

ANTISIPASI EKOHIKRODINAMIKA PENGENDALIAN EUTROFIKASI MENDUKUNG SISTEM IRIGASI JATILUHUR YANG BERKELANJUTAN

ECOHYDRODYNAMIC ANTICIPATION FOR EUTROPHICATION CONTROL TO SUPPORT THE SUSTAINABILITY OF JATILUHUR IRRIGATION SYSTEM

Oleh:

Eko Winar Irianto

Balai Litbang Teknologi Irigasi, Bekasi, Indonesia
Jl. Cut Meutia 147 Bekasi, Jawa barat, Indonesia 17113

Komunikasi Penulis, Telp: +62-8122126974; email: ekowinar1966@gmail.com

Naskah ini diterima pada 29 Juli 2015; revisi pada 11 Agustus 2015;
disetujui untuk dipublikasikan pada 14 September 2015

ABSTRACT

Eutrophication is one of the serious problems in a reservoir which may disturb the water supply system in the downstream. Jatiluhur Dam is the reservoir with eutrophication problems. One of the methods to control water quality in Jatiluhur Reservoir is ecohydrodynamic method by utilizing Hollow Jet Valve (HJV). A comprehensive HJV operations is required to maintain the already-planned reservoir operation. This paper informs how to analyzes the effect of HJV operation to water quantity and water quality in the downstream of Jatiluhur Reservoir. Analysis result shows that the water level decreases in Jatiluhur Reservoir and increases in Curug Barage while HJV gate operation is still in line with water supply plan and reservoir operation, especially for irrigation sector. Furthermore, the result also shows that HJV operation increases BOD, Total N, and Total P pollutants and still complies with Class-3 of Indonesian National Standard of Water Quality for irrigation water. DO is the most sensitive parameters and 67% increase of BOD might develop an anaerob condition in the hypolimnion layer after the reservoir restoration. Therefore, sinergyc programs between reservoir restoration and water conservation in irrigation network are still required.

Keywords: *Hollow Jet Valve, ecosystem, reservoir, trophic status, oligotrophic, eutrophic, hidrodynamics*

ABSTRAK

Eutrofikasi adalah masalah serius bagi waduk dan dapat mengganggu sistem irigasi yang disuplai air baku dari waduk tersebut, misal: Waduk Jatiluhur menyuplai Daerah Irigasi Jatiluhur. Salah satu metoda pengendaliannya adalah secara ekohidrodinamika melalui pengoperasian *Hollow Jet Valve (HJV)*. Namun demikian, analisis antisipasi secara ekohidrodinamika diperlukan agar pengoperasian waduk dan sistem irigasi Jatiluhur tetap beroperasi sesuai yang direncanakan. Tulisan ini menginformasikan cara melakukan analisis antisipasi baik secara kuantitas maupun kualitas pengaruh pengoperasian HJV mendukung pengelolaan sistem irigasi Jatiluhur yang berkelanjutan. Hasil analisis antisipasi pengoperasian HJV yang terdiri dari menurunnya tinggi muka air waduk, meningkatnya tinggi muka air pada Bendung Curug dan potensi ketersediaan air yang dapat disediakan oleh aliran utama dan lokal pada Waduk Kaskade Citarum menunjukkan bahwa pasokan air irigasi secara berkelanjutan masih sesuai dengan prosedur operasi yang telah ditetapkan. Hasil analisis kualitas air juga menunjukkan bahwa pengeluaran air melalui HJV menurunkan kualitas air parameter BOD, Total N and Total P, namun masih sesuai kelas 3 standar nasional kualitas air untuk air irigasi. DO adalah parameter yang paling sensitif dan Beban BOD naik 67% menyebabkan terjadinya kondisi anaerob pada lapisan hipolimnion pasca restorasi waduk. Namun demikian, diperlukan upaya sinergis antara program restorasi waduk dengan konservasi kualitas air di jaringan irigasi.

Kata kunci: *Hollow Jet Valve, ekosistem, waduk, status trofik, oligotrofik, eutrofik, hidrodinamika*

I. PENDAHULUAN

Akumulasi senyawa nutrisi yang tinggi menyebabkan timbulnya proses eutrofikasi yang merupakan masalah serius pada pengelolaan kualitas air baik waduk maupun danau. Waduk yang berstatus eutrofik-hipereutrofik akan mengalami berbagai permasalahan, berupa gangguan estetika terutama bau yang menyengat, gangguan transportasi, rendahnya transparansi, berkurangnya kadar oksigen terlarut serta munculnya zat-zat beracun, misal: *microcystin* (Jorgensen, 2003).

Davis and Shaw (2015) menyatakan bahwa waduk yang berstatus hipereutrofik akan mengganggu pengoperasian sistem irigasi baik dari segi pasokan maupun terjadinya penyuburan pada air baku pada jaringan irigasi. Pasokan air baku akan berkurang akibat proses evapotranspirasi yang tinggi dan adanya gangguan pengoperasian waduk akibat proses korosi. Status penyuburan yang berlebihan pada air baku irigasi juga akan mempermudah penyebaran senyawa yang bersifat toksik. Karena itu, diperlukan pengoperasian waduk yang dapat mengurangi potensi terjadinya proses eutrofikasi waduk, agar pasokan air baku untuk irigasi tidak terganggu baik secara kuantitas maupun kualitas.

Viksburg (1995) menginformasikan bahwa hidrodinamika waduk berpengaruh terhadap peningkatan maupun penurunan kadar klorofila yang merupakan indikator utama timbulnya eutrofikasi waduk. Metode perbaikan kualitas air ini dengan cara mengeluarkan air dari lapisan hipolimnion, sehingga akumulasi senyawa fosfor yang berlebihan pada waduk dapat dikurangi.

Irianto *et al.* (2014) menyatakan bahwa berdasarkan simulasi menggunakan piranti lunak WASP (*Water Quality Analysis Simulation Program*) kapasitas optimum pengoperasian *Hollow Jet Valve* (HJV) untuk mengurangi akumulasi beban pencemar nutrisi pada lapisan hipolimnion Waduk Jatiluhur adalah 50 m³/s dengan waktu operasi 24 jam setiap bulan. Berdasarkan konsep di atas perlu dilakukan analisis antisipasi pengaruh pengoperasian HJV terhadap infrastruktur waduk secara kuantitas maupun kualitas pada saat maupun setelah pengoperasian.

Tulisan ini bertujuan untuk menginformasikan cara menganalisis pengaruh pengeluaran lapisan hipolimnion waduk untuk perbaikan kualitas air serta mengantisipasi pengaruh pengoperasian HJV secara kuantitas maupun kualitas. Dengan analisis antisipasi tersebut pengoperasian waduk dan sistem pengelolaan air irigasi Jatiluhur tetap

berlangsung sesuai dengan pedoman operasi dan standar yang telah ditetapkan. Parameter-parameter pengoperasian waduk yang perlu diantisipasi diantaranya adalah perubahan tinggi muka air pada waduk dan bangunan pembagi, prosentase bukaan HJV dan parameter kualitas air terutama zat organik dan senyawa nutrisi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengaruh Eutrofikasi pada Sistem Irigasi

Waduk merupakan salah satu sumber pemasok air baku yang memiliki multifungsi diantaranya untuk air irigasi. Karena itu, bila suatu waduk telah mengalami status hipereutrofik, maka air baku irigasi tersebut juga akan mengalami pertumbuhan alga yang berlebihan akibat kandungan senyawa nutrisi yang tinggi. Davies dan Shaw (2015) menyatakan bahwa selain terjadi gangguan ekosistem, pertumbuhan ganggang secara berlebihan pada saluran irigasi akan mempermudah penyebaran senyawa amonia, sebagai akibat meningkatnya kadar pH. Senyawa nitrat dengan kadar lebih dari 10 mg/L dan *cyanobacteria* (*blue-green algae*) dapat menghasilkan zat toksik pada air irigasi. PP 82/2001 mengamanatkan bahwa kadar senyawa nitrat pada air baku yang layak untuk irigasi sebaiknya lebih kecil dari 20 mg/L, fosfat total lebih kecil dari 5 mg/L, zat organik lebih kecil dari 12 mg/L BOD dan oksigen terlarut tidak dalam kondisi anaerobik.

Goel and Tiwari (2013) menyatakan bahwa status hipereutrofik pada sumber air termasuk waduk akan meningkatkan alkalinitas pada saluran irigasi permukaan. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya kondisi *water logging* dan *salinization* yang akan meningkat bila sistem drainase tidak mencukupi, sehingga menyebabkan zona akar tidak baik untuk pertumbuhan tanaman.

Bagad (2009) juga mengindikasikan bahwa air irigasi yang sangat subur dan kaya mineral menyebabkan proses *water logging* pada tanah, sebagai akibat terjadinya kejenuhan tanah terhadap senyawa nutrisi maupun mineral lainnya yang masuk ke dalam pori-pori tanah. Percival dan Keany (2008) menyatakan bahwa proses *water logging* terjadi akibat kurangnya proses difusi antara gas-gas di atmosfer dan zona akar. Berkurangnya kandungan oksigen pada zona akar sebesar 15% menyebabkan gangguan pada proses fisiologi tanaman.

Serpil (2012) menjelaskan bahwa kandungan nitrogen dan fosfor yang tinggi pada air irigasi menyebabkan tingkat keasaman pada tanah juga akan meningkat, sehingga menurunkan hasil pertanian dalam jangka panjang dan akan

berkontribusi pada efek gas rumah kaca pada lapisan atmosfer yang berpotensi menimbulkan pemanasan global. Kondisi tersebut disebabkan berlangsungnya proses-proses biokimia pada air irigasi dengan kesuburan tinggi, sehingga mengemisikan gas-gas NO, N₂O, NO₂, selain gas karbon dioksida (CO₂), metan (CH₄), hidrogen sulfida (H₂S).

2.2. Hidrodinamika dan Kualitas Air Waduk

Hurtado (2006) menjelaskan bahwa hidrodinamika aliran mempengaruhi terjadinya stratifikasi waduk, yang cenderung menghambat proses pencampuran atau *mixing process*, terutama proses transfer panas atau *heat transfer*. Waduk yang memiliki lapisan metalimnion yang tajam mengakibatkan proses pencampuran sulit terjadi.

Chau and Jin (2002) menyatakan bahwa perubahan masa jenis air akan meningkatkan perubahan secara vertikal konsentrasi pencemar karena pencampuran secara vertikal yang makin lemah. Kondisi tersebut menyebabkan kadar oksigen terlarut pada lapisan dasar yang berguna untuk proses fotosintesis fitoplankton akan makin sedikit dan cenderung anoksik. Kondisi tersebut terjadi akibat kurangnya pasokan oksigen dari permukaan, sebagaimana diperlihatkan Gambar 1.

Gang Ji (2008) menginformasikan bahwa proses transport vertikal dipengaruhi oleh parameter fisik (misal: suhu) dan meteorologis (misal: kecepatan angin dan intensitas penyinaran matahari). Selain itu, parameter biokimia (misal: pH, Oksigen terlarut, Total N, Total P) juga memicu terjadinya proses eutrofikasi terutama akibat akumulasi beban pencemar dari internal.

Balcerzak (2006) menjelaskan bahwa terdapat lima metoda yang sering digunakan dalam pemulihan beban internal waduk, yaitu: (a) pengurangan sedimen dasar (*bottom sediment removal*); (b) inaktivasi persenyawaan biogenik (*inactivation biogenic compound*); (c) biooksidasi sedimen dasar (*biooxidation bottom sediment*); (d) aerasi waduk (*lake aeration*); dan (e) pengeluaran air hipolimnion (*evacuation of hypolimnion bottom water*).

2.3. Ekohidrodinamika Kualitas Air Waduk

Fuente and Nino (2007) menjelaskan bahwa aliran masuk maupun keluar dari ekosistem waduk mempengaruhi proses hidrodinamika

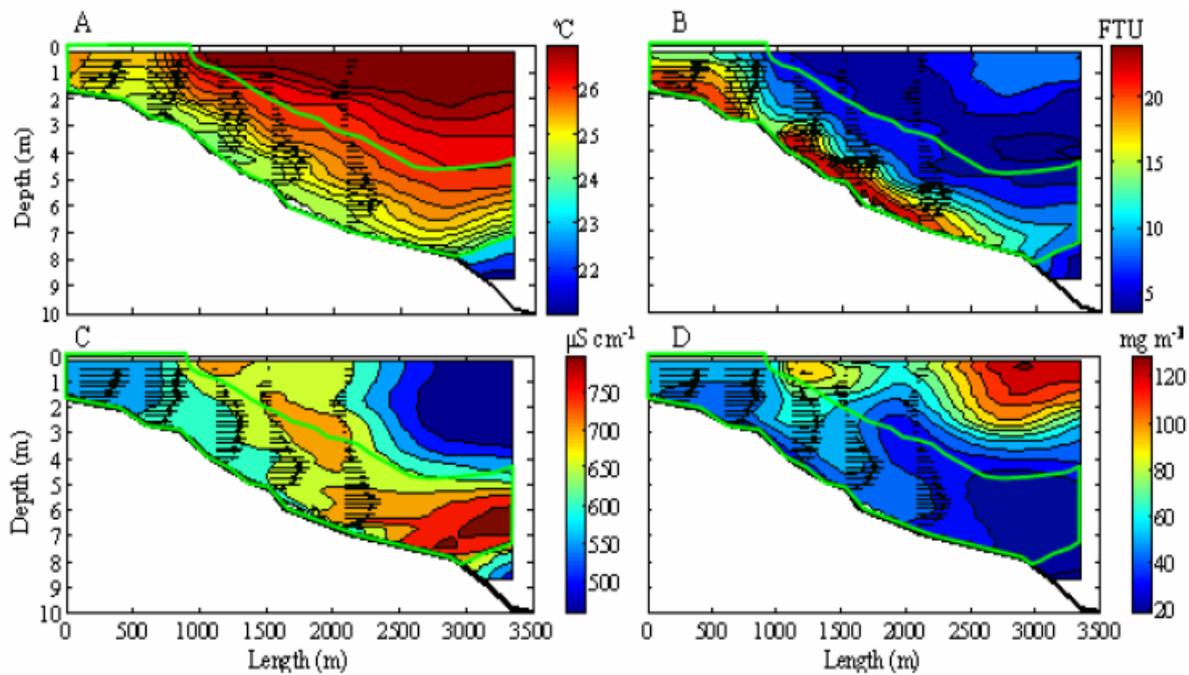
waduk, sehingga fluks aliran menjadi parameter penting pada model ekosistem waduk. Analisis ekohidrodinamika digunakan untuk memprakirakan terjadinya proses eutrofikasi akibat perubahan eksternal maupun internal waduk, serta dapat menentukan beban nutrisi maksimum yang masuk untuk mencegah timbulnya proses eutrofikasi waduk.

Jorgensen (2003) menyatakan bahwa pengoperasian debit aliran sangat berkaitan erat dengan faktor waktu tinggal (*residence time*), yang menjadi faktor penting dan menentukan terhadap kualitas air waduk. Ling *et al.*, (2007) juga menginformasikan bahwa ekosistem pada badan air, sungai maupun waduk, sangat dipengaruhi oleh pengaturan atau pengoperasian debit aliran.

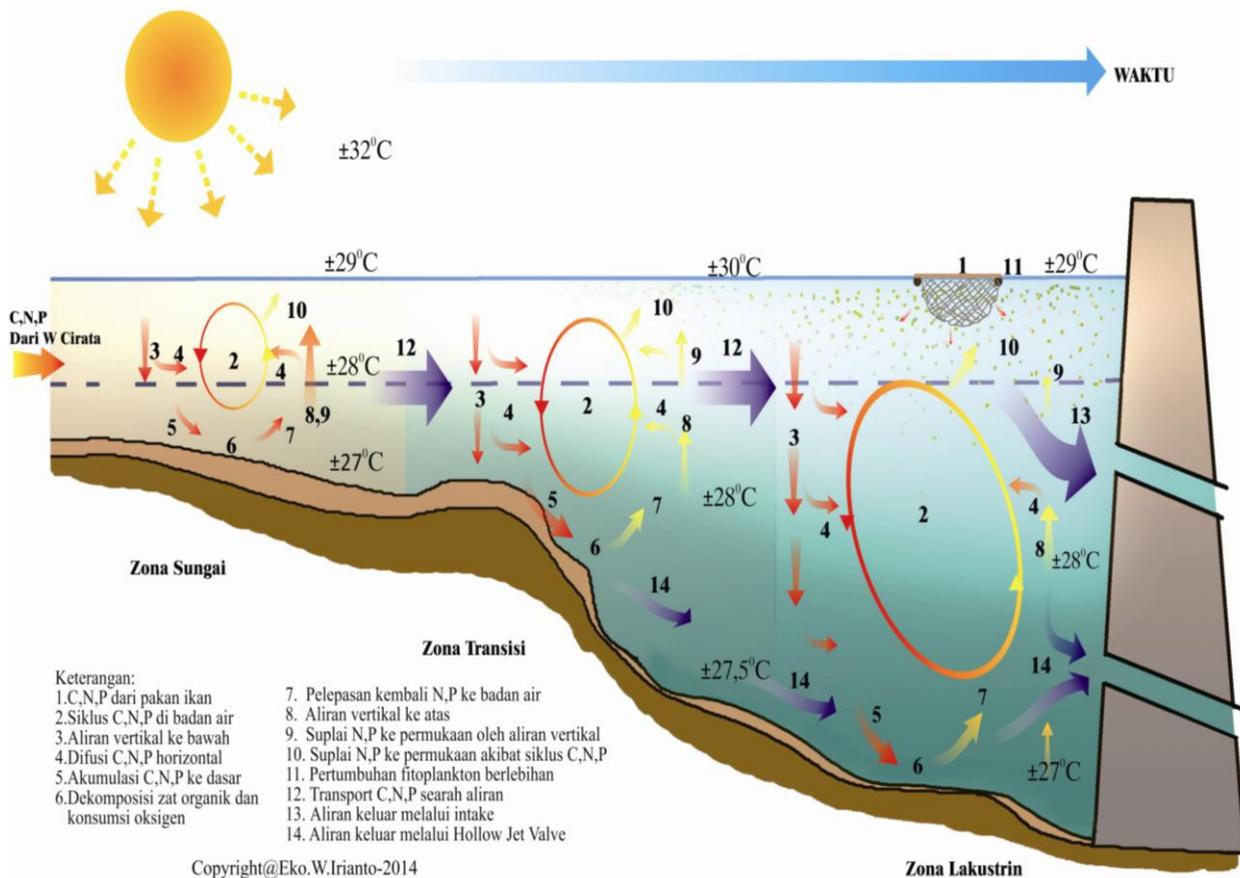
Naithani *et al.* (2007) menjelaskan bahwa metode ekohidrodinamika dapat diaplikasikan untuk menentukan kebutuhan debit lingkungan (*Environmental Flow Requirements*) agar pertumbuhan fitoplankton pada waduk, tidak berlebihan. Cooke *et al.* (2005) menyatakan bahwa metoda ekohidrodinamika sangat sesuai untuk pengendalian eutrofikasi akibat beban pencemar internal waduk

Untuk mendapatkan metoda pengoperasian waduk yang efisien dan berkelanjutan, analisis ekohidrodinamika membutuhkan data-data masukan, sebagai berikut: (a) data rata-rata kapasitas aliran masuk dan keluar; (b) data rata-rata konsentrasi aliran masuk, keluar dan zat pencemar internal yang terkait proses eutrofikasi; (c) data profil waduk berdasarkan peta batimetri, dan (d) data temperatur pada permukaan, dalam dan dasar waduk (Gambar 1).

Gambar 2 menunjukkan skema faktor-faktor yang memicu terjadinya proses eutrofikasi dan pengendalian secara ekohidrodinamika di Waduk Jatiluhur yang beriklim tropis. Beban pencemar Karbon, Nitrogen dan Fosfor dari sisa pakan ikan maupun dari Waduk Cirata terakumulasi ke dasar waduk akibat gravitasi. Pada dasar waduk terjadi proses dekomposisi anaerobik menghasilkan CO₂ dan H₂S. Selanjutnya, senyawa nutrisi terutama fosfor dilepaskan kembali ke kolom air. Suplai nutrisi dari dasar ditambah dengan produksi nutrisi dari siklus nutrisi serta adanya transport vertikal ke lapisan epilimnion dan dibantu proses fotosintesis oleh sinar matahari akan memicu terjadinya *alga bloom* pada Waduk Jatiluhur (Irianto, 2014).



Gambar 1 Model Vertikal Parameter Hidrodinamika dan Zat Pencemar pada Waduk: a. Temperatur; b. Kekeruhan; c. Konduktifitas, dan d. Klorofil-a (Hurtado, 2006).



Gambar 2 Skema Proses Pendukung dan Pemicu Terjadinya Proses Eutrofikasi dan Upaya Pengendalian Secara Ekohidrodinamika di Waduk Jatiluhur (Irianto, 2014)

Gambar 2 menunjukkan skema pengendalian proses eutrofikasi menggunakan konsep ekohidrodinamika dengan cara mengatur pintu pengeluaran lapisan hipolimnion waduk tercemar. Pengeluaran akumulasi senyawa nutrisi pada lapisan hipolimnion dasar diharapkan suplai senyawa nutrisi ke lapisan epilimnion yang berasal dari dasar maupun dari siklus Karbon, Nitrogen dan Fosfor akan berkurang

III. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Waduk Jatiluhur diawali dengan studi pustaka yang mencakup data-data kuantitas dan kualitas air. Diagram alir metode penelitian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.

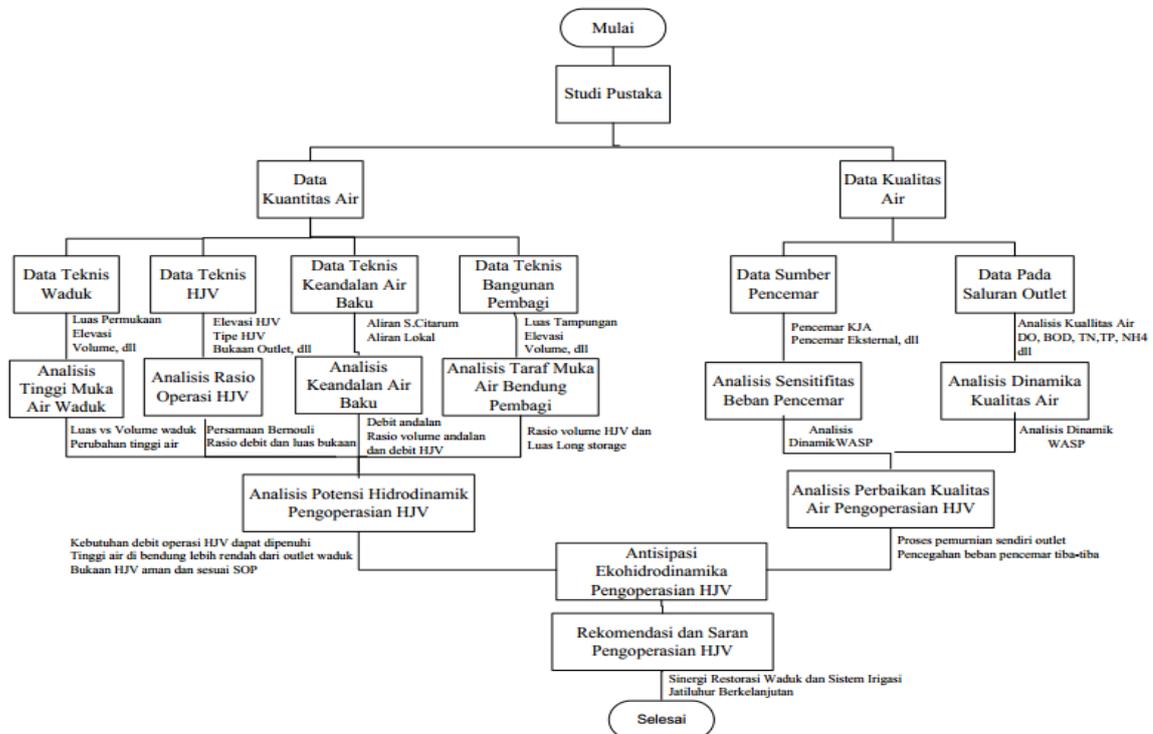
Analisis kuantitas air terdiri dari analisis- analisis sebagai berikut (Irianto, 2014):

1. Analisis perubahan tinggi muka air dilakukan dengan membandingkan antara data volume dan luas permukaan waduk;
2. Analisis pengoperasian optimum HJV ditentukan dengan menggunakan persamaan Bernoulli dan data teknis pengoperasian HJV yaitu elevasi dan diameter bukaan HJV;
3. Analisis ketersediaan air baku, ditentukan dengan cara membandingkan antara data volume sungai dan anak-anak sungai di sub DAS Citarum Hulu pada kondisi normal, kering dan minimum ditambah aliran lokal yang masuk ke waduk kaskade Citarum,

4. Analisis perubahan taraf muka air bangunan pembagi, ditentukan berdasarkan perbandingan antara volume daya tampung *long storage* Bendung Curug dengan luas permukaan dari outlet Waduk Jatiluhur ke Bendung Curug. Penentuan luas permukaan *long storage* dilakukan menggunakan *Google Earth*.

Analisis kualitas air terdiri dari analisis- analisis sebagai berikut:

1. Analisis dinamika kualitas air pada saluran *outlet* waduk dengan data pengukuran lapangan sepanjang aliran, sehingga dapat ditentukan potensi perbaikan sendiri zat pencemar, terutama senyawa organik dan nutrisi (Total Nitrogen dan Total Fosfor).
2. Analisis sensitifitas terhadap beban pencemaran, ditentukan berdasarkan pengaruh kenaikan beban zat pencemar terhadap timbulnya status trofik waduk terutama di *zona* lakustrin dengan piranti lunak WASP. WASP merupakan piranti lunak dengan analisis perhitungan yang berbasiskan segmen volume. WASP juga merupakan piranti lunak yang bersifat *public domain* yang diproduksi oleh US EPA (Wool *et al.*, 2011).



Gambar 3 Diagram Alir Metodologi Analisis Antisipasi Ekohidrodinamika Pengaruh Pengoperasian HJV untuk Mendukung Sistem Irigasi Waduk Jatiluhur Berkelanjutan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Tingkat kesuburan perairan Waduk Jatiluhur menurut kandungan fosfat dan nitrogennya, perairan telah berubah dari eutrofik pada tahun 2004 menjadi hipereutrofik pada tahun 2005 (Siregar dan Mayasari, 2010). Degradasi tersebut cenderung meningkat seiring dengan peningkatan jumlah unit Keramba Jaring Apung (KJA) yang dikembangkan di Waduk Cirata dan Waduk Jatiluhur. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengembangan kegiatan budidaya dalam KJA telah melampaui daya dukungnya dan cenderung telah mencemari perairan, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.

Nastiti *et al.*, (2001) menyatakan beban N dan P masing-masing telah mencapai 36.531 ton/tahun dan 33.968 ton/tahun, sehingga menyebabkan

waduk dalam keadaan eutrofikasi. Siregar dan Mayasari (2010) menjelaskan bahwa berdasarkan Keputusan Bupati Purwakarta No.06/2000, jumlah KJA ditetapkan maksimum 2.100 petak. Namun demikian megacu hasil inventarisasi oleh PJT II pada Desember 2009 ditemukan 19.845 petak. Data teknis bangunan bendung dan outlet Waduk Jatiluhur ditunjukkan pada Gambar 5.

4.2. Analisis Pengaruh Kuantitas Air

1. Analisis Perubahan Tinggi Muka Air

Berdasarkan korelasi antara luas permukaan air dan volume air Waduk Jatiluhur, maka analisis perubahan tinggi muka air dilakukan pada kondisi muka air maksimum dan minimum. Hasil analisis perubahan taraf muka air Waduk Jatiluhur akibat dari pengoperasian HJV dengan kapasitas 50 m³/s dalam waktu 24 jam tiap bulan selengkapnya tercantum pada Tabel 1.

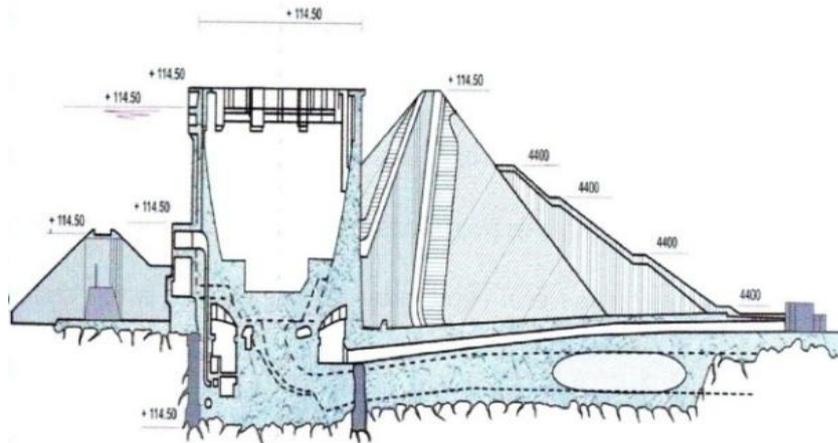
Tabel 1 Analisis Penurunan Tinggi Muka Air Waduk Jatiluhur Akibat Pengoperasian HJV

Kondisi Waduk	Luas Permukaan		Penurunan Tinggi Muka Air (cm)
	km ²	m ²	
Minimum	40	40.000.000	10,8
Maksimum	80	80.000.000	5,4

Keterangan: Operasi HJV :50 m³/s selama 24 jam per bulan
 Sumber: Irianto (2014)



Gambar 4 Peta Sebaran Keramba Jaring Apung di Waduk Jatiluhur (Irianto, 2014)



Gambar 5 Dam dan Outlet Waduk Jatiluhur (PJT II, 2008)

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut: (Irianto, 2014).

Volume pengoperasian HJV 50 m³/s selama 24jam adalah = 50 m³/s x 24 x 3600 s = 4.320.000m³

Luas permukaan minimum 40 km² = 40.000.000 m²

Perubahan taraf muka air pada pengoperasian minimum = 4.320.000 m³/40.000.000 m² = 0,108 m = 10,8 cm

Mengacu pada hasil analisis Tabel 1 menunjukkan bahwa penurunan muka air akibat pengoperasian HJV dengan kapasitas 50 m³/s selama 24 jam adalah dalam kisaran 5,4 sampai 10,8 cm.

2. Analisis Rasio Pengoperasian Bukaannya HJV

Kelayakan pengoperasian HJV dengan kapasitas 50 m³/s dalam 24 jam tiap bulan memerlukan suatu analisis untuk mengantisipasi kapasitas bukaan maksimum HJV yang menurun akibat pengaruh korosifitas (Irianto dkk, 2014). Analisis rasio kapasitas pengoperasian HJV dilakukan menggunakan persamaan Bernouli yang tercantum pada Persamaan 1: (Irianto, 2014)

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \dots(1)$$

$$P_1 = P_2 = P_0; V_1 = 0 \dots\dots\dots(2)$$

Bukaan HJV pada taraf muka air maksimum: (Irianto, 2014)

$$h_2 = (\text{elevasi maksimum} - \text{elevasi HJV}) = (107 - 45) = 62 \text{ m};$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} = (2 \times 9,81 \times 62)^{1/2} = 34,85 \text{ m/s}$$

Diameter bukaan maksimum HJV = 1.310 mm = 1,31 m (PJT II, 2008);

Luas bukaan maksimum HJV = $(\pi/4 \times 1,31^2) \text{ m}^2 \times 34,85 \text{ m/s} = 46,95 \text{ m}^3/\text{s} = 47 \text{ m}^3/\text{s}$ per unit;

Debit maksimum HJV = 2 unit x 47 m³/s per unit = 94 m³/s.

Rasio debit pengoperasian dan kapasitas maksimum HJV pada taraf muka air maksimum:

$$50 / 94 \times 100\% = 53\%$$

Bukaan HJV pada taraf muka air minimum : (Irianto, 2014)

$$h_2 = (\text{elevasi minimum} - \text{elevasi HJV}) = (88 - 45) = 43 \text{ m};$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} = (2 \times 9,81 \times 43)^{1/2} = 29,05 \text{ m/s}$$

Diameter bukaan maksimum HJV = 1.310 mm = 1,31 m;

Luas bukaan maksimum HJV = $(\pi/4 \times 1,31^2) \text{ m}^2 \times 29,05 \text{ m/s} = 39,18 \text{ m}^3/\text{s} = 39 \text{ m}^3/\text{s}$ per unit;

Debit maksimum HJV = 2 unit x 39 m³/s per unit = 78 m³/s

Rasio debit pengoperasian dan kapasitas HJV pada kondisi taraf muka air minimum :

$$50/78 \times 100\% = 64\%$$

Hasil analisis menunjukkan bahwa HJV Waduk Jatiluhur dapat dioperasikan pada kapasitas 50 m³/s selama 24 jam setiap bulan, dengan cara membuka HJV dengan rasio bukaan 53% pada taraf muka air maksimum, sedangkan pada taraf muka air minimum memiliki rasio bukaan 64% yang masing-masing dibuka selama 24 jam.

3. Analisis Perubahan Tinggi Muka Air Pada Bangunan Pembagi

Aliran yang dikeluarkan oleh Waduk Jatiluhur ditransmisikan ke pengguna melalui bangunan pembagi (Bendung Gerak Curug) yang berfungsi sebagai *long storage* pada operasi muka air normal, yaitu pada elevasi +26,7 m diatas permukaan laut (PJT II, 2008). Bendung Curug memiliki volume tampungan sebesar 3.000.000 m³, yang menampung aliran keluar Waduk Jatiluhur dan masukan dari Sungai Cikao Berdasarkan data tersebut, waktu tinggal Bendung Curug sebagai *long storage* adalah: (Irianto, 2014)

$$T_d = \frac{V_{ls}}{Q_i} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

T_d : Waktu detensi *long storage* (sekon)

V_{ls} : Volume *long storage* maksimum (m³)

Q_i : Debit outlet maksimum (m³/s)

$$T_d = \frac{3.000.000 \text{ m}^3}{3.000 \text{ m}^3/\text{s}} = 1000 \text{ sekon}$$

Volume akibat penambahan debit akibat pengoperasian HJV 50 m³/s = 50 m³/s x 1000 s = 50.000 m³

Luas permukaan long storage rata-rata : 672.110 m² (analisis *Google Earth*, November 2013) Penambahan ketinggian rata-rata akibat pengoperasian HJV: (Irianto, 2014)

$$\Delta h = \frac{V_{hJV}}{A_s} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

Δh : perubahan tinggi muka air (m)

V_{hJV} : Volume pengoperasian HJV (m³)

A_s : Luas permukaan long storage (m²)

Perubahan ketinggian akibat pembukaan HJV 50 m³/s selama 24 jam adalah:

$$\Delta h = \frac{V_{hJV}}{A_s} = \frac{50.000 \text{ m}^3}{672.100 \text{ m}^2} = 0,0744 \text{ m} = 7,4 \text{ cm}$$

Tinggi muka air akibat pengoperasian HJV +26,8 m dpl pada debit 50 m³/s dalam 24 jam tersebut masih jauh lebih rendah daripada elevasi

dasar saluran tertutup outlet Waduk Jatiluhur yaitu +29 m dpl (PJT II, 2008).

4. Analisis Keandalan Air Baku

Pengoperasian HJV untuk perbaikan kualitas air, membutuhkan debit sebesar 50 m³/s selama 24 jam tiap bulan secara teratur (Irianto dkk, 2014). Volume pengoperasian HJV Waduk Jatiluhur selama satu tahun adalah (Irianto, 2014):

$$50 \text{ m}^3/\text{s} \times 86.400 \text{ s} \times 12 = 51.840.000 \text{ m}^3/\text{tahun}$$

Mengacu pada Tabel 2 menunjukkan bahwa volume sungai dan anak-anak sungai di sub DAS Citarum Hulu pada kondisi normal, kering dan minimum dalam satu tahun, masing-masing adalah: 1.708.570.000 m³, 1.155.800.000 m³ dan 244.470.000 m³. Rasio penggunaan air untuk kebutuhan pengoperasian HJV adalah sebagai berikut (Irianto, 2014):

$$\text{Rasio pada debit normal} : \frac{51.840.000 \text{ m}^3}{1.708.570.000 \text{ m}^3} = 3\%$$

$$\text{Rasio pada debit kering} : \frac{51.840.000 \text{ m}^3}{1.155.800.000 \text{ m}^3} = 4\%$$

$$\text{Rasio debit minimum} : \frac{51.840.000 \text{ m}^3}{244.470.000 \text{ m}^3} = 21\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan pengoperasian HJV secara teratur dapat dipenuhi oleh Sungai Citarum beserta anak-anak sungai yang berada di daerah tangkapan Waduk Cirata dan Jatiluhur. Kondisi tersebut dikarenakan rasio volume pada kondisi normal, kering dan minimum tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan volume kebutuhan pengoperasian HJV 50 m³/s selama 24 jam tiap bulan (Irianto, 2014).

Pembangunan waduk pada daerah hulu DAS Cikapundung dapat meningkatkan debit pada musim kering sebesar 60,28% (Sabar, 2006). Karena itu, mengacu pada hasil analisis Tabel 2 menunjukkan bahwa pengoperasian HJV Waduk Jatiluhur secara teratur juga dapat dipenuhi dengan cara membangun waduk pada salah satu anak sungai di daerah hulu DAS Citarum.

Tabel 2 Perbandingan Pengoperasian HJV dengan Volume Andalan yang Masuk ke Waduk Kaskade Citarum

Aliran ke Waduk	Keandalan Volume (Juta m ³ /tahun) ¹⁾			Prosentase Operasi HJV (%) ²⁾		
	50%	70%	90%	50%	70%	90%
Aliran ke Waduk Saguling	2.510	1.350	454	2,07	3,84	11,42
Aliran Lokal Waduk Cirata	2.290	1.340	486	2,27	3,87	10,67
Aliran Lokal Waduk Jatiluhur	483	313	72	10,74	16,54	72,74
Total	5.273	3.003	1.012	0,98	1,73	5,13

Keterangan: Operasi HJV : 50 m³/s selama 24 jam per bulan atau 50 Juta m³/tahun;

Sumber: ¹⁾ Moerwanto, 2010; ²⁾ Irianto, 2014

4.3. Analisis Pengaruh Terhadap Kualitas Air

1. Analisis Dinamika kualitas air pada Saluran HJV

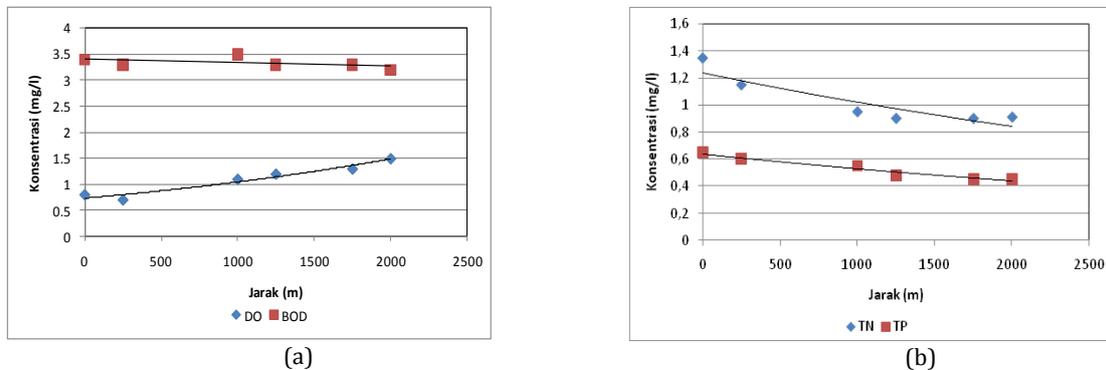
Gambar 6 (a) dan (b) menggambarkan perubahan alami parameter pencemar zat organik (sebagai BOD) dan kadar oksigen terlarut pada badan air yang menerima aliran pada saat pengoperasian HJV. Gambar 6 (a) menunjukkan bahwa proses pemulihan alami parameter oksigen terlarut diperkirakan akan tercapai pada 10 km setelah *bottom outlet* Waduk Jatiluhur atau pada Bendung Curug. Gambar 6 (b) juga memperlihatkan bahwa Total N dan Total P mengalami penguraian secara alami terjadi mulai keluar dari HJV sampai jarak 2 km ke arah hilir dan selanjutnya kadar Total N dan Total P mengalami kestabilan (Irianto, 2014). Gambar 6 tersebut menunjukkan bahwa pengoperasian HJV menyebabkan peningkatan kadar Total N dan Total P mulai dari *outlet* Waduk Jatiluhur sampai Bendung Curug. Namun demikian, masih sesuai kategori Kelas II dan III yaitu berfungsi sebagai sumber air baku irigasi dan perikanan (PP Nomor 82 Tahun 2001).

Akibat terjadinya proses penguraian anaerob pada lapisan hipolimnion dasar Waduk Jatiluhur, maka pengoperasian HJV juga akan mengemisikan Gas Amonia (NH_3) dan Asam Sulfida (H_2S) yang

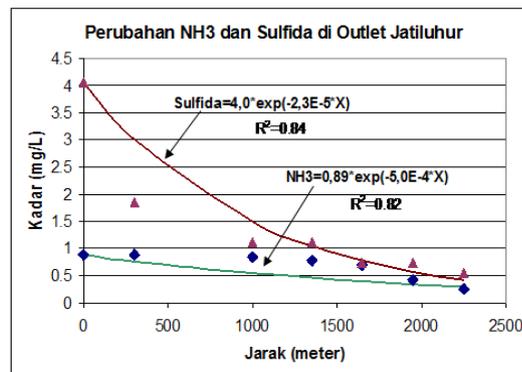
bersifat korosif ke udara. Namun demikian, berdasarkan hasil pengukuran lapangan sepanjang aliran keluar Waduk Jatiluhur menunjukkan bahwa Gas NH_3 dan H_2S , yang terlarut dalam aliran mengalami penurunan, hingga mendekati nol pada jarak sekitar 2 km dari outlet Waduk Jatiluhur, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7 (Irianto, 2007).

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa zona hijau yang terletak di antara outlet Waduk Jatiluhur sampai dengan bangunan pembagi dapat berfungsi untuk perbaikan kualitas air secara alami atau *self purification*. Bagad (2009) menjelaskan bahwa sabuk hijau (*green belt*) dapat dimanfaatkan sebagai *buffer zone* untuk menjaga bahkan memperbaiki kualitas air secara alami.

Gunkel dan Sobral (2007) juga menjelaskan bahwa *buffer zone* tersebut juga layak diterapkan di sekitar waduk untuk mencegah atau mengurangi terjadinya pencemaran senyawa organik maupun nutrien yang bersifat tersebar yang akan masuk ke waduk. Karena itu, sabuk hijau yang telah ada di Waduk Jatiluhur baik sekitar waduk maupun setelah *outlet* waduk sampai bangunan pembagi harus dipertahankan bahkan ditingkatkan areanya.



Gambar 6 Profil Perubahan Kualitas Air pada Saluran Outlet Waduk Jatiluhur (a) Zat Organik (BOD) dan Oksigen Terlarut; (b) Total N dan Total P (Irianto, 2014)



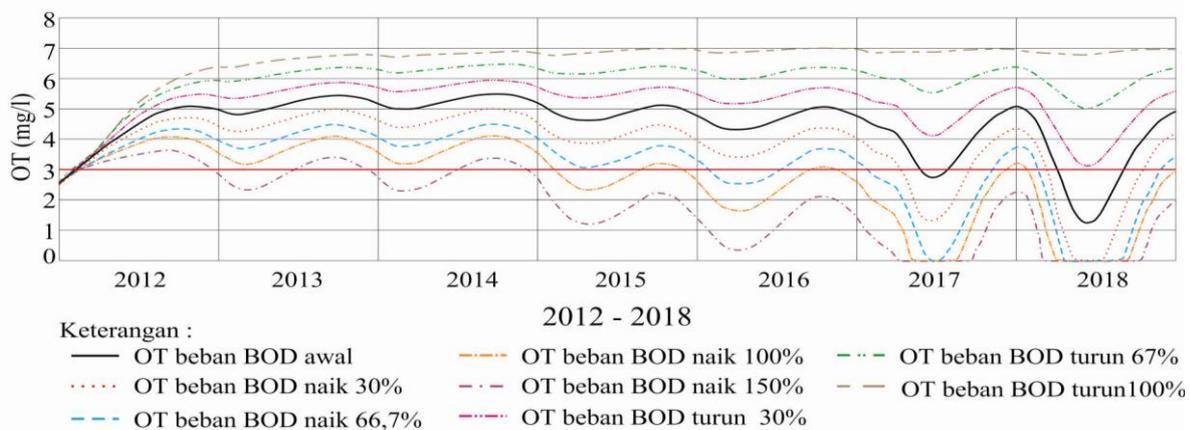
Gambar 7 Profil Perubahan Gas NH_3 dan H_2S Terlarut pada Saluran Outlet Waduk Jatiluhur (Irianto, 2007)

2. Analisis Sensitifitas Kualitas air

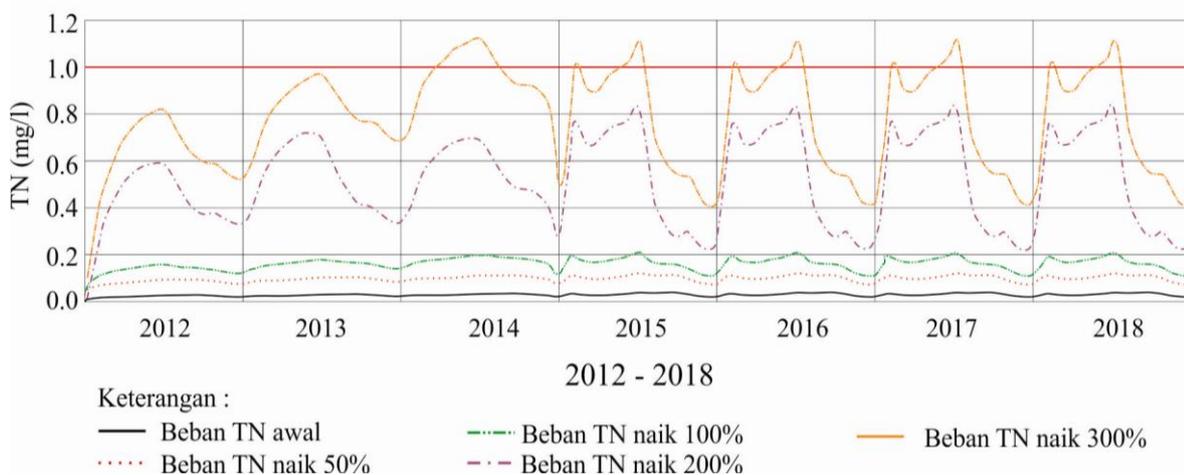
Untuk mengetahui sejauh mana respon kualitas air akibat bertambah maupun berkurangnya beban pencemar pada badan air setelah restorasimaka diperlukan analisis sensitifitas terhadap beban pencemar yang terkait dengan proses eutrofikasi. Gambar 8 menunjukkan simulasi perubahan paramater oksigen terlarut karena meningkat maupun berkurangnya zat organik. Gambar 9 dan 10 menggambarkan hasil analisis sensitifitas parameter Total N dan Total P yang menjadi pemicu terjadinya proses eutrofikasi Waduk Jatiluhur (Irianto, 2014).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa parameter oksigen terlarut merupakan parameter yang

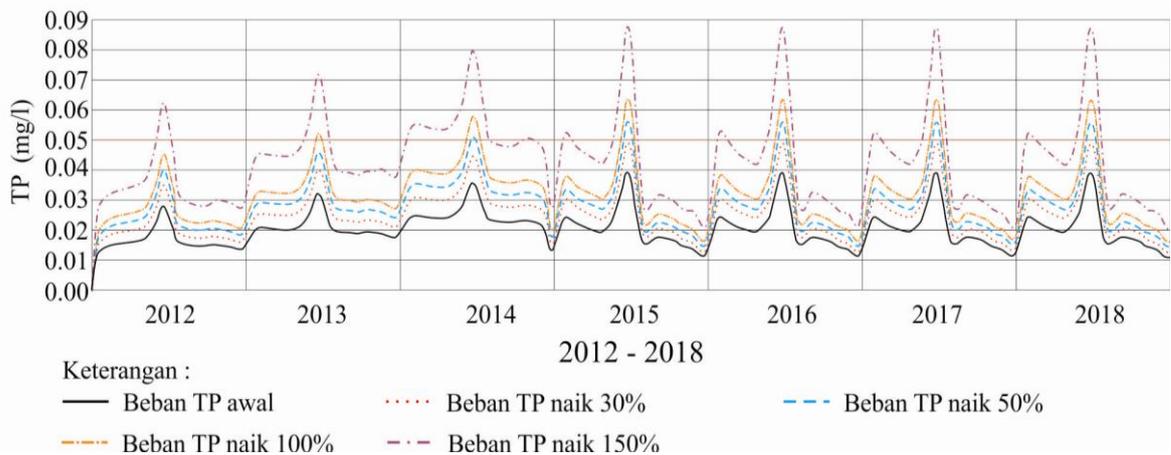
sensitif terhadap perubahan beban pencemar zat organik, sebagai BOD. Kenaikan beban pencemar tiba-tiba (*pollutant shock loading*) BOD sebesar 67% menyebabkan kadar oksigen terlarut pada lapisan hipolimnion menurun hingga lebih kecil dari 3 mg/l dan terus menurun menjadi anaerobik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil simulasi, yang tercantum pada Gambar 9 dan 10, juga menjelaskan bahwa Waduk Jatiluhur juga berpotensi kembali berstatus eutrofik apabila beban pencemar tiba-tiba Total N dan Total P meningkat masing-masing sebesar 300% dan 100% (Irianto, 2014).



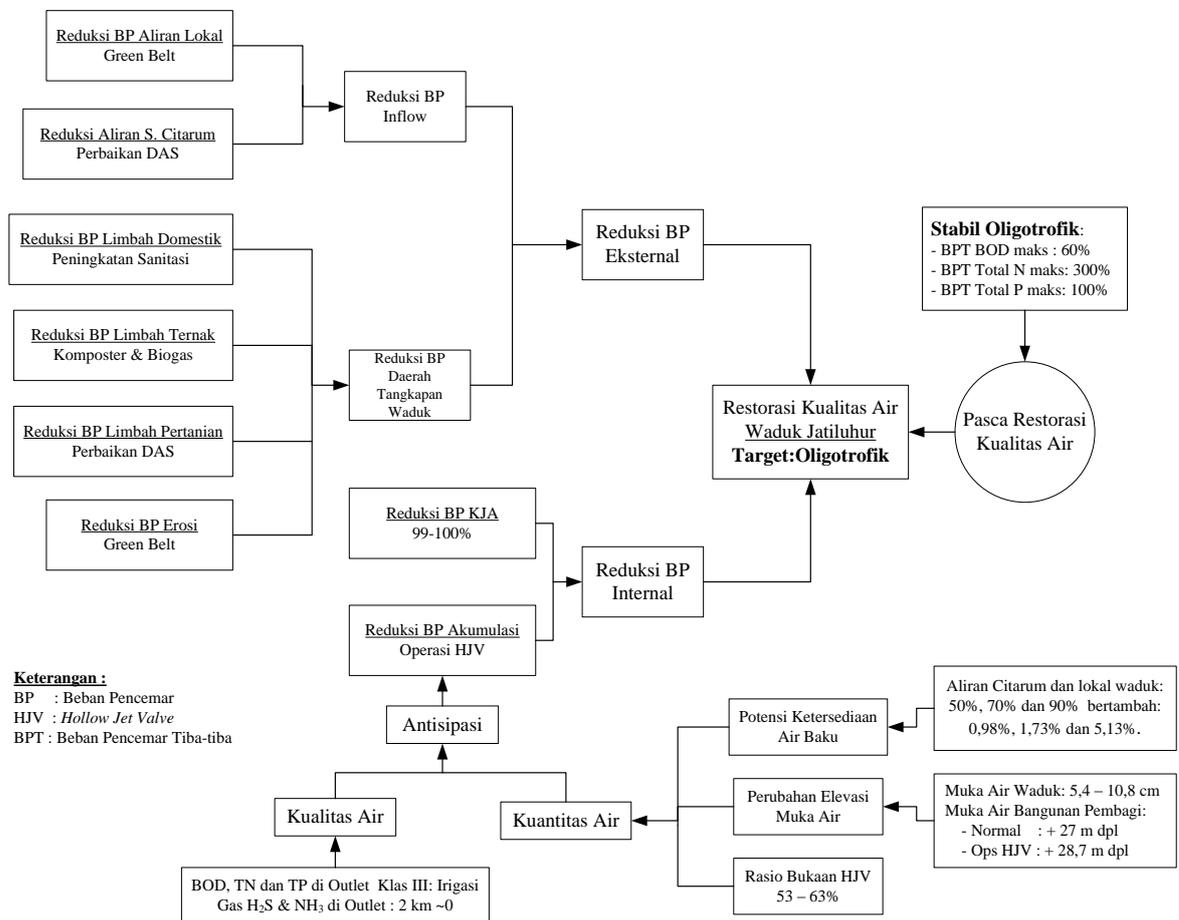
Gambar 8 Analisis Sensitivitas Beban Pencemar BOD Terhadap Dinamika Oksigen Terlarut pada Zona Lakustrin Waduk Jatiluhur Pasca Restorasi (Irianto, 2014)



Gambar 9 Analisis Sensitivitas Beban Pencemar Total Nitrogen pada Zona Lakustrin Waduk Jatiluhur Pasca Restorasi (Irianto, 2014)



Gambar 10 Analisis Sensitivitas Beban Pencemar Total Fosfor pada Zona Lakustrin Waduk Jatiluhur Pasca Restorasi (Irianto, 2014)



Gambar 11 Skema Upaya Restorasi Kualitas Air Dengan Konsep Ekohidrodinamika Mendukung Sistem Irigasi Jatiluhur Yang Berkelanjutan (Irianto, 2014)

4.4. Sinergi Restorasi Waduk dengan Sistem Irigasi Jatiluhur

1. Restorasi Kualitas Air Waduk

Waduk Jatiluhur adalah waduk yang paling hilir dari ke tiga waduk Kaskade Citarum, sehingga beban pencemar senyawa organik dan nutrisi

dari S. Citarum bagian hulu beserta aliran lokal disekitar waduk-waduk tersebut akan terakumulasi pada Waduk Jatiluhur. Karena itu, beban pencemar eksternal Waduk Jatiluhur juga harus dikendalikan untuk mencegah terjadinya proses eutrofikasi Waduk Jatiluhur. Beban pencemar internal waduk, yaitu sisa pakan ikan

kolam jaring apung yang juga telah mencemari Waduk Saguling dan Cirata, juga harus dikendalikan (Gambar 11).

Pengeluaran lapisan hipolimnion dasar melalui HJV secara teratur bermanfaat untuk mengurangi beban pencemar internal yang terakumulasi pada sedimen dasar dan parameter nutrien. Pengoperasian HJV tersebut mengurangi suplai senyawa nutrien ke lapisan epilimnion, sehingga mengurangi potensi terjadinya proses eutrofikasi dari beban pencemar internal yang terakumulasi pada lapisan sedimen dasar. Gang, Ji (2008) menjelaskan bahwa pengeluaran lapisan hipolimnion dasar melalui HJV secara teratur dapat membantu mengurangi suplai secara vertikal senyawa organik dan nutrien ke lapisan epilimnion waduk. Namun demikian, dampak kualitas air pada bagian hilir waduk harus diantisipasi (Gambar 11).

Irianto *et al.* (2014) menjelaskan bahwa berdasarkan analisis dan simulasi menggunakan piranti lunak WASP, untuk merestorasi kualitas air diperlukan reduksi beban pencemar internal dari sisa pakan KJA dan beban pencemar yang telah terakumulasi pada lapisan sedimen minimum sebesar 99% dari kondisi saat ini dengan cara mengeluarkan lapisan hipolimnion dasar melalui HJV dengan debit pengeluaran sebesar 50 m³/s setiap bulan. Karena itu, integrasi pengendalian beban pencemar antara beban eksternal maupun pencemar internal untuk merestorasi kualitas air Waduk Jatiluhur sangat diperlukan (Gambar 11). Untukantisipasi tersebut di atas, pemantauan secara *real time* dan terus menerus menggunakan sensor pada tiap lapisan air Waduk Jatiluhur sangat diperlukan. Dengan demikian, operasi waduk untuk mendukung pengelolaan air pada daerah irigasi Jatiluhur yang berkelanjutan tetap berlangsung sesuai prosedur yang telah direncanakan.

2. Konservasi Kualitas Air Jaringan Irigasi

Pada sistem irigasi Jatiluhur, air baku untuk irigasi merupakan pemanfaat terbesar ($\pm 90\%$) yang pemanfaatannya yang bersifat sosial. Karena itu, untuk menunjang sistem irigasi Jatiluhur yang berkelanjutan, maka efisiensi penggunaan air perlu ditingkatkan. Hernowo (2000) menginformasikan bahwa apabila efisiensi penggunaan air irigasi dapat ditingkatkan, hasilnya dapat dimanfaatkan guna menambah biaya operasi dan pemeliharaan prasarana pengairan. Hernowo (2000) juga menjelaskan bahwa efisiensi penggunaan air secara teknis dapat ditingkatkan apabila prasarana jaringan irigasi dalam kondisi baik, misal: bangunan dan tanggul yang tidak rembes dan bocor,

pengendalian air yang tepat jumlah dan tepat waktu serta petani dapat menggarap tanah dan menanam secara tepat waktu.

Metoda irigasi yang hemat air juga membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air di jaringan irigasi. Safarina (2007) menerangkan bahwa Metoda SRI dapat mereduksi kebutuhan air irigasi hingga 40% di Daerah Irigasi Jatiluhur, yang terdiri dari Saluran Tarum Barat, Tarum Tengah dan Tarum Timur. Metoda pengairan SRI juga dapat meningkatkan produksi beras dari 5 ton/ha menjadi 12 ton/ha (Safarina, 2007).

Konservasi air baku pada saluran irigasi selain dilakukan dengan perbaikan kualitas air pada sumbernya, juga melalui perlindungan kualitas air pada jaringan irigasi. *Green belt* sepanjang pinggir jaringan irigasi dapat diterapkan untuk mengurangi pencemaran Total N dan Total P yang terlarut pada *surface run off* yang bersifat tersebar. Senyawa nutrien yang terlarut tersebut akan diserap oleh *green belt* sebelum melimpas dan masuk ke saluran air irigasi. Hill (1997) menjelaskan bahwa untuk melindungi sistem saluran irigasi yang berkelanjutan perlu dilakukan perlindungan saluran dengan memanfaatkan *green belt*. Selain memperkuat tanggul juga mengurangi beban pencemaran tersebar senyawa nutrien yang masuk mengikuti limpasan aliran permukaan.

Peningkatan kadar oksigen terlarut pada jaringan irigasi sangat diperlukan, untuk mencegah terjadinya kondisi anaerob di saluran irigasi. Tuba *et al.* (2013) menyatakan bangunan terjunan akan meningkatkan efisiensi aerasi sampai 65% pada saluran terbuka. Karena itu, bendung dan bangunan pendukung sistem irigasi yang bersifat terjunan dapat dimanfaatkan sebagai bangunan aerasi. Zhang *et al.* (2013) juga menjelaskan bahwa pada kondisi aliran superkritis akibat *hydraulic jump* di saluran terbuka menyebabkan kontak aerasi secara intensif, sehingga kadar oksigen pada saluran irigasi meningkat.

Pengendalian kadar sedimen hendaknya menjadi program konservasi air irigasi. Kadar sedimen yang tinggi selain akan menyebabkan berkurangnya volume basah di jaringan irigasi, juga sebagai sumber senyawa organik dan nutrien yang memicu terjadinya proses eutrofikasi jaringan. Juracek (2010) menjelaskan bahwa dalam sedimen terdapat kandungan Total N dan Total P dan karbon organik masing-masing 100 mg/kg dan 50 mg/kg dan 0,1% berat kering total.

Pengurangan sedimen pada jaringan irigasi dapat dilakukan secara eksternal maupun internal. Secara eksternal dengan mencegah erosi mulai

dari hulu, sedangkan secara internal melalui program pemeliharaan jaringan irigasi, yaitu membangun bangunan penangkap sedimen, *lining* atau perkerasan saluran dan pengambilan endapan sedimen pada saat pengeringan jaringan secara berkala.

Dengan demikian, melalui sinergi antara program restorasi kualitas pada sumber air baku Waduk Jatiluhur secara ekohidrodinamika dengan program konservasi kualitas air di jaringan irigasi akan terbentuk sistem pasokan air baku yang mendukung sistem irigasi Jatiluhur secara berkelanjutan, yaitu sistem jaringan irigasi modern yang diikuti dengan tindakan pelestarian lingkungan.

V. KESIMPULAN

Hasil analisis hidrodinamika yang terdiri dari analisis penurunan tinggi muka air Waduk Jatiluhur, analisis pengoperasian HJV dan analisis kenaikan tinggi muka air di Bendung Curug sebagai bangunan pembagi baik dalam kondisi maksimum maupun minimum menunjukkan bahwa pengoperasian HJV tersebut masih sesuai dengan sistem pengoperasian waduk, sehingga pengaliran air untuk daerah irigasi Jatiluhur dapat dilaksanakan sesuai prosedur yang telah ditetapkan.

Kebutuhan pengoperasian HJV dapat dipenuhi melalui integrasi debit aliran Sungai Citarum yang masuk ke Waduk Saguling ditambah dengan debit aliran lokal yang masuk ke Waduk Cirata dan Jatiluhur. Karena itu, metoda ekohidrodinamika melalui pengoperasian HJV yang dilakukan secara berkala tidak akan mengganggu pasokan air irigasi untuk daerah irigasi Jatiluhur.

Kadar zat pencemar saat pengoperasian HJV di saluran *outlet* Waduk Jatiluhur sampai bangunan pembagi (Bendung Curug) masih sesuai untuk kebutuhan irigasi, sedangkan gas-gas yang bersifat toksik dan korosif juga cenderung turun mendekati nol setelah 2 (dua) km ke arah hilir. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kelangsungan pasokan air baku pada saat pengoperasian HJV secara teratur masih sesuai dengan kriteria baku mutu Kelas 3 PP 82 tahun 2001.

Analisis sensitifitas kualitas air pasca restorasi juga menunjukkan bahwa untuk menjaga keberlangsungan pasokan air irigasi yang sesuai dengan standar kualitas air, perlu dilakukan upaya restorasi sekaligusantisipasi untuk mencegah kenaikan beban pencemar secara tiba-tiba zat organik dan nutrien. Dengan demikian,

kondisi anaerobik dan status eutrofik pasca restorasi tidak terjadi kembali.

Untuk mendukung sistem irigasi Jatiluhur yang berkelanjutan diperlukan upaya sinergis antara program restorasi kualitas air pada Waduk Jatiluhur sebagai pemasok air baku secara ekohidrodinamik dengan program konservasi kualitas air di jaringan irigasi, yang terdiri dari pemanfaatan irigasi hemat air, konservasi air baku dan pengendalian kadar sedimen di seluruh jaringan irigasi.

Tingkat akurasi antisipasi ekohidrodinamika pengoperasian waduk masih perlu ditingkatkan dengan pengukuran secara seri parameter-parameter yang terkait dengan pengoperasian HJV waduk. Dengan demikian, dukungan analisis pasokan air irigasi secara berkelanjutan akan lebih akurat. Metoda analisis untuk antisipasi pengaruh pengoperasian HJV perlu disosialisasikan kepada para pengelola waduk, sehingga sistem pengoperasian waduk dan distribusi pada jaringan irigasi masih sesuai dengan standar operasi yang telah ditetapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Kepala Puslitbang Sumber Daya Air dan Direktur Perum Jasa Tirta II atas kesempatan dan bantuan yang diberikan. Tidak lupa pula ucapan terimakasih disampaikan kepada rekan-rekan Balai Lingkungan Keairan dan Balai Litbang Teknologi Irigasi, Puslitbang Sumber Daya Air yang telah banyak membantu menyukseskan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bagad, A. 2009. *Environmental Studies*. Technical Publications Pune Ltd, Pune India. pp:2-4
- Balcerzak, W. 2006. The protection of reservoir water against the eutrophication process, institute of water supply and environmental protection. *Polish Journal of Environment Study*, Vol.15(6), Kraków University of Technology, Poland, 837-844.
- Chau, K.W and H Jin. 2002. Two-layered, 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system. *Marine Pollution Bulletin* Vol. (45): 300-310.
- Davis, L. Jenifer dan Shaw, Glen. 2015. Impact of Eutrophication on The safety of Drinking and Recreational Water. School of Public Health, Griffith University Queensland, Australia. www.eolss.net/sample-chapters/c03/e2-20a-04-02.pdf (diakses Agustus 2015).

- Fuente, A. and Y. Nino., 2007, Pseudo 2D Ecosystem Model for Dendritic Reservoir, Master Thesis, Universidad Chili, Santiago.
- Gang Ji, Zhen. 2008. *Hydrodynamics and Water Quality: Modelling Rivers, Lake, and Estuaries*. New Jersey, Canada: John Willey & Sons, Inc.
- Goel, A. and P. Tiwari. (2013). Review of computer based software tools for salinity management in agricultural lands. *Journal of Indian Water Resources Society*, Vol. 33(4).
- Gunkel, C and M.C. Sobral. 2007. Reservoir and River Basin Management: Exchange Experiences for Brazil, Portugal and Germany. Germany: Technical University of Berlin.
- Hernowo, S. 2000. Efisiensi Penggunaan Air Irigasi pada Cakupan Wilayah Perum Jasa Tirta II dalam Menunjang Pembangunan di Jawa Barat. Pusat Penelitian dan Pengembangan Bisnis (P3B) Universitas Padjadjaran.
- Hill, J. 2007. Best Management Guidelines for Sustainable Irrigated Agriculture. Wellington: Ministry of Agriculture and Forestry.
- Hurtado, J.V. 2006. Basin Scale Hydrodynamic in a Mediteranian Reservoir Implications for the Phitoplankton Dynamics. PhD. Dissertation. Spain: University of Girona.
- Irianto, E.W. 2007. Model empiris dinamika kualitas air pada badan air tercemar *bottom outlet* waduk. *Buletin Pusair*, Vol. 16(46):39-46.
- Irianto, E.W. 2014. Model Restorasi Proses Eutrofikasi Melalui pengoperasian Hollow Jet Pada Waduk Jatiluhur. Disertasi Program Doktor Ilmu Teknik Sipil. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan.
- Irianto, E.W., R.W. Triweko and P. Soedjono. 2014. Dynamic analysis of the hollow jet valve operation for eutrophication control in Jatiluhurtropical-riverine reservoir, Indonesia. *International Journal of Environment and Resources*, Vol. 2(2): 23-32.
- Jorgensen, S. 2003. The Application of Models to Find the Relevance of Residence Time in Lake and Reservoir Management. *Journal of Limnology*, Vol. (1):16-20.
- Juracek, K.E. 2010, Sedimentation, sediment quality, and upstream channel stability, John Redmond Reservoir, eastcentral Kansas, 1964–2009. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5191, 34 p.
- Ling, D., J. Q. Wu, Y. Pang, L. Li, G. Gao, and D.W. Hu. 2007. Simulation study on algal dynamics based on ecological flume experiment in Taihu Lake, China. *Ecological Engineering, Elsevier*, 31:200-206.
- Moerwanto, A. 2010. Optimasi Pemanfaatan dan Pelestarian Waduk Kaskade Sungai Citarum. Round Table Discussion Pelestarian Waduk Kaskade Sungai Citarum. SEAMEO-BIOTROP 4 Februari 2010. Bogor
- Naithani, Darchambeau, Deleernijder, Descy and Wolansky. 2007. Study of the Nutrient and Plankton Dynamics in Lake Tanganyika using a Reduced-Gravity Model. *Ecological Modelling* (200): 225-232.
- Nastiti A., S. Nuroniah, S.E. Purnamaningtyas, dan E.S. Kartamihardja. 2001. Daya dukung perairan waduk jatiluhur untuk budidaya ikan dalam keramba jaring apung. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, Vol. 7 (2): 14-21.
- Percival and Keany. 2008. The influence of nitrogen fertilization on waterlogging stresses in fagus sylvatcal l and quereus robur l. *Agriculture And Urban Forestry, International Society of Arboriculture*, Vol. 34(1):29-40.
- PJT II. 2008. Laporan Pengoperasian Waduk Kaskade Citarum. Purwakarta: PJT II.
- Sabar, Arwin. 2006. Prospek kontribusi DAS Cikapundung memenuhi laju permintaan sumber air baku metropolitan bandung. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, Vol. 14(2):169-178
- Safarina, A.B. 2007. Irigasi sistem SRI sebagai solusi kelangkaan air dan peningkatan produksi padi di daerah irigasi jatiluhur. *Jurnal Teknik*, Vol. 6(2).
- Serpil, S. 2012. An agricultural pollutant: chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3(1).
- Siregar dan Mayasari. 2010. Pengelolaan dan pemanfaatan waduk Ir. H. Djuanda untuk perikanan budidaya KJA. Round Table Discussion on Cascade Citarum Reservoir, Puslit Limnologi, Bogor, 4 Februari 2010.
- Tuba, B., A. Coşar, Yetilmezsoy, K.S. Topcu, and A. Hayrullah. 2013. The effect of hydraulic jump on the aeration efficiency. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 2013, Epoka University, Tirana, Albania.
- Viksborg, M.S. 1995. *The WES Handbook on Water Quality Enhancement Technique for Reservoirs and Tailwaters*. US Army Corp of Engineers and US, EPA.
- Wool, A.T, R.B. Ambrose, J.L. Martin, E.A. Corner. 2011. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6: User's Manual. www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial.pdf (diakses November 2011).
- Zhang, G., H. Wang, H. Chanson. 2013. Turbulence and aeration in hydraulic jumps: free-surface fluctuation and integral turbulent scale measurements. *Environmental Fluid Mechanics*, 13(2): 189–204.