10 KJA/segmen di zona alternatif tersebut, paling cepat terjadi pada zona alternatif 1, kemudian disusul oleh alternatif zona 3, 2, dan 4. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa meskipun jumlah segmen di zona alternatif 2 kurang dari jumlah segmen pada zona alternatif 4, namun kecepatan peningkatan persentase luas eutrofik pada zona alternatif 1 lebih cepat daripada zona alternatif 4.

Dalam penelitian ini telah dilakukan simulasi model sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a dengan skenario mengubah parameter hidrodinamika adveksi dan dispersi. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa sebaran konsentrasi khlorofil-a lebih banyak dipengaruhi oleh adveksi arus air dibandingkan dengan dispersi karena perbedaan konsentrasi yang terjadi di Waduk Jatiluhur. Kecenderungan pola arus air Waduk Jatiluhur yang terjadi pada EMA 102 m, di bagian hilir waduk cenderung berputar, dan di bagian tengah waduk sebagian menuju ke bagian hilir waduk, dan sebagian lagi menuju ke bagian hulu waduk. Zona alternatif 1, 2, dan 3 berada di bagian hilir Waduk Jatiluhur. Oleh karena itu, limbah dari KJA akan cenderung terakumulasi di bagian hilir, sedangkan limbah KJA zona alternatif 4 yang berada di bagian tengah waduk sebagian diadveksi oleh arus ke bagian hilir, dan sebagian lagi diadveksi ke bagian hulu. Dengan transportasi limbah KJA demikian, nutrisi limbah KJA dari zona alternatif yang berada di bagian tengah waduk akan tersebar lebih merata dibandingkan dengan yang berada di bagian hilir waduk. Sebagai akibatnya, konsentrasi khlorofil-a oleh adanya zona alternatif yang berada di bagian tengah waduk akan lebih kecil dibandingkan dengan

yang berada di bagian hilir waduk.

Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau/atau Waduk, dan jika batas maksimum status trofik air waduk Jatiluhur ditetapkan mesotrofik, maka hasil simulasi penempatan KJA maksimum di zona alternatif 1 yang diperbolehkan adalah 10 KJA/segmen (5.810 petak), zona alternatif 2 20 KJA/segmen (4.820 petak KJA), zona alternatif 3 10 KJA/segmen (5.910 petak KJA), dan zona alternatif 4 20 KJA/segmen (8.840 petak KJA). Menurut peraturan tersebut, jika air Waduk Jatiluhur dikehendaki dalam status oligotrofik, hanya zona alternatif 4 yang dapat memenuhi, yaitu dengan jumlah maksimum KJA yang diperbolehkan sebesar 10 KJA/segmen atau sejumlah 4.420 petak KJA. Dari hasil simulasi tersebut, ternyata dengan menempatkan KJA di zona alternatif 4, daya tampung air beban pencemaran Air Waduk Jatiluhur meningkat menjadi dua kali lipat apabila dibanding dengan zona alternatif 1, 2 dan 3.

Seperti telah ditetapkan oleh Perum Jasa Tirta (PJT) II Jatiluhur, batas maksimum jumlah KJA yang diperbolehkan di Waduk Jatiluhur adalah 4.000 petak. Hasil penetapan tersebut, tidak berbedanya dengan jumlah maksimum KJA hasil simulasi dengan skenario penempatan KJA di alternatif zona. Batas maksimum jumlah KJA tersebut apabila ditempatkan di bagian hilir Waduk Jatiluhur dengan kepadatan lebih dari 10 petak KJA/segmen, maka kemungkinan eutrofikasi di air Waduk Jatiluhur pada saat EMA naik masih terjadi.

Seperti yang terlihat pada Gambar 1, area penyadap air baku WTP, pariwisata dan olah raga air berada di bagian hilir Waduk Jatiluhur. Berdasarkan pertimbangan estetika dan konsentrasi fitoplankton untuk air baku WTP, maka sebaiknya air di bagian hilir Waduk berada dalam status oligotrofik. Untuk mencapai status trofik yang demikian itu, penempatan KJA di zona alternatif 1, 2, dan 3 harus sebanyak 5 petak KJA/segmen atau 2.905 petak KJA untuk zona alternatif 1; 2.410 petak KJA untuk zona alternatif 2; dan 2.955 petak KJA untuk zona alternatif 3; sedangkan untuk alternatif zona 4 sebanyak 10 petak KJA/segmen atau 4.420 petak KJA. Zona alternatif tersebut, paling banyak dan mendekati jumlah maksimum petak KJA yang telah ditetapkan oleh Perum Jasa Tirta (PJT) II Jatiluhur adalah zona alternatif 4. Dengan demikian, zona KJA yang ada saat ini sebaiknya dipindahkan ke zona alternatif 4.

KESIMPULAN

Sebaran spasial konsentrasi khlorofil-a air Waduk Jatiluhur akibat beban influen sungai dan limbah KJA berhasil diperagakan dengan model eutrofikasi 2-dimensi berlapis. Berdasarkan peragaan tersebut, budidaya ikan dengan KJA yang ada saat ini telah menyebabkan eutrofikasi sehingga di bagian hilir Waduk Jatiluhur pada EMA 102 m airnya hipertrofik.

Simulasi alternatif zona KJA di bagian hilir waduk menunjukkan daya tampung Waduk Jatiluhur menjadi lebih rendah dibandingkan alternatif zona KJA di bagian tengah waduk, sehingga untuk melindungi kualitas air sumber baku WTP, PLTA, olah raga air dan estetika pariwisata yang berada di bagian hilir Waduk Jatiluhur, KJA yang ada saat ini sebaiknya dipindahkan ke zona alternatif 4 yang terletak di bagian tengah waduk dengan kepadatan maksimum 10 petak KJA/segmen dan dengan jumlah maksimum 4.420 petak KJA.

PERSANTUNAN

Penelitian ini merupakan penunjang dari penelitian DIP Tematik Model Rekayasa Perairan Darat Pusat Penelitian Limnologi LIPI. Ucapan terima kasih ditujukan kepada rekan-rekan laboratorium kimia air Pusat Penelitian Limnologi LIPI yang telah meminjamkan alat survey lapangan serta memberi saran dan informasi dalam analisis kimia air dan khlorofil-a.

DAFTAR PUSTAKA

- Abery, NW., Sukadi, F. Budhiman, AA. Kartamihadja, ES. Koeshendrajana, S.Buddhiman, & SS. de Silve. 2005. Fisheries and Cage Culture of Three Reservoirs in West Java, Indonesia; A Case Study of Ambitious Development and Resulting Interaction. *Fisheries Management and Ecology*. (2005): 315-330.
- Arifin, ZM. 2011. Penyebaran Ammonium, Nitrit, dan Nitrat di Waduk Jatiluhur, Purwakarta. Bandung [Tesis]: Institut Teknologi Bandung.
- AWWA. 2005. *Standard method for examination of water and wastewater*. 21th edition. ISBN: 0875530478. Washington DC.
- Bo, LX. 2008. A Coupled Model of Hydrodynamics and Water Quality for Yuqiao Reservoir in Haihe River Basin. *Journal of Hydrodynamics*. 20 (2008): 574 – 582.
- Boegman, L., Loewen, MR. Hamblin, PF. & DA. Culver. 2001. Application of a Two-Dimensional Hydrodynamic Reservoir Model to Lake Erie. *Canada Journal Fish Aquatic Science*. 58 (2001): 858 – 869.
- Chapra, SC. 1997. *Surface water-quality modeling*. The McGraw-Hill Companies. Inc. New York.
- Demetrio, JA., Gomez, LC. Latini & AA. Agostinho. 2011. Influence of Net Cage Farming on the Diet of Associated Wild Fish in a Neotropical Reservoir. *Aquaculture*. 330-333 (2012): 172-178.
- Dingguo, JD., Huichao & L. Wei. 2011. Influence of Thermal Density Flow on Hydro dynamics of Xiangxi Bay in Three Georges Reservoir, China. *Procedia Environmental Science*. 10 (2011): 1637-1645.
- Garno, YS. 2001. Beban Pencemaran Limbah Perikanan Budidaya dan Yutrofikasi di Perairan Waduk pada DAS Citarum. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 3 (2002): 112-120
- Garno, YS. 2003. Status Kualitas Perairan Waduk Juanda. *Jurnal Teknologi Lingkungan*. 4 (2003): 128 – 135.
- Harsono, E. 2012. Model numerikal 2-dimen lapis ganda amonifikasi di Waduk Jatiluhur. *Jurnal Osenologi dan Limnologi di Indonesia*. 38(1): 81 – 93.
- Harsono, E. 2013. Model distribusi spasial nitrit dan nitrat di badan air Waduk Jatiluhur. *Jurnal Limnotek Perairan Darat dan Tropis di Indonesia*. 20(1): 36 – 51.
- Harsono, E. 2015. Variabel sebaran fosfat penyebab eutrofikasi di badan air Waduk Jatiluhur. *Jurnal Osenologi dan Limnologi di Indonesia*. 41(1): 105 – 119.
- Harsono, E. 2009. Kajian hubungan antara fitoplankton dengan kecepatan arus air akbat operasi Waduk Jatiluhur. *Jurnal Biologi Indonesia*. 7(1): 99 – 120.
- Harsono, E. 2015. Model eutrofikasi 2-dimensi berlapis Waduk Cirata. *Jurnal Sumber Daya Air*. 11(1): 75 – 90.
- Kuo, JT., WS. Lung, CP. Yang, WC. Liu, MD. Yang & TS. Tang. 2005. Eutrophication Modelling of reservoirs in Taiwan. *Journal of*

- Environmental Modelling & Software*. 20(6); 641 – 650.
- Lindim, C., JL. Pinho & JMP. Vieira. 2011. Analysis of Spatial and Temporal Patterns in a Large Reservoir Using Water Quality and Hydrodynamic Modeling. *Journal of Ecological modeling*. 222 (2011): 2485-2494
- Puslitbang Teknologi Sumber Daya Air Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2000. *Pemeruman Waduk Ir. H. Juanda*. Puslibang Teknologi Sumber Daya Air Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. Bandung.
- Schnoor, JL. 1996. *Environmental Modeling, fate and transport of pollutions in water, air and soil*. John Wiley & Sons, Ins. New York.
- Sudjono, P. 2003. Preliminary Development of Horizontal Segmentation Model for Water Quality Prediction in Elongated Reservoirs. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Tarumanagara* 9 (2003): 1-15.
- Thomann, RV., J A. Mueller. 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper & Raw. Publishers Inc. New York.
- Tjahjo, DWH & SE. Purnamaningtyas. 2008. Kajian Kualitas Air dalam evaluasi Pengembangan Perikanan di Waduk Ir. H. Djuanda, Jawa Barat. *Jurnal Litbang Perikanan*, 14 (2008): 15-29.
- Xu, JK., H. Yin, JHW. Liu, D. Lee, Anderson, AYT. Ho & PJ. Harrison. 2010. A Comparison of Eutrophication Impacts in Two Harbours in Hong Kong with Different Hydrodynamics. *Journal of Marine Systems*. 83: 276-286.

