

# OPTIMASI POLA OPERASI WADUK UNTUK MEMENUHI KEBUTUHAN ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (Studi Kasus Waduk Wonogiri)

**Cahaya Santoso Samosir<sup>1</sup>, Widandi Soetopo<sup>2</sup>, Emma Yuliani<sup>2</sup>**

<sup>1)</sup> Mahasiswa Magister Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia; cahayasamosir03@gmail.com

<sup>2)</sup> Dosen Jurusan Pengairan Universitas Brawijaya Malang

**ABSTRAK:** Waduk Wonogiri diharapkan dapat memanfaatkan potensi air yang ada, salah satunya untuk keperluan pemenuhan energi listrik tenaga air. Akan tetapi ada kecenderungan penurunan fungsi pelayanan waduk akibat sedimentasi. Oleh sebab itu, diperlukan suatu pengaturan, perencanaan dan pengoperasian air waduk yang optimal sehingga didapatkan manfaat yang sebesar-besarnya. Salah satu metode pengoperasian waduk untuk mendapatkan hasil yang optimal yaitu dengan menerapkan simulasi pola operasi waduk model stokastik dengan bantuan program *solver evolutionary*. Penerapan optimasi model stokastik memiliki hasil produksi listrik yang lebih baik bila dibandingkan dengan pola operasi waduk eksisting. Produksi rata-rata tahunan mengalami peningkatan sebesar 22.98% dari 33.820 MWh/15hari menjadi 41.593 MWh/15hari. Evaluasi kinerja menunjukkan bahwa waduk memiliki keandalan 100% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan pemenuhan air di hilir waduk.

*Kata kunci: Waduk Wonogiri, pola operasi waduk, simulasi, model stokastik, evaluasi waduk*

*ABSTRACT: The reservoir is expected to utilize water into the source of energy using hydroelectric power plants. Unfortunately, there is reduction of its function time by time because of sedimentation problem at the bottom of Wonogiri reservoir. Because of this problem, there are urgent needs of good management, planning, and operation to optimize the Wonogiri function again. One of the effective methods is the application of stochastic operational simulation rule of reservoir assisted with solver evolutionary program. Based on analysis result, the application of optimization operational simulation rule using stochastic model had better electric production than existing operational simulation rule. There was the increase of electric production as much as 22.98% (77.733 MWh/15days) from 33,820 MWh/15days to 41,593 MWh/15days. The performance evaluation showed that the reservoir had a 100% reliability to produce electricity and 80% to fulfill water demand in downstream area.*

*Keywords: Wonogiri reservoir, reservoir operation rule, simulation, stochastic model, reservoir evaluation*

## A. PENDAHULUAN

Untuk memenuhi kebutuhan yang ada, ketersediaan tampungan Waduk Wonogiri sangat terbatas. Ditambah lagi adanya perubahan tata guna lahan bagian hulu Sungai Keduang yang memberikan kontribusi cukup besar dalam masalah sedimentasi Waduk Wonogiri. Berdasarkan data pengukuran sebaran sedimen tahun 2011 yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I dengan

cara pemeruman gema (*sounding*) diketahui bahwa telah terjadi kehilangan kapasitas tampungan waduk akibat sedimentasi antara tahun 1980 sampai tahun 2011 seperti yang disajikan pada tabel berikut:

Tabel 1. Kapasitas Tampungan yang Hilang antara 1980 – 2011

Zona Waduk	Kapasitas Tampungan (Juta m <sup>3</sup> )	Kapasitas yang Hilang

	1980	2011	Volume (juta m <sup>3</sup> )	Ratio dari Vol. Awal (%)
Tamp. Banjir (El.136-138.3 m)	220	159	61	27.73
Tamp. Efektif (El.127-136 m)	440	305	135	30.68
Tamp. Mati (El.<127 m)	120	59	61	50.83

Sumber : Data Sounding Perum Jasa Tirta I,  
Budihardja, Darjanta. (2009)

Dari tabel diatas terlihat bahwa selama 31 tahun waduk beroperasi, dapat diketahui bahwa tampungan untuk pengendali banjir berkurang 27.73%, tampungan efektif yang dipergunakan untuk irigasi dan PLTA berkurang 30.68% dan tampungan mati berkurang paling banyak yaitu sebesar 50.83%. Volume sedimen yang masuk ke dalam waduk akan mengurangi kapasitas tampungan air. Hal ini mengakibatkan berkurangnya efektivitas waduk dalam mencapai tujuannya. Pada musim penghujan, air yang masuk ke waduk tidak dapat ditampung namun akan langsung melimpas melalui *spillways* dan pada musim kemarau tampungan waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan air di hilir terutama kebutuhan air untuk PLTA. Melihat kondisi di atas diperlukan suatu studi optimasi yang bertujuan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya air untuk pemenuhan kebutuhan energi pembangkit listrik tenaga air.

Pada penelitian ini teknik optimasi dilakukan dengan menggunakan model simulasi stokastik. Pemilihan model simulasi ini karena bersifat fleksibel dalam menangani hubungan-hubungan kompleks yang bersifat nonlinier.

Maksud penelitian ini adalah untuk mendapatkan gambaran serta pola operasi Waduk Wonogiri yang paling optimal dalam kaitan dengan pemenuhan kebutuhan energi listrik tenaga air dengan menggunakan model simulasi stokastik.

Tujuan penelitian ini adalah menerapkan model optimasi dengan cara simulasi stokastik sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya air untuk pembangkit energi listrik serta menyajikan pola operasi waduk yang lebih fleksibel sesuai dengan kondisi tampungan waduk.

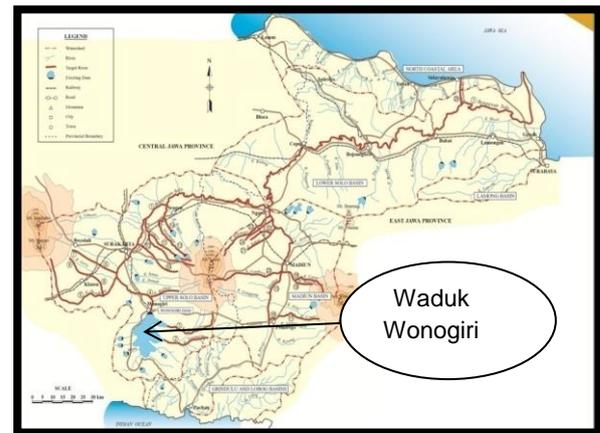
## B. BAHAN DAN METODE

Waduk Wonogiri disebut juga Bendungan Gajah Mungkur terletak di Desa Danuarjo, Kecamatan Wonogiri, Kabupaten Wonogiri Provinsi Jawa Tengah. Waduk Wonogiri yang memiliki luas *catchment area* 1.350 km<sup>2</sup> terletak 3 km di selatan Kota Kabupaten Wonogiri. Pembangunan Waduk Wonogiri dimulai sejak tahun 1976. Pengisian pertama dilakukan pada Bulan Juli 1980 dan kemudian diresmikan pada Bulan November di tahun yang sama. Manfaat utama dari Waduk Wonogiri adalah untuk pengendali banjir, PLTA, irigasi, dan air minum.

### 1. Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Data outflow historis 15 harian dari Tahun 2004 hingga tahun 2013
- Data inflow historis 15 harian dari Tahun 2004 hingga tahun 2013
- Data karakteristik waduk
- Data kebutuhan di hilir
- Data instalasi PLTA
- Data pendukung lainnya



Gambar 1. Peta Lokasi Waduk Wonogiri

Sumber: BBWS Bengawan Solo

### 2. Metodologi Penelitian

#### a. Waduk

Dalam Peraturan Pemerintah No 37 Tahun 2010 tentang Bendungan dijelaskan bahwa definisi bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan / atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah (tailing), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (Anonim, 2010)

## b. Operasi dan Pola Operasi Waduk

Operasi waduk (*reservoir operation*) adalah penampungan aliran air sungai ke dalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan daripada air yang telah ditampung tersebut untuk berbagai tujuan tertentu. Sedangkan pola operasi adalah patokan operasional periode suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus mengikuti ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rancangan.

Persamaan waduk dinyatakan sebagai berikut (Soetopo, W., 2010)

$$S_{t+1} = S_t + I - O$$

Dengan :

$S_{t+1}$  = Tampungan pada akhir periode t

t = Interval waktu yang digunakan

$S_t$  = Tampungan pada awal periode t

I = Total volume debit inflow yang masuk ke waduk selama periode t

O = Total volume outflow yang keluar dari waduk selama periode t

## c. Pembangkit Listrik Tenaga Air

Persamaan Daya yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$P = Etg \times 9.8 \times He \times Q$$

Dengan :

P = Daya listrik bangkitan dalam kilowatt (kW)

Etg = Efisiensi turbin-generator

He = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit PLTA (m<sup>3</sup>/dt)

Pada simulasi operasi waduk ini yang diperhatikan adalah besarnya produksi energi yang diperoleh dengan persamaan:

$$E = \frac{Etg \times 9.8 \times He \times V}{3600}$$

Dengan:

E = Energi listrik bangkitan dalam kilowatt.jam (kWh)

V = Volume (m<sup>3</sup>)

## d. Model optimasi

Model optimasi adalah penyusunan suatu model sistem yang sesuai dengan keadaan nyata yang nantinya dapat diubah ke dalam model matematis dengan pemisahan elemen-elemen pokok, agar suatu penyelesaian yang sesuai dengan sasaran atau tujuan pengambilan keputusan dapat tercapai (Subagyo, 1984 dalam Irvani, H., 2012). Hal ini melibatkan pandangan pada masalah dalam tautan keseluruhan sistem.

## e. Model Stokastik

Ada tiga jenis model stokastik yang masing-masing memasukkan variabilitas hidrologi dan ketidakpastian (Loucks, Stedinger dan Haith, 1981 dalam Irvani, H., 2012). Yang termasuk dalam model tersebut yaitu :

- Model yang mendefinisikan sejumlah kemungkinan diskrit dari debit aliran sungai dan volume tampungan, masing - masing dengan probabilitasnya.
- Model yang mengidentifikasi produksi air tetap tahunan, distribusinya dalam setahun dan keandalannya.
- Model *chance-constrained* yang mempunyai aturan-aturan yang menyatakan volume tampungan waduk yang tidak diketahui dan distribusi probabilitas lepasan sebagai fungsi linier daripada debit aliran sungai yang *unregulated*.

## f. Genetic Algorithms

Salah satu metode yang cukup menjanjikan dengan mengadopsi sistem alami dalam mengoptimasi yaitu dengan menerapkan *Genetic algorithms* (GA). Kelebihan dari teknik ini adalah kemampuan fleksibilitas dan efektivitasnya dalam mengoptimasi sistem yang bersifat kompleks (Reddy Janga dan Kumar Nagesh, 2006). Metode *Genetic Algorithms* (GA) menggunakan informasi fungsi tujuan secara langsung, dan tidak membutuhkan fungsi turunan atau fungsi tambahan lainnya.

## g. Simulasi Aturan Waduk

Ada empat macam aturan operasi waduk, yaitu: (Soetopo, W., 2010)

- Simulasi Aturan Operasi Sederhana adalah operasi dengan melepaskan melepas air waduk untuk memenuhi kebutuhan sepanjang masih ada persediaan air di waduk.
- Simulasi Lepas Berdasarkan Tampungan, pada aturan operasi waduk dimana lepasan berdasarkan status tampungan waduk, maka dilakukan pembatasan terhadap lepasan apabila tampungan waduk menurun besarnya.
- Simulasi Lepas Rule Curve Tunggal adalah skedul tampungan waduk yang paling ideal untuk diikuti. Rule Curve adalah merupakan hasil daripada studi optimasi atau studi simulasi
- Simulasi Lepas Rule Curve Ganda

Adalah Rule Curve yang terdiri dari kurva atas sebagai batas maksimum tampungan waduk, dan kurva bawah sebagai batas minimum tampungan. Jadi operasi waduk adalah bergerak diantara kedua batas tersebut.

#### h. Optimasi Operasi Waduk

Dalam buku pedoman pengoperasian waduk tunggal, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, ada tiga tahapan dalam mempersiapkan model optimasi (Anonim, 2004), yaitu :

- Mengidentifikasi fungsi objektif guna mengukur efektivitas atau kegunaan yang menghubungkan beberapa kombinasi dari variabel.
- Mengidentifikasi *decision variable* secara kuantitatif dan menentukan ketelitiannya.
- Mengidentifikasi faktor-faktor tertentu yang membatasi (*decision variable*), tahapan ini akan menghasilkan persamaan kendala (*constraints*).

#### i. Kinerja Waduk

Kinerja Pengoperasian Waduk merupakan indikator waduk dalam pengoperasian untuk memenuhi kebutuhan. Beberapa indikator untuk menilai besarnya *performance* operasi waduk dapat meliputi keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*) dan kerawanan (*vulnerability*) (Suharyanto, 1997 dalam Aprizal, 2003).

Desain penelitian yang terarah diperlukan agar pengoptimasian pola operasi waduk mendapatkan hasil yang maksimal. Pada penelitian ini, beberapa tahapan pekerjaan yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

- Melakukan pengumpulan data yang terkait pada pengoptimasian waduk seperti data outflow eksisting, data inflow, data karakteristik waduk, data kebutuhan di hilir, data instalasi PLTA termasuk juga data-data penunjang seperti studi terdahulu dan dokumentasi.
- Melakukan pengelolaan data yang telah dikumpulkan tersebut sesuai dengan karakteristik yang ada seperti pengolahan data debit inflow yang masuk ke waduk dan pembacaan volume tampungan waduk.
- Melakukan simulasi dengan menggunakan debit outflow historis untuk mendapatkan evaluasi operasi muka air waduk dan perkiraan produksi listrik eksisting.

- Melakukan perhitungan optimasi dengan menggunakan model simulasi stokastik dengan bantuan program *solver evolutionary*. Optimasi dilakukan dengan membuat aturan lepasan waduk optimasi berdasarkan status tampungan.
- Merumuskan pola kebijakan pengoperasian waduk yang didasarkan hasil optimasi.
- Melakukan perbandingan produksi listrik hasil simulasi eksisting dengan hasil optimasi.
- Melakukan perbandingan tampungan waduk hasil simulasi eksisting dengan tampungan hasil optimasi.
- Melakukan evaluasi kinerja sistem Waduk Wonogiri bila menerapkan pola operasi waduk hasil optimasi.

Fungsi tujuan optimasi adalah memaksimalkan hasil atau unjuk kerja yang diharapkan dari sistem secara keseluruhan. Hasil sistem dalam hal ini adalah produksi listrik dari PLTA pada sistem yang ditinjau. Fungsi tujuan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Max } E = \text{opt } [r_1 (S_1, d_1) + \dots + r_{n-1} (S_{n-1}, d_{n-1}) + r_n (S_n, d_n)]$$

Dengan:

$E$  = Energi Listrik

$r_1$  = *Stage Return* (besarnya energi listrik yang bisa dihasilkan) tahap ke-n.

$S_n$  = *State variable* (tampungan waduk) tahap ke-n

$d_n$  = *Decision variable* (lepasan waduk) tahap ke-n

Ada beberapa variabel kendala (*constraint*) pada optimasi ini, yaitu:

a. Aturan lepasan PLTA

$$d_n = (d_{x1}, S_{x1}) < (d_{xn+1}, S_{xn+1}) < \dots < (d_{xn}, S_{xn})$$

b. Persentase lepasan debit PLTA ( $d_x$ )

$$d_x = 0 \leq d_{xn} \leq 100$$

c. Lepasannya untuk produksi PLTA ( $d_n$ ).

$$d_n \geq Q_{\text{minPLTA}}$$

d. Lepasannya untuk kebutuhan di hilir

$$d_n \geq 80\% \times Q_{\text{hilir}}$$

e. Debit Kritis pada waduk.

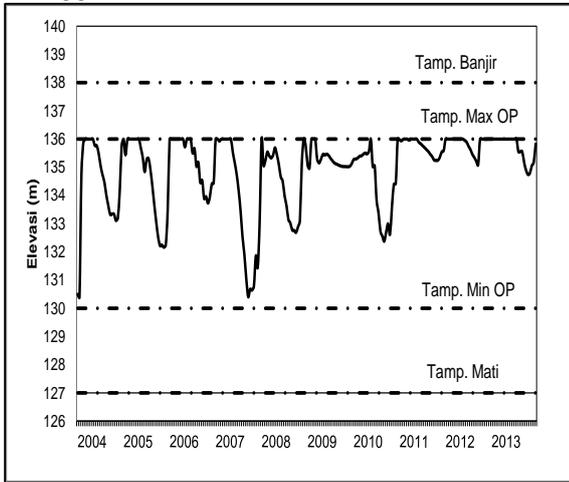
$$Q_{\text{out}} \leq Q_{\text{kritis}}$$

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Simulasi Pola Operasi Waduk Eksisting

Simulasi eksisting bertujuan untuk mengetahui perkiraan produksi listrik serta tampungan waduk wonogiri eksisting yang nantinya akan dibandingkan dengan hasil pola operasi waduk

optimasi. Berdasarkan data eksisting yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta I Wonogiri operasi waduk pada tahun 2004 dimulai pada ketinggian elevasi +130.5 meter.



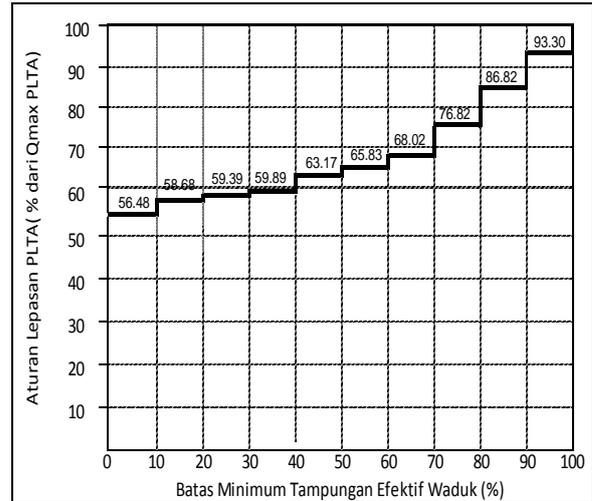
**Gambar 2. Muka Air Waduk Eksisting**  
*Sumber: Hasil Perhitungan*

Akibat sedimentasi yang terjadi di Waduk Wonogiri menyebabkan elevasi tampungan minimum operasi waduk yang semula pada elevasi +127.0 meter naik menjadi 130.0 meter. Kenaikan elevasi tampungan ini menyebabkan berkurangnya tampungan efektif waduk.

Dari hasil simulasi pola operasi waduk eksisting dapat diketahui perkiraan elevasi permukaan Waduk Wonogiri dari tahun 2004-2013. Gambar 2. menunjukkan bahwa pola operasi waduk eksisting berhasil mempertahankan ketinggian elevasinya diatas elevasi tampungan operasi minimum. Bahkan pada Tahun 2010-2013 elevasi muka air waduk berada pada ketinggian yang cukup tinggi sehingga ketersediaan debit untuk pembangkit listrik dan kebutuhan di hilir dapat terpenuhi dengan baik.

**2. Simulasi Pola Operasi Waduk Model Stokastik**

Pada penelitian ini diasumsikan bahwa pada Bulan Oktober sedang dilakukan kegiatan pengeringan di Daerah Irigasi Colo dan juga kegiatan operasi dan pemeliharaan rutin berupa pengerukan di intake waduk, sehingga debit outflow yang digunakan pada simulasi sebesar debit kebutuhan di hilir yaitu 6.23 m<sup>3</sup>/detik. Kondisi tampungan waduk pada saat optimasi diasumsikan dalam keadaan penuh atau pada elevasi +136.0 meter.



**Gambar 3. Lepas Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi**  
*Sumber: Hasil Perhitungan*

Aturan lepasan berdasarkan status tampungan hasil optimasi dengan menggunakan program *solver evolutionary* dapat dilihat pada Gambar. 3. Aturan lepasan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut, apabila tampungan waduk lebih besar dari 80% dari kapasitas tampungan aktif berarti lepasan sebesar 86.82% dari kebutuhan dalam hal ini adalah debit maksimum PLTA dan seterusnya. Apabila tampungan waduk tepat berada pada batas minimum, maka lepasan adalah mengikuti kisaran sebelumnya. Jadi misalnya tampungan waduk berada pada angka 0% maka lepasan sebesar 0% (bukan 10%)

**3. Perbandingan Hasil Pola Operasi Eksisting dengan Hasil Optimasi**

Pada penelitian ini, ada dua aspek yang akan dibandingkan yaitu perbandingan produksi listrik dan perbandingan tampungan waduk. Adapun hasil perbandingan kedua aspek tersebut dijabarkan sebagai berikut:

**a. Perbandingan Produksi Listrik**

Simulasi terhadap Waduk Wonogiri menggunakan pola operasi hasil optimasi selama 10 tahun yaitu tahun 2004-2013 menunjukkan peningkatan produksi listrik jika dibandingkan dengan simulasi pola operasi waduk dengan menggunakan data outflow eksisting.

Tabel 2. Perbandingan Produksi Listrik Total Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004-2013

Tahun	Energi (MWh/15hari)	
	Eksisting	Optimasi
2004	27,397	39,804

2005	28,013	39,566
2006	26,202	40,207
2007	29,576	34,099
2008	35,903	42,441
2009	31,775	41,122
2010	39,154	38,827
2011	40,610	44,852
2012	37,231	44,983
2013	42,336	50,030
<b>Rata-rata/thn</b>	<b>33,820</b>	<b>41,593</b>
<b>Total Produksi</b>	<b>338,196</b>	<b>415,930</b>

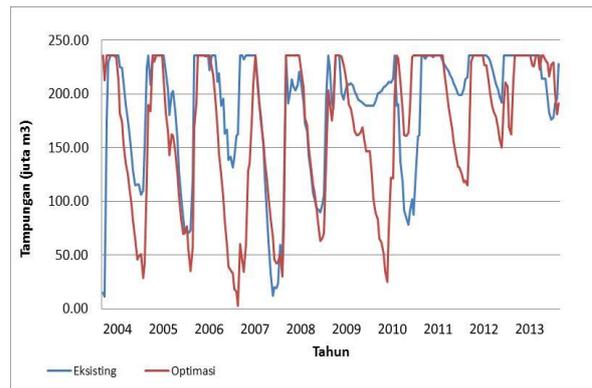
Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 2. menunjukkan bahwa dengan menggunakan pola kebijakan operasi dengan menggunakan model stokastik mengalami peningkatan produksi listrik tahunan rata-rata sebesar 22.98% dari 33.820 MWh/15hari menjadi 41.593 MWh/15hari atau peningkatan total produksi listrik sebesar 77.733 MWh/15hari dalam sepuluh tahun.

b. Perbandingan Tampungan

Perbandingan tampungan waduk hasil simulasi eksisting dan hasil simulasi optimasi dapat dilihat pada gambar 4.

Dari gambar 4 dapat dilihat bahwa pada suatu kondisi, tampungan waduk eksisting lebih tinggi dari kondisi tampungan waduk hasil optimasi, demikian juga sebaliknya, tampungan waduk hasil optimasi juga pada suatu kondisi lebih tinggi dari kondisi tampungan waduk eksisting. Namun bila diperhatikan pola garis tampungan pada waduk hasil optimasi umumnya memiliki kecenderungan yang sama dengan pola garis tampungan pada waduk eksisting. Keadaan tampungan nol yang merupakan kondisi yang dihindari pada pengoperasian waduk tidak pernah dialami pada kondisi waduk hasil simulasi eksisting maupun hasil optimasi. Hal ini menunjukkan bahwa pengoperasian waduk telah dapat mengakomodir beberapa fenomena alam yang tidak tetap atau berubah-ubah.



Gambar 4. Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004-2013

Sumber: Hasil Perhitungan

4. Evaluasi Kinerja Waduk Hasil Optimasi

a. Keandalan

Keandalan berfungsi mengukur kemampuan waduk untuk memenuhi fungsinya yaitu memenuhi kebutuhan target pelepasan waduk. Pada penelitian ini keandalan memenuhi lepasan kebutuhan PLTA dinyatakan dengan kemampuan waduk dalam memenuhi debit minimum PLTA sebesar 14 m<sup>3</sup>/detik dan keandalan pemenuhan di hilir waduk dinyatakan dengan kemampuan memenuhi 80% kebutuhan air di hilir waduk.

Tabel 3. menunjukkan bahwa dengan menggunakan pola operasi waduk hasil optimasi waduk selalu berhasil dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan memenuhi 80% dari kebutuhan air di hilir waduk yang ditunjukkan dengan keandalan sebesar 100%. Hasil evaluasi ini lebih baik bila dibandingkan dengan waduk eksisting yang memiliki keandalan sebesar 82.50% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan 75.42% dalam memenuhi 80% dari kebutuhan air di hilir waduk.

Tabel 3. Keandalan Waduk Wonogiri Hasil Optimasi

Keandalan	Pemenuhan PLTA		Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Jumlah Data	240	220	240	240
Jumlah Gagal	42	0	59	0
Jumlah Sukses	198	220	181	240
<b>Keandalan</b>	<b>82.50 %</b>	<b>100%</b>	<b>75.42 %</b>	<b>100%</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4. Kelentingan Waduk Wonogiri Hasil Optimasi

Kelentingan	Pemenuhan PLTA		Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Jumlah Transisi	20	0	21	0
Jumlah Bulan Gagal	42	0	59	0
Rata-rata Gagal	2.1	0	2.81	0.00
<b>Kelentingan</b>	<b>47.62 %</b>	<b>100%</b>	<b>35.59 %</b>	<b>0.00%</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

b. Kelentingan

Kelentingan berfungsi mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal.

Tabel 4. menunjukkan bahwa kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal untuk memenuhi kebutuhan air PLTA dan pemenuhan di hilir waduk adalah sebesar 100% sedangkan untuk kelentingan waduk eksisting adalah sebesar 47.62% untuk pemenuhan PLTA dan 35.59% untuk pemenuhan 80% kebutuhan air di hilir.

a. Kerawanan

Kerawanan berfungsi untuk menentukan atau mengukur seberapa besar rawan suatu kegagalan jika terjadi kegagalan.

Tabel 5. Kerawanan Waduk Wonogiri Hasil Optimasi

Kerawanan	Pemenuhan PLTA		Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Total Defisit (Juta m <sup>3</sup> )	594.18	0.00	663.97	0.00
Rata-rata Defisit (Juta m <sup>3</sup> )	14.15	0.00	11.25	0.00
Rata-rata Defisit Ratio (%)	12.79	0.00	12.18	0.00
Max Defisit Ratio (v <sub>2</sub> ) (%)	100.00	0.00	100.00	0.00

Maksimum Defisit (V <sub>3</sub> ) (Juta m <sup>3</sup> )	19.35	0.00	26.63	0.00
---	-------	------	-------	------

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 5. menjelaskan bahwa pada simulasi eksisting bila terjadi kegagalan dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA maka 12.79% dari kebutuhan tidak dapat terpenuhi, dengan rata-rata defisit sebesar 14.15 juta m<sup>3</sup>/15hari dan 12.18% bila terjadi kegagalan dalam memenuhi kebutuhan di hilir waduk dengan rata-rata defisit 11.25 juta m<sup>3</sup>/15hari setiap terjadi kegagalan.

D. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan untuk optimasi Waduk Wonogiri dengan menggunakan model simulasi stokastik maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi eksisting diperoleh total produksi listrik yang dihasilkan oleh PLTA Wonogiri adalah 338.196 Juta MWh/15hari atau rata-rata 33.820 MWh/15hari pertahunnya. Tampungan waduk eksisting juga tidak pernah mengalami kondisi kosong dimana kekosongan tampungan merupakan hal yang harus dihindari dalam pengoperasian waduk.
2. Dari simulasi model stokastik diperoleh aturan lepasan waduk berdasarkan status tampungan yang paling optimal sebagai berikut:

Tabel 6. Lepasn Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi

No	Aturan Lepasn	
	Batas Minimum Tampungan (%)	Lepasn (%)
1	0.00	56.48
2	10.00	58.68
3	20.00	59.39
4	30.00	59.89
5	40.00	63.17
6	50.00	65.83
7	60.00	68.02
8	70.00	76.82
9	80.00	86.82
10	90.00	93.30
11	100.00	100.00

Sumber: Hasil Perhitungan

3. Dari perhitungan yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa hasil produksi listrik pola

operasi waduk optimasi lebih baik 22.98% bila dibandingkan dengan hasil produksi listrik pola operasi waduk eksisting. Untuk perbandingan tampungan waduk baik pola operasi waduk eksisting maupun pola operasi waduk optimasi pernah mengalami kondisi lebih baik satu sama lain dan bila diperhatikan pola garis tampungan waduk eksisting dan optimasi memiliki pola atau tren yang hampir sama.

4. Dari evaluasi kinerja Waduk Wonogiri diketahui bahwa keandalan waduk optimasi untuk memenuhi kebutuhan air PLTA dan memenuhi kebutuhan 80% air di hilir waduk adalah 100%. Hasil tersebut lebih baik dari evaluasi kinerja waduk eksisting yang memiliki keandalan 82.50%, kelentingan 47.62% dan kerawanan 12.79% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan keandalan 75.42%, kelentingan 35.59% serta kerawanan 12.18% dalam memenuhi 80% dari kebutuhan air di hilir waduk.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. (2010). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tentang Bendungan, Jakarta.
2. Anonim. (2004). Pedoman Pengoperasian Waduk Tunggal, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, Jakarta.
3. Aprizal. (2003). Optimasi Waduk Menggunakan Program Dinamik Stokastik (Kasus Waduk Saguling Jawa Barat), Tesis, Semarang: Program Pascasarjana Universitas Diponegoro
4. Budihardja, Darjanta. (2009). Kajian Banjir Besar Bengawan Solo Pada Desember 2007 dan Fungsi Waduk Wonogiri Sebagai Pengendali Banjir, Buletin Keairan Vol. 2 No.1, Juni 2009
5. Irvani, Harvi. (2012). Studi Optimasi Pola Operasi Waduk Sutami Akibat Perubahan Iklim, Tesis, Malang: Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya.
6. Janga Reddy dan Kumar Nagesh (2006) Optimal Reservoir Operation Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm, *Jurnal Water Resources Management* 20:861-878
7. Montarcih, L. & Soetopo, W. (2011). Teknik Sumber Daya Air Manajemen Sumber Daya Air. Bandung: CV. Lubuk Agung
8. Soetopo. W. (2010). Operasi Waduk Tunggal. Malang: CV. Asrori