



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

TESIS

**Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Magister**



Oleh :

CAHAYA SANTOSO SAMOSIR

NIM. 126060400011003

MINAT MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR

PROGRAM MAGISTER TEKNIK PENGAIRAN

JURUSAN TEKNIK PENGAIRAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2015



TESIS

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

Oleh:

CAHAYA SANTOSO SAMOSIR

Dipertahankan didepan penguji

Pada tanggal **02 Februari 2015**

Dan dinyatakan memenuhi syarat

Komisi Pembimbing,

Dr.Ir. Widandi Soetopo, M. Eng.

Pembimbing I

Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D.

Pembimbing II

Malang, Februari 2015

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik

Jurusan Teknik Pengairan

Program Magister Teknik Pengairan

Ketua,

Dr. Ery Suhartanto ST., MT.

NIP. 19730305 199903 1 002

**LEMBAR IDENTITAS PENGUJI****JUDUL TESIS**

Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)

Nama Mahasiswa : CAHAYA SANTOSO SAMOSIR

NIM : 126060400011003

Program Studi : Magister Teknik Pengairan

Minat : Manajemen Sumber Daya Air

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Dr.Ir. Widandi Soetopo, M. Eng.

Anggota : Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D

TIM DOSEN PENGUJI

Penguji 1 : Dr.Ir. Widandi Soetopo, M. Eng.

Penguji 2 : Emma Yuliani, ST., MT., Ph.D

Penguji 3 : Dr.Ir. Rispiningtati M. Eng.

Penguji 4 : Ir. Moh. Sholichin MT. Ph.D.

Tanggal Ujian Tesis : 02 Februari 2015

SK Penguji : 105/UN.10.6/SK/2015

**PERNYATAAN
ORISINALITAS TESIS**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah TESIS ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah TESIS ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia TESIS ini digugurkan dan gelar akademik yang saya peroleh (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU no.20 tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Februari 2015

Mahasiswa,

Nama : Cahaya Santoso Samosir

NIM : 126060400011003

PM : Teknik Pengairan

FT UB

RINGKASAN

Cahaya Santoso Samosir, Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang, Januari 2015. Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri). Komisi Pembimbing: Dr. Ir. Widandi Soetopo, M. Eng. dan Emma Yuliani, ST. MT. Ph.D.

Waduk Wonogiri merupakan waduk serbaguna yang terletak 3 km di selatan Kota Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah. Waduk Wonogiri diharapkan dapat memanfaatkan potensi air yang ada, salah satunya untuk keperluan pemenuhan energi listrik tenaga air. Akan tetapi seiring dengan berjalannya waktu, 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 evolutionery*.

Pada penelitian ini dilakukan dua simulasi, yaitu simulasi pola operasi waduk eksisting dan simulasi pola operasi waduk optimasi. Simulasi pola operasi waduk eksisting dilakukan dengan menggunakan data debit outflow historis sepanjang 10 tahun dari tahun 2004 - 2013. Simulasi eksisting bertujuan untuk mengetahui perkiraan produksi listrik serta tampungan waduk. Simulasi pola operasi waduk optimasi dilakukan dengan membuat aturan lepasan waduk berdasarkan status tampungan dengan tujuan untuk mendapatkan produksi listrik yang paling maksimal. Hasil produksi listrik dan tampungan dari kedua simulasi ini kemudian dibandingkan.

Dari penelitian yang telah dilakukan, penerapan optimasi dengan menggunakan model stokastik memiliki hasil produksi listrik yang lebih baik bila dibandingkan dengan pola operasi waduk eksisting. Terlihat dari produksi rata-rata tahunan hasil pola operasi optimasi yang mengalami peningkatan 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. Evaluasi kinerja dilakukan untuk mengetahui *performance* waduk dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan kebutuhan air di hilir waduk. Hasil simulasi juga menunjukan kinerja waduk hasil optimasi lebih baik bila dibandingkan kinerja waduk eksisting. Waduk optimasi memiliki keandalan 100% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan pemenuhan 80% kebutuhan di hilir waduk. Ini mengindikasikan bahwa dengan menerapkan aturan lepasan waduk optimasi, waduk tidak pernah mengalami kegagalan dalam memenuhi kebutuhan air PLTA dan kebutuhan di hilir. Hasil evaluasi pola operasi waduk eksisting didapatkan bahwa keandalan waduk dalam memenuhi lepasan PLTA sebesar 82.50% dan 75.42% dalam memenuhi kebutuhan di hilir waduk.

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

SUMMARY

Cahaya Santoso Samosir, Graduate Program of Water Resources Engineering, Water Resources Departement, Engineering Faculty, Brawijaya University Januari 2015. Optimization of Reservoir Operation Rule in order to meet Hydroelectric Power Plants Demand (Case Study on Wonogiri Reservoir)
Lecturer: Dr. Ir. Widandi Soetopo, M. Eng. dan Emma Yuliani, ST. MT. Ph.D.

Wonogiri multi purpose reservoir is located 3 km to the south of Wonogiri Regency, Central Java. The reservoir is expected to utilize water into the source of energy using Hidroelectric 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.

On this study, there were two kind simulations: (1) existing operational simulation rule; and (2) optimization operational simulation rule. The existing operational simulation rule was using ten years historical water outflow data (from 2004 to 2013), while the optimization operational simulation rule was using the approximate power production as well as the capacity of the reservoir itself by controlling the reservoir output passing throught hydroelectric power plant based on its water capacity to get maximum electric production. After data had been collected, it would be compared each other.

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 in 10 years.

The performance evaluation was done in order to know reservoir performance in order to meet hydroelectric power plant need and also water demand in downstream. The simulation result showed that the performance of reservoir using optimization operational simulation rule was also better than the existing operational simulation rule. The optimization operational simulation rule made the reservoir had 100% reliability to produce electricity and 80% to fulfill water demand in downstream, while the existing operational simulation pattern was only 82.50% reliability to produce electricity and 75.42% in fulfilling water demand in downstream. This study result indicated that using The optimization operational simulation rule can prevent the failure to supply hydroelectric power plant need and water demand in downstream. In conclusion, the optimization operational simulation rule was recommended to be applied in reservoir.

Keywords: existing operational simulation rule; optimization operational simulation rule, reservoir operational rule, stochastic model, reservoir evaluation, wonogiri reservoir



KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penyusun panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas petunjuk dan rahmat-Nya sehingga Tesis yang berjudul “Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)” dapat diselesaikan dengan baik.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat wajib yang harus ditempuh oleh Mahasiswa Program Pasca Sarjana Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa Tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penyusun menyambut baik sumbangan berupa saran maupun kritik yang bermanfaat.

Tak lupa penyusun menyampaikan rasa terima kasih atas segala bantuan dan bimbingan selama proses penyusunan Tesis ini, terutama kepada:

1. Dr. Ir. Widandi Soetopo, M. Eng dan Emma Yuliani, ST. MT. Ph.D. selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan pengarahan dalam penyusunan Tesis ini
2. Seluruh Dosen Pengajar yang telah memberikan waktu dan ilmunya selama masa perkuliahan serta segenap staf administrasi.
3. Teman-teman Angkatan 2012 yang selalu membantu dan memberikan inspirasi dalam penyusunan Tesis ini.

Akhir kata penyusun berharap semoga Tesis ini memberikan sumbangan yang berarti bagi dunia pengetahuan dan penelitian di Indonesia khususnya bidang Teknik Pengairan

Malang, Januari 2015

Penyusun



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR IDENTITAS PENGUJI.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS.....	ii
RINGKASAN.....	iii
SUMMARY.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x

BAB I: PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Identifikasi Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Rumusan Masalah.....	4
1.5. Maksud dan Tujuan.....	5
1.6. Studi Terdahulu yang Pernah Dilakukan.....	5

BAB II: KAJIAN PUSTAKA

2.1. Waduk.....	8
2.2. Klasifikasi Waduk.....	10
2.3. Lengkung Kapasitas Waduk.....	10
2.4. Analisa Debit.....	11
2.4.1. Debit Andalan.....	11
2.4.2. Uji Kesesuaian.....	12
2.5. Operasi dan Pola Operasi Waduk.....	17
2.6. Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	18
2.7. Model Stokastik.....	20
2.8. Genetetic Algorithms.....	21
2.9. Simulasi Aturan Operasi Waduk.....	22
2.10. Optimasi Operasi Waduk.....	26
2.11. Kinerja Pengoperasian Waduk.....	27
2.11.1. Keandalan (<i>Reliability</i>).....	28
2.11.2. Kelentingan (<i>Resiliency</i>).....	29
2.11.3. Kerawanan (<i>Vulnerability</i>).....	30

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Daerah Studi.....	32
3.2. Data dan Kebutuhan Data.....	36
3.2.1. Data Outflow Eksisting.....	37
3.2.2. Data Debit Inflow Waduk.....	38
3.2.3. Data Karakteristik Waduk.....	39
3.2.4. Data Kebutuhan Air di Hilir.....	42



3.2.5. Data Instalasi PLTA	43
3.2.6. Data Pendukung Lainnya	43
3.3. Desain Penelitian	44

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Debit Inflow	48
4.1.1. Uji Kesesuaian	49
4.1.1.1. Uji Chi Square	49
4.1.1.2. Uji <i>Smirnov Kolmogorov</i>	57
4.2. Simulasi Pola Operasi Waduk Eksisting	69
4.3. Optimasi Pola Operasi Waduk Dengan Simulasi Stokastik	77
4.4. Perbandingan Hasil Pola Operasi Eksisting dengan Hasil Optimasi	87
4.4.1. Perbandingan Produksi Listrik	87
4.4.2. Perbandingan Tampung Waduk	91
4.5. Evaluasi Kinerja Waduk	94
4.5.1. Keandalan Waduk	94
4.5.2. Keandalan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk	95
4.5.3. Kelentingan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepas PLTA	96
4.5.4. Kelentingan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan di Hilir	97
4.5.5. Kerawanan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan PLTA	98
4.5.6. Kerawanan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan di Hilir	99

BAB IV : PENUTUP

5.1. Kesimpulan	100
5.2. Saran	102

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kapasitas Tampungan yang Hilang antara 1980-2011.....	3
Tabel 1.2 Studi Terdahulu pada lokasi yang sama.....	5
Tabel 1.3 Studi Terdahulu dengan menggunakan metode yang sama.....	6
Tabel 2.1 Nilai Xcr Untuk uji Kai-Kuadrat.....	14
Tabel 2.2 Nilai kritis untuk uji Kolmogorof-Smirnov.....	16
Tabel 3.1 Data Bendungan di Wilayah Sungai Bengawan Solo.....	34
Tabel 3.2 Data dan Kebutuhan Data.....	37
Tabel 3.3 Kapasitas Tampungan Waduk Wonogiri.....	42
Tabel 4.1 Uji <i>Chi Square</i> Tiap Bulan (Tahun 2004-2013).....	51
Tabel 4.2 Uji <i>Smirnov Kolmogorof</i> Tiap Bulan (Tahun 2004-2013).....	58
Tabel 4.3 Perbandingan Produksi Listrik Total Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2013.....	90
Tabel 4.4 Perhitungan Kehandalan Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA.....	95
Tabel 4.5 Perhitungan Kehandalan Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk.....	96
Tabel 4.6 Perhitungan Kelentingan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA.....	96
Tabel 4.7 Perhitungan Kelentingan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk.....	97
Tabel 4.8 Perhitungan Kerawanan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA.....	98
Tabel 4.9 Perhitungan Kerawanan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk.....	99
Tabel 5.1 Lepasn Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi.....	101
Tabel 5.1 Rekapitulasi kinerja waduk.....	102



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Waduk dengan PLTA	18
Gambar 3.1 Peta DAS di Wilayah Sungai Bengawan	33
Gambar 3.2 Sketsa Pola Operasi Waduk Wonogiri	35
Gambar 3.3 Peta Lokasi Waduk Wonogiri	36
Gambar 3.4 Debit Outflow Eksisting Waduk Wonogiri Tahun 2004 - 2013	38
Gambar 3.5 Debit Inflow Waduk Wonogiri Tahun 2004 - 2013	39
Gambar 3.6 Tinggi Muka Air dan Tampungan Awal Waduk Wonogiri	41
Gambar 3.7 Lengkung Kapasitas Waduk Wonogiri	41
Gambar 3.8 Kebutuhan Air di Hilir Waduk Wonogiri	42
Gambar 3.9 Kompleks Perkantoran dan Turbin PLTA Wonogiri	43
Gambar 3.10 Bagan Alir Penelitian	45
Gambar 3.11 Bagan Alir Simulasi Pola Operasi Waduk	47
Gambar 4.1 Debit Rerata Bulanan Waduk Wonogiri	48
Gambar 4.2 Debit Rerata Pertahun Waduk Wonogiri	49
Gambar 4.3 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2004 - 2006	73
Gambar 4.4 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2007 - 2009	74
Gambar 4.5 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2010 - 2013	74
Gambar 4.6 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2004 - 2006	75
Gambar 4.7 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2007 - 2009	76
Gambar 4.8 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2010 - 2013	76
Gambar 4.9 Lepasannya Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi	79
Gambar 4.10 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2004 - 2006	83
Gambar 4.11 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2007 - 2009	83
Gambar 4.12 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2010 - 2013	84
Gambar 4.13 Produksi Listrik Hasil Optimasi Tahun 2004 - 2006	85
Gambar 4.14 Produksi Listrik Hasil Optimasi Tahun 2007 - 2009	86
Gambar 4.15 Produksi Listrik Hasil Optimasi Tahun 2010 - 2013	86
Gambar 4.16 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2006	88
Gambar 4.17 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 - 2009	88
Gambar 4.18 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 - 2009	89
Gambar 4.19 Perbandingan Produksi Listrik Total Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2013	90
Gambar 4.20 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2006	92
Gambar 4.21 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 - 2009	92
Gambar 4.21 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2010 - 2013	93



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Perhitungan Uji Chi-Square
Lampiran II	Perhitungan Uji Smirnov Kolmogorof
Lampiran III	Perhitungan Simulasi Pola Operasi Waduk Eksisting
Lampiran IV	Perhitungan Simulasi Pola Operasi Waduk Optimasi Dengan Model Stokastik
Lampiran V	Perhitungan Evaluasi Kinerja Waduk Wonogiri Eksisting
Lampiran VI	Perhitungan Evaluasi Kinerja Waduk Wonogiri Hasil Optimasi
Lampiran VII	Data Debit Inflow Setengah Bulanan (15 Harian) Waduk Wonogiri
Lampiran VIII	Data Debit Outflow Setengah Bulanan (15 Harian) Waduk Wonogiri
Lampiran XI	Rekapitulasi Kebutuhan Di Hilir Waduk Wonogiri
Lampiran X	Hitungan Volume Tampungan Waduk Wonogiri Tahun 2013



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan peradaban serta industri yang semakin pesat menyebabkan kebutuhan akan energi listrik dari tahun ke tahun terus mengalami peningkatan. Hal ini berdampak pada semakin berkurangnya pasokan terhadap energi listrik tersebut. Berdasarkan laporan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT- PLN (Persero) 2010 - 2019 dalam kesimpulannya diketahui bahwa proyeksi kebutuhan tenaga listrik pada tahun 2019 diperkirakan akan mencapai 334,4 TWh atau mengalami pertumbuhan rata-rata 9,3% per tahun.

Berbagai upaya harus ditempuh untuk menambah pasokan terhadap kebutuhan energi listrik ini. Pembangunan sebuah waduk atau bendungan menjadi salah satu alternatif dalam pemenuhan kebutuhan energi ini melalui Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), hal ini dimungkinkan karena Indonesia memiliki potensi 75.000 MW bagi pembangkit listrik tenaga air yang saat ini masih dapat ditingkatkan penggunaannya (Aprizal, 2003). Akan tetapi untuk membangun sebuah waduk diperlukan banyak pertimbangan yaitu dana yang besar, lokasi yang luas, waktu yang cukup lama serta dampak masalah sosial.

Alternatif lain sebagai upaya pemenuhan kebutuhan listrik adalah mengoptimalkan semua elemen waduk yang telah ada dengan melakukan pola operasi tertentu sehingga didapatkan hasil yang paling maksimal.



Ada beberapa model optimasi yang sering digunakan dalam pengoptimasian Sumber Daya Air. Model optimasi operasi waduk tersebut dapat berupa Program Linier (*Linear Programming*) dan Program Dinamik (*Dynamic Programming*) (Soetopo Widandi, 2010). Masing-masing model optimasi tersebut memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri dibandingkan yang lain.

Pada penelitian ini model optimasi yang digunakan adalah model simulasi stokastik. Pemilihan model ini didasarkan bahwa *problem* optimasi dalam pengelolaan Sumber Daya Air lebih sering bersifat non linier sehingga diharapkan model ini dapat mengakomodasi fenomena stokastik dari inflow sungai.

Waduk Wonogiri adalah sebuah waduk yang terletak 3 km di selatan Kota Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah. Perairan danau buatan ini dibuat dengan membendung sungai terpanjang di Pulau Jawa yaitu Sungai Bengawan Solo. Waduk Wonogiri mulai dibangun pada akhir tahun 1970-an dan mulai beroperasi pada tahun 1983. Waduk Wonogiri diharapkan dapat memanfaatkan potensi air yang ada, salah satunya untuk keperluan pemenuhan energi listrik tenaga air. Akan tetapi seiring dengan berjalannya waktu, 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.

1.2. Identifikasi Masalah

Untuk memenuhi kebutuhan yang ada, ketersediaan tampungan waduk Wonogiri sangat terbatas. Ditambah lagi adanya perubahan tata guna lahan bagian hulu Sungai Kedu 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 1.1 Kapasitas Tampungan yang Hilang antara 1980-2011

Zona Waduk	Kapasitas Tampungan (Juta m ³)		Kapasitas yang Hilang	
	1980	2011	Volume (m ³)	Ratio dari volume Awal (%)
Tampungan Banjir (El. 136 – 138.3 m)	220	159	61	27.73
Tampungan Efektif (El. 127.0 – 136.0 m)	440	305	135	30.68
Tampungan Mati (< 127.0 m)	120	59	61	50.83

Sumber : Data Sounding Perum Jasa Tirta I

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 dihilir 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. Keuntungan dari cara simulasi bila dibandingkan dengan cara



optimalisasi adalah bahwa model simulasi bersifat fleksibel dalam menangani hubungan-hubungan kompleks yang bersifat nonlinier.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan pada Waduk Wonogiri dengan mengambil batasan-batasan sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian adalah Waduk Serbaguna Wonogiri
2. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta 1.
3. Optimalisasi menggunakan model simulasi stokastik.
4. Kondisi DAS Bengawan Solo dianggap *unregulated* sehingga debit inflow yang masuk ke Waduk Wonogiri tidak ada pengaruh dari bangunan lain di hulu waduk.
5. Kehilangan akibat rembesan dan evaporasi relatif kecil, sehingga diabaikan.
6. Optimalisasi dilakukan pada output PLTA (produksi listrik)
7. Tidak dilakukan perhitungan sedimen yang mengendap di dasar waduk dan diasumsikan besarnya tetap setiap tahunnya dengan kondisi sedimen yang tinggi.

1.4. Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan batasan-batasan yang ada, permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil simulasi pola operasi Waduk Wonogiri eksisting?
2. Bagaimanakah pola kebijakan pengoperasian Waduk Wonogiri berdasarkan hasil optimalisasi?



3. Bagaimana hasil produksi listrik serta tampungan Waduk Wonogiri hasil pola operasi waduk optimasi bila dibandingkan dengan pola pengoperasian eksisting?

4. Bagaimana kinerja Waduk Wonogiri bila menggunakan pola operasi waduk hasil optimasi?

1.5. Maksud dan Tujuan

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.

1.6. Studi Terdahulu yang Pernah Dilakukan

Dalam rangka mengkaji dan mempelajari permasalahan optimasi pola operasi waduk dengan model simulasi stokastik, maka terlebih dahulu akan dikemukakan beberapa penelitian dari studi terdahulu yang terkait dilihat dari kesamaan lokasi maupun metode yang digunakan, diantaranya yaitu:

Tabel 1.2 Studi Terdahulu pada lokasi yang sama

No	Tahun	Penulis	Judul	Hasil Penelitian
1	2010	Febry Asthia Miranti	<i>Peningkatan Kinerja Operasi Waduk Wonogiri</i>	Studi ini menggunakan program linier dalam mengoptimasi kebutuhan air irigasi. Dari perhitungan diketahui bahwa adanya indikasi kesulitan mengikuti pola operasi waduk yang telah ditetapkan oleh Tim TKPSDA sehingga Peningkatan kinerja dilakukan dengan pemberian air irigasi yang dilakukan secara bergilir antar petak tersier.



2	2009	Darjanta Budihardja	<i>Kajian Banjir Besar Bengawan Solo Pada Desember 2007 dan Fungsi Waduk Wonogiri Sebagai Pengendali Banjir</i>	Dari studi ini diketahui penyebab terjadinya banjir besar di Kota Solo pada tanggal 27 Desember 2007 adalah akibat hujan ekstrim yang menyebabkan debit puncak dan hasil evaluasi kinerja Waduk Wonogiri sebagai Pengendali Banjir dinyatakan Waduk Wonogiri telah beroperasi sesuai prosedur.
3	2008	Sardi, Bambang Agus Kironoto, Rachmad Jayadi	<i>Kajian Penanganan Sedimentasi Dengan Waduk Penampung Sedimen Pada Bendungan Serbaguna Wonogiri</i>	Dari studi ini diketahui penanganan sedimentasi dengan menggunakan waduk penampung sedimen dapat menurunkan besarnya deposisi <i>netto</i> yang terjadi pada waduk sebesar kurang lebih 30.41% bila dibandingkan dengan kondisi sebelum adanya waduk penampung sedimen tersebut.
	2007	Muhammad Mukhlisin	<i>Environmental Study Impact Of Sediment Flushing On Downstream Area Case Study: Planning Of Sediment Flushing On Gajah Mungkur Dam, Wonogiri, Central Java</i>	Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi prediksi dampak, pengelolaan dan monitoring penanganan sedimentasi Waduk Wonogiri dengan metode flusing. Dari studi ini diketahui metode flusing berdampak pada lingkungan terutama di bagian hilir bendungan.

Tabel 1.3 Studi Terdahulu dengan menggunakan metode yang sama

No	Tahun	Penulis	Judul	Hasil Penelitian
1	2012	Moh. Hilmi	<i>Optimasi Pola Operasi Waduk Pelaparado Di Kabupaten Bima Propinsi NTB</i>	Dari studi ini diperoleh penjatahan air irigasi yang paling optimal pada masing-masing periode sehingga didapat keuntungan yang maksimal berdasarkan kebutuhan dan ketersediaan air yang ada.
2	2012	João Luiz Boccia	<i>Reservoir Operation Applied To Hydropower Systems</i>	Dalam penelitian ini, model yang diusulkan didasarkan pada optimasi non-linear programming, yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman matematika, GAMS. Masalah optimasi yang dirumuskan diselesaikan oleh linear / non-linear solver pemrograman yang digunakan untuk mengembangkan model untuk mengoptimalkan multi-tujuan sistem operasi waduk.



2	2010	Gusta Gunawan dan Alex Kurniawandi	Penerapan Teknik Optimasi dan Simulasi dalam penyusunan pola operasi waduk untuk pemenuhan kebutuhan Energi Listrik	Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah teknik optimasi dengan program linier dan simulasi. Pendekatan-pendekatan yang digunakan berdasarkan teknik analisa sistem. Hasil optimasi berupa pola operasi yang optimum serta produksi listrik di evaluasi dengan simulasi. Dalam hal ini simulasi berfungsi untuk meninjau kegagalan dari target optimasi.
3	2008	Karni Natalia P.R	Penyusunan Rule Curve Waduk Menggunakan Model Program Dinamik Deterministik	Salah satu metode optimasi untuk menyusun rule curve berdasarkan inflow historis adalah dengan metode optimasi PD Deterministik. Hasil forward run berupa storage dan release irigasi optimum yang digunakan untuk menyusun pedoman operasi waduk. Dari rule curve yang diperoleh menunjukan kinerja operasi waduk di lapangan masih dapat ditingkatkan.
4	2006	Mulyana Wangsadi pura dan Rachmat Suria Lubis	Penggunaan Program Dinamik Deterministik dalam Penentuan Kurva Pengatur Pengoperasian Waduk Berdasarkan Kondisi Musim Tahun Air	Dari studi ini diperoleh rule curve Waduk Derma hasil optimasi sebagai batas pengoperasian berdasarkan tinjauan kondisi kritis musim dalam tahun air yaitu tahun basah, tahun normal dan tahun kering untuk memenuhi kebutuhan air irigasi.
5	2005	Nait Costandji	Optimasi Pola Operasi Waduk Tilong dengan Program Dinamik Deterministik	Diperoleh pola operasi Waduk Tilong yang paling optimal dalam kaitan dengan pemenuhan kebutuhan air untuk irigasi dan air baku, dengan meminimalkan kekurangan air dan memaksimalkan penyaluran air.
6	2003	Aprizal	Optimasi Waduk Menggunakan Program Dinamik Stokastik (Kasus Waduk Saguling Jawa Barat)	Pada penelitian ini, penerapan teknik analisa sistem menggunakan PD stokastik. Hasil produksi listrik menunjukan peningkatan bila dibandingkan dengan pola operasi eksisting. Dari simulasi untuk memeriksa kinerja waduk saguling dengan berdasarkan pola operasi yang optimasi diperoleh tingkat keandalan 91.67%.
7	2000	Natsul Kholis	Optimasi Pengoperasian Waduk Sutami Dengan Program Dinamik Deterministik	Diperoleh pola operasi Waduk Sutami yang lebih fleksibel dengan penjabatan air waduk yang paling optimum untuk pengendalian banjir dan pembangkit listrik yang sesuai debit inflow.
8	1996	K R Sreenivasan, S Vedula	Reservoir Operation For Hydropower Optimization A Chance-Constrained Approach	Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan pola operasi waduk yang dapat memenuhi energi tahunan maksimum PLTA dan memenuhi kebutuhan air irigasi.



BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1. 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. Waduk adalah tampungan untuk menyimpan air pada waktu kelebihan agar dapat dipakai pada waktu diperlukan (Soedibyo, 2003).

Manajemen air (*water management*) di waduk merupakan usaha untuk mengatur dan mengendalikan jumlah air yang masuk dan keluar dari waduk. Pengaturan bertujuan agar penggunaan air untuk berbagai kepentingan manusia dapat diatur dengan baik, dan menunjang kesejahteraan manusia. Air yang dikendalikan adalah air hasil tampungan waduk dari air hujan maupun sungai yang memasok debit ke dalam waduk, sehingga air dapat disediakan dalam waktu atau tempat yang tepat dalam jumlah yang diperlukan.

Untuk pendistribusian air waduk secara optimal, diperlukan suatu pedoman pola pengoperasian waduk. Banyak hal yang berpengaruh dan harus diperhatikan dalam pengoperasian waduk, antara lain masukan air ke waduk, karakteristik waduk, keluaran air dari waduk, metode serta pendekatan yang dipergunakan dalam mengoptimalkan pengoperasian waduk tersebut.

Dalam memudahkan dalam pengamatan dan fungsi pengawasan waduk, waduk dibedakan dalam berbagai tingkatan zona tampungan atau level elevasi



yang menunjukkan kondisi tertentu pada waduk. Zona tampungan atau level tersebut sebagai berikut (Garg, 1982 dalam Aprizal, 2003)

a) Level Genangan Normal atau Level Konservasi Maksimum, adalah elevasi maksimum yang akan tercapai oleh muka air selama kondisi pengoperasian normal.

b) Level Genangan Minimum adalah elevasi muka air terendah yang harus dipertahankan selama kondisi pengoperasian normal. Level ini dapat ditentukan oleh elevasi outlet terendah pada waduk ataupun juga oleh minimum head yang dibutuhkan agar bekerja secara efisien.

c) Tampungan Aktif adalah volume air yang tersimpan di dalam waduk antara Level Genangan Minimum dan Level Genangan Normal. Volume tampungan aktif pada waduk multiguna dapat dibagi ke dalam volume konservasi dan volume pengendali banjir.

d) Tampungan Mati adalah volume air yang tersimpan di bawah Level Genangan Minimum yang tidak banyak berguna selama pengoperasian waduk.

e) Level Genangan Maksimum. Pada saat terjadi banjir besar (*high floods*) air dilimpaskan melalui spillways, namun air akan meningkat di atas Level Genangan Normal sampai pada suatu level tertentu yang merupakan level maksimum. Level maksimum yang tercapai air selama banjir besar ini dikenal dengan Level Genangan Maksimum.

f) Tampungan Tambahan, merupakan volume air yang tidak dapat dikontrol, volume ini hanya terjadi selama berlangsungnya banjir dan tidak dapat disimpan untuk keperluan selanjutnya.

g) *Bank Storage* adalah sejumlah air yang merembes ke dalam tanggul permeabel waduk selama pengisian waduk, namun akan keluar kembali begitu waduk dikosongkan. Jumlah hanya beberapa persen dari volume total



waduk, bergantung pada formasi geologis batuan wilayah tempat waduk tersebut dibangun.

- h) *Valley Storage* adalah sejumlah air tersimpan di dalam saluran sungai, bahkan telah ada sebelum waduk tersebut dibangun.

2.2. Klasifikasi Waduk

Berdasarkan fungsinya, waduk dapat diklasifikasikan menjadi 2 (dua) jenis, yaitu :

1. Waduk eka guna (*single purpose*)

Waduk eka guna adalah waduk yang dioperasikan untuk memenuhi satu kebutuhan, misalnya kebutuhan air irigasi, air baku atau PLTA. Pengoperasian waduk eka guna lebih mudah karena tidak terjadi konflik dalam pengoperasiannya atau konflik kepentingan. Pada waduk eka guna pengoperasian hanya mempertimbangkan pemenuhan satu kebutuhan.

2. Waduk multiguna (*multi purpose*)

Waduk multiguna adalah waduk yang dioperasikan untuk memenuhi berbagai kebutuhan misalnya memenuhi kebutuhan air irigasi, air baku dan PLTA. Kombinasi dari berbagai kebutuhan dimaksudkan untuk mengoptimalkan fungsi waduk dan meningkatkan kelayakan pembangunan suatu waduk.

2.3. Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk (*storage capacity curve of reservoir*) merupakan suatu kurva yang menggambarkan hubungan antara luas muka air (*reservoir area*), volume (*storage capacity*), dengan elevasi (*reservoir water level*). Fungsi lengkung kapasitas waduk adalah untuk mengetahui berapa besarnya tampungan pada elevasi tertentu, sehingga dapat ditentukan ketinggian muka air



yang diperlukan untuk mendapatkan besarnya volume tampungan pada suatu elevasi.

Dari persamaan lengkung kapasitas tinggi dapat ditentukan elevasi muka air waduk dengan persamaan (Garg, 2002 dalam Irvani, H., 2013):

$$\Delta V = \frac{a_1 + a_2}{2} (\Delta h)$$

Dengan :

ΔV = Volume tampungan total (m³)

$a_1, a_2, \dots$ = Luas area pada kontur (m²)

Δh = Beda tinggi antara dua kontur (m)

2.4. Analisa Debit

2.4.1. Debit Andalan

Debit andalan diartikan sebagai debit yang tersedia untuk keperluan tertentu (seperti irigasi, PLTA, air minum dan lain-lain) sepanjang tahun, dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan.

Ada berbagai cara untuk menentukan debit andalan, masing-masing cara mempunyai ciri khas sendiri-sendiri. Pemilihan metode yang sesuai umumnya didasarkan atas pertimbangan data yang tersedia, jenis kepentingan dan pengalaman. Metode-metode untuk analisis debit andalan tersebut antara lain berikut :

a. Metode Karakteristik aliran (*flow characteristic*)

Perhitungan debit andalan dengan metode ini antara lain memakai data yang didapatkan berdasar karakteristik alirannya. Metode ini umumnya dipakai untuk :

1. Daerah pengaliran sungai (DPS) dengan fluktuasi maksimum dan minimumnya relatif besar dari tahun ketahun.
2. Kebutuhan yang relatif tidak konstan sepanjang tahun.



3. Data yang tersedia cukup panjang.

Karakteristik aliran dalam hal ini dihubungkan dengan kriteria sebagai berikut:

1. Tahun normal, jika debit rata-rata tahunnya sama dengan atau mendekati debit rata-rata dari tahun ke tahun.
2. Tahun kering, jika debit rata-rata tahunannya di bawah debit rata-rata dari tahun ketahun.
3. Tahun basah, jika debit rata-rata tahunannya diatas debit rata-rata dari tahun ketahun.

b. Metode tahun penentu (*basic year*)

Penentuan debit andalan dengan menggunakan metode ini antara lain dengan menentukan suatu tahun tertentu sebagai dasar perencanaan.

c. Metode bulan penentu.

Metode ini seperti pada karakteristik aliran tetapi hanya dipilih bulan tertentu sebagai dasar perencanaan.

d. Metode Q rata-rata minimum.

Penentuan debit andalan dengan metode ini berdasar data debit rata-rata bulanan yang minimum ini biasanya dipakai untuk:

- DPS dengan fluktuasi debit maksimum dan minimum tidak terlalu besar dari tahun ke tahun.
- Kebutuhan relatif konstan sepanjang tahun.

2.4.2. Uji Kesesuaian

uji kesesuaian distribusi berguna untuk mengetahui data yang ada sesuai dengan jenis distribusi teoritis yang dipilih atau perlu dilakukan pengujian lebih lanjut. Pengujian ini dilakukan dengan dua cara yaitu uji Kai-Kuadrat (*Chi-Square*) dan uji Smirnov Kolmogorov.



1. Teori Uji Chi-Square

Uji Kai-Kuadrat digunakan untuk menguji apakah distribusi pengamatan dapat disamai dengan baik oleh distribusi teoritis. Pengujian hipotesa dengan uji chi-square menggunakan rumus : (Montarich, L., dan Soetopo, W., 2013)

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}$$

Dengan,

χ^2 = Parameter Kai-Kuadrat terhitung

k = banyaknya kelas frekuensi.

O_j = frekuensi pengamatan kelas j

E_j = frekuensi teoritis kelas j

Dengan derajat bebas n adalah

$n = k - 1$ Jika frekuensi dihitung tanpa perlu mengestimasi parameter dari sampel.

$n = k - 1 - m$ Jika frekuensi dihitung dengan mengestimasi m parameter dari sampel.

Dalam uji Chi-Square (χ^2) untuk kesesuaian distribusi, maka hipotesanya adalah:

Hipotesa : H_0 = Sample memenuhi syarat distribusi yang diuji.

H_1 = Sample tidak memenuhi syarat distribusi yang diuji.

Harga χ^2 tabel dicari pada tabel *Distribusi Chi-Square* untuk derajat bebas n tersebut di atas α (Level of Significance) misalnya = 5%. Apabila $\chi^2 < \chi^2$ tabel, maka H_0 diterima, dan jika sebaliknya maka H_0 ditolak.



Tabel 2.1 Nilai Xcr. Untuk uji Kai-Kuadrat

v	PERCENTILE P							
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,90	0,75	0,50	0,25
1	7,88	6,63	5,02	3,94	2,71	1,32	0,455	0,102
2	10,60	9,21	7,38	5,99	4,61	2,77	1,39	0,575
3	12,80	11,30	9,35	7,81	6,25	4,11	2,37	1,21
4	14,90	13,30	11,10	9,49	7,78	5,39	3,36	1,92
5	16,70	15,10	12,80	11,10	9,24	6,63	4,35	2,67
6	18,50	16,80	14,40	12,60	10,60	7,84	5,35	3,45
7	20,30	18,50	16,00	14,10	12,00	9,04	6,35	4,25
8	22,00	20,10	17,50	15,50	13,40	10,20	7,34	5,07
9	23,60	21,70	19,00	16,90	14,70	11,40	8,34	5,90
10	25,20	23,20	20,50	18,30	16,00	12,50	9,34	6,74
11	26,80	24,70	21,90	19,70	17,30	13,70	10,30	7,58
12	28,30	26,20	23,30	21,00	18,50	14,80	11,30	8,44
13	29,80	27,70	24,70	22,40	19,80	16,00	12,30	9,30
14	31,30	29,10	26,41	23,70	21,10	17,10	13,30	10,20
15	32,80	30,60	27,50	25,00	22,30	18,20	14,30	11,00
16	34,30	32,00	28,80	26,30	23,50	19,40	15,30	11,90
17	35,70	33,40	30,20	27,60	24,80	20,50	16,30	12,80
18	37,20	34,80	31,50	28,90	26,00	21,60	17,30	13,70
19	38,60	36,20	32,90	30,10	27,20	22,70	18,30	14,60
20	40,00	37,60	34,20	31,40	28,40	23,80	19,30	15,50

Sumber : Montarcih L. dan Soetopo W., 2013



2. Teori Uji Kolmogorov - Smirnov

Sebagai alternatif untuk menguji kesesuaian distribusi (*Goodness of Fit*), maka dapat digunakan uji Smirnov-Kolmogorof. Caranya dengan mengurutkan data X dari kecil ke besar. Kemudian menghitung Simpangan maksimum D dengan rumus:

$$D = \text{Max} |P_x(x) - S_n(x)|$$

dengan: $P_x(x)$ = posisi data x menurut garis sebaran teoritis.

$S_n(x)$ = posisi data x menurut pengamatan, yang dalam hal ini dipakai posisiplotting menurut Weibull.

Untuk mendapatkan $S_n(x)$ dengan memakai posisi plotting dari weibull, maka digunakan rumus berikut:

$$S_n(x) = \frac{n}{1 + N}$$

Dengan : n = nomor urut data

N = banyak data

Sedangkan $P_x(x)$ adalah besarnya probabilitas untuk lebih kecil dari data X atau dengan kata lain merupakan luasan sebelah kiri di bawah kurva PDF (*Probability Density Function*) daripada sebaran yang diuji untuk data X . Apabila diketahui Pr (Probabilitas terjadi), maka:

$$P_x(x) = 1 - Pr$$

dengan: Pr = Probabilitas data X untuk disamai atau dilampaui.

Simpangan maksimum D hasil perhitungan lalu dibandingkan dengan nilai D kritis (D_{cr}) dari tabel **Nilai D_{cr} untuk uji Kolmogorof-Smirnov**.



Tabel 2.2 Nilai kritis untuk uji Kolmogorof-Smirnov

Ukuran sampel (n)	Level of significance α (persen)				
	20	15	10	5	1
5	0,446	0,474	0,510	0,563	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,409	0,486
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,391
17	0,250	0,266	0,296	0,318	0,380
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,370
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,361
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,352

Sumber : Montarcih L. dan Soetopo W., 2013

Apabila ukuran sample $n > 20$, maka gunakan rumus asimtotik tersebut untuk mendapatkan nilai D_{cr} .

Hipotesa : H_0 = Sample memenuhi syarat distribusi yang diuji.

H_1 = Sample tidak memenuhi syarat distribusi yang diuji.

Apabila $D < D_{cr}$ tabel, maka H_0 diterima, dan jika sebaliknya maka H_0 ditolak.



2.5. 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. Ini direncanakan dengan cara menganalisa perilaku operasi waduk yang bertujuan membuat keseimbangan antara volume tampungan, debit *inflow* dan *outflow*.

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 debit outflow yang keluar dari waduk selama periode t

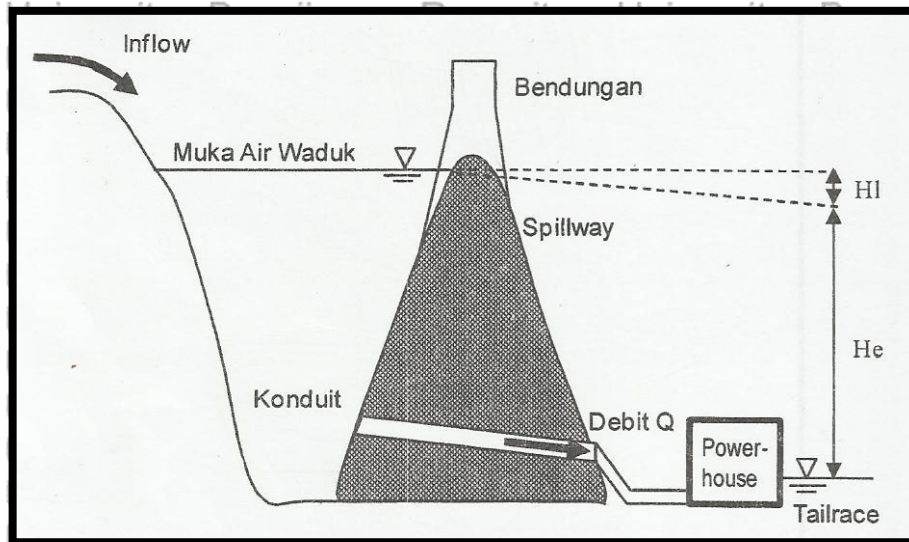
Aturan umum dalam waduk adalah :

1. Air waduk tidak boleh turun di bawah tampungan aktif. Dalam banyak keadaan, maka batas bawah tampungan aktif ini ditentukan oleh tingginya lubang *konduit*.
2. Air waduk tidak dapat melebihi batas atas tampungan aktif. Dalam banyak keadaan maka batas atas tampungan aktif ini ditentukan oleh puncak *spillway*. Apabila terjadi kelebihan air, maka kelebihan ini akan melimpah (*spillout*).



2.6. Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pada waduk yang tujuannya (atau salah satu daripada tujuannya) adalah untuk membangkitkan tenaga listrik, maka skema daripada PLTA adalah kurang lebih dapat ditampilkan sebagai gambar berikut.



Sumber: (Widandi Soetopo 2010)

Gambar 2.1 Waduk dengan PLTA

Debit untuk PLTA dialirkan lewat konduit, kemudian lewat pipa pesat (penstock) apabila powerhouse terletak cukup jauh dari bendungan. Lalu di dalam powerhouse debit Q ini dilewatkan turbin untuk diambil energinya yang kemudian dikonversi menjadi tenaga listrik lewat generator yang terhubung turbin. Dari turbin maka seterusnya debit Q ini akan dikeluarkan ke tailrace yang akan mengembalikan lagi debit ke sungai. Untuk waduk dengan kapasitas tampungan yang signifikan, maka energi yang dimaksud tersebut dihasilkan dari tinggi jatuh, yang merupakan perbedaan antara elevasi muka air waduk dengan elevasi muka air di tailrace (Soetopo W, 2010).

Dari total tinggi jatuh, maka terjadi kehilangan tinggi (head loss) selama perjalanan air lewat konduit dan saluran lainnya sampai mencapai turbin.



Kehilangan tinggi ini dinotasikan H_l . Tinggi jatuh sisanya adalah merupakan tinggi jatuh efektif H_e , yang akan menghasilkan daya listrik lewat rumus berikut.

$$P = E_{tg} \times 9.8 \times H_e \times Q$$

Dengan :

P = Daya listrik bangkitan dalam kilowatt (kW)

E_{tg} = Efisiensi turbin-generator (0,8-0,9)

H_e = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit PLTA (m^3/dt)

Secara umum besarnya E_{tg} (efisiensi turbin-generator) bervariasi menurut kondisi daripada instalasi PLTA, yaitu antara 0,8 (pada instalasi yang sudah tua) sampai 0,9 (pada instalasi yang masih baru), tetapi kondisi ini adalah dengan asumsi bahwa tinggi jatuh H_e dan debit Q berada pada nilai-nilai optimal sesuai dengan spesifikasi desain daripada turbin-generator. Dalam pelaksanaan operasi waduk, baik tinggi jatuh H_e maupun debit Q dapat menyimpang dari nilai-nilai optimal, sehingga nilai dari E_{tg} akan menjadi lebih kecil. Efisiensi turbin dapat diperoleh dari rumus :

$$\eta = \frac{P}{9,8 \times H_e \times Q} \times 100\%$$

Dengan :

η = Efisiensi turbin generator

P = Daya turbin (kW)

H_e = Tinggi jatuh efektif (m)

Q = Debit air (m^3/dt)

Pada simulasi operasi waduk PLTA ini diasumsikan bahwa debit Q selalu berkisar pada nilai optimal, sehingga untuk suatu periode tertentu PLTA dijalankan selama masih ada jatah air untuk mengalirkan debit optimal ini. Selain itu PLTA akan berhenti beroperasi sampai periode berikutnya. Hal ini berarti



bahwa besarnya E_{tg} hanya bervariasi tergantung kepada tinggi jatuh, yang berarti tergantung pada muka air waduk (MAW) yang selanjutnya tergantung kepada status tampungan waduk (Soetopo W, 2010).

Pada simulasi operasi waduk PLTA ini yang diperhatikan adalah besarnya produksi energi. Jika dilakukan waktu operasi dalam jam, maka hasilnya adalah energi dalam satuan kilowatt.jam (kWh). Akan tetapi debit Q yang dikalikan dengan jumlah detik dalam 1 jam (yaitu 3600) adalah volume air (m^3) yang lewat selama waktu satu jam. Karenanya persamaan energi yang dihasilkan oleh PLTA adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{E_{tg} \times 9.8 \times H_e \times V}{3600}$$

Dengan :

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

E_{tg} = Efisiensi turbin-generator (0,8-0,9)

H_e = Tinggi jatuh efektif (m)

V = Volume Debit PLTA (m^3)

Hasil tersebut merupakan hasil energi dalam 1 hari, untuk mendapatkan hasil dalam 1 bulan maka harus dikalikan dengan jumlah hari pada bulan tersebut.

Rumus energi PLTA pada persamaan di atas akan digunakan untuk membuat tabel unit produksi energi listrik pada hasil dan pembahasan berikutnya.

2.7. Model Stokastik

Pada ilmu pengetahuan statistik, kata stokastik memang sinonim dengan acak (random), namun dalam hidrologi kata itu dipakai secara khusus yang menunjuk pada suatu rangkaian waktu dimana didalamnya hanya sebagian saja yang bersifat acak (Linsley, Kohler dan Paulhus, 1976 dalam Irvani Harvi 2013). Dalam hidrologi stokastik urutan waktu itu mutlak penting. Penyajian stokastik



mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan urutan-urutan kejadiannya. Setiap urutan-urutan masukan menghasilkan urutan keluaran dari sistem yang dipelajari.

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

1. Model yang mendefinisikan sejumlah kemungkinan diskrit dari debit aliran sungai dan volume tampungan, masing-masing dengan probabilitasnya.
2. Model yang mengidentifikasi produksi air tetap tahunan, distribusinya dalam setahun dan keandalannya.
3. 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*.

Berdasarkan uraian di atas dalam model stokastik, benar-benar diperhitungkan faktor ketidakpastian (*uncertainty*) dalam variabel-variabel hidrologi ataupun parameter-parameter model. Walaupun lebih kompleks, model ini hanya berperan sebagai penyaring bagi alternatif-alternatif yang ada sebelum dilakukan studi simulasi yang lebih mendetail.

2.8. Genetic Algorithms

Pada kenyataannya, sebagian besar masalah optimasi dalam sumber daya air melibatkan tujuan yang saling bertentangan, sehingga tidak ada metode yang paling efisien dalam menemukan permasalahan *multi trade-off* tersebut (Reddy Janga dan Kumar Nagesh 2006). Sebagian besar waduk memiliki banyak kegunaan (*multi purpose*) dan sistem yang terjadi dalamnya bersifat alamiah.

Telah banyak penelitian yang melakukan kajian terhadap optimasi sistem waduk



yang bersifat kompleks seperti dengan menggunakan program dinamik, program linier dan program non linier. Penggunaan program dinamik dalam mengoptimasi waduk multi sistem memiliki permasalahan utama dalam *dimensionality* ketika terjadi peningkatan *state variabel*. Teknik pengoptimasian dengan program linier dan non linier memiliki masalah penting dalam menangani pendekatan fungsi tujuan yang bersifat *discontinuous*, *non-differentiable*, *non-convex*. 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. Metode *Genetic algorithms* menggunakan populasi dari solusi dalam setiap iterasi (Goldberg, 1989). Inilah salah satu hal yang membedakan *Genetic Algorithms* (GA) dengan metode yang lain. Metode *Genetic algorithms* (GA) menggunakan informasi fungsi tujuan secara cepat, dan tidak membutuhkan fungsi turunan atau fungsi tambahan lainnya. *Genetic algorithms* (GA) juga menggunakan inisialisasi acak dan perhitungan stokastik dalam melakukan operasinya, sehingga metode GA dapat menemukan pencarian di setiap tempat di ruang pencarian, dan dapat mengatasi masalah optimal yang bersifat lokal.

2.9. Simulasi Aturan Operasi Waduk

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

1. Simulasi Aturan Operasi Sederhana

Aturan operasi sederhana adalah dengan melepaskan melepas air waduk untuk memenuhi kebutuhan sepanjang masih ada persediaan air di waduk.

Aturan ini bersifat sederhana karena kontrolnya adalah cukup dengan melihat apakah masih ada air di tampungan aktif waduk saat itu. Apabila waduk sudah



kosong (tampungan waduk nol), maka pemenuhan kebutuhan hanya tergantung daripada besarnya debit inflow.

2. Simulasi Lepas Berdasarkan Tampungan

Pada aturan operasi waduk dimana lepasan berdasarkan status tampungan waduk, maka dilakukan pembatasan terhadap lepasan apabila tampungan waduk menurun besarnya.

3. Simulasi Lepas Rule Curve Tunggal

Rule curve adalah skedul tampungan waduk yang paling ideal untuk diikuti.

Rule Curve adalah merupakan hasil daripada studi optimasi atau studi simulasi. Seperti halnya dengan aturan lepasan berdasarkan tampungan waduk, maka suatu Rule Curve dapat sesuai untuk suatu seri debit inflow tertentu, tetapi tidak begitu cocok untuk seri debit inflow yang lain. Rule curve yang baik adalah jika sesuai untuk suatu kisaran yang cukup luas daripada seri-seri debit inflow.

4. Simulasi Lepas Rule Curve Ganda

Rule Curve Ganda 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.

Menurut PP No. 37/2010, rencana pengelolaan bendungan dilengkapi dengan pola operasi waduk ada tahun kering, tahun normal, dan tahun basah. Pola operasi waduk paling sedikit memuat tata cara pengeluaran air dari waduk sesuai dengan kondisi volume dan/atau elevasi air waduk dan kebutuhan air serta kapasitas sungai di hilir bendungan.

Kebijakan pola pengoperasian waduk dapat dibedakan menjadi lima, yaitu:

1. *Standard Operating Policy (SOP)*

Kebijakan pola pengoperasian waduk berdasarkan SOP adalah dengan menentukan outflow terlebih dahulu berdasarkan ketersediaan air di waduk dikurangi kehilangan air. Se jauh mungkin outflow yang dihasilkan dapat



memenuhi seluruh kebutuhan / *demand* dengan syarat air berada dalam zona kapasitas / tampungan efektif. (Sarono W. dan Asmoro, 2007)

2. Program Dinamik

Program Dinamik diperkenalkan oleh Richard Bellman. Konsep dasar program dinamik (Montarcih dan Soetopo, 2011) adalah sebagai berikut:

- a. Dekomposisi *problem* menjadi subproblem
- b. Kombinasi non-optimal secara otomatis tereliminasi
- c. Subproblem-subproblem dihubungkan satu sama lain sedemikian sehingga tidak terdapat kemungkinan untuk mengoptimasi kombinasi-kombinasi yang tidak *feasible*.

Program ini merupakan suatu metode pendekatan penyelesaian masalah dengan melakukan optimasi terhadap proses pengambilan keputusan ber-rangkaian dengan memberikan suatu ketetapan rangkaian keputusan yang saling berkaitan satu dengan yang lain, yang merupakan fungsi dari tempat dan waktu.

Program dinamik ini pertama kali dikembangkan oleh Bellman pada tahun 1957.

Program ini juga memiliki sejumlah keuntungan dalam pemakaiannya untuk optimasi pendayagunaan sumber daya air, keuntungan dimaksud dapat digunakan untuk merangkum tujuan dan kendala yang bersifat nonlinier, *nonconvex*, dan tidak menerus serta dapat mengakomodir sifat stokastik sistem, dimana sifat tersebut terkait dalam setiap permasalahan sistem sumber daya air (Hall dan Dracup, 1975).

3. Program Linier

Program Linier adalah program dari teknik optimasi yang paling sederhana dan luas penggunaannya baik untuk permasalahan operasi dan pengelolaan yang sederhana hingga permasalahan yang kompleks (Wurbs, 1996). Program ini dapat dipakai apabila terdapat hubungan Linier antar variabel-variabel yang dioptimasi, baik dalam fungsi tujuan maupun fungsi kendala. Program Linier



dipakai untuk menyelesaikan kasus yang mana semua hubungan antara variabelnya adalah linier, baik pada persamaan dan ketidaksetaraan kendala (*constraint*) maupun pada fungsi sasaran (*objective function*). (Montarcih dan Soetopo, 2011). (Yeh, 1985 dalam Sarono W. dan Asmoro, 2007) mengungkapkan apabila permasalahan yang ditinjau bersifat non linier, maka hubungan antara variabel diubah menjadi bentuk linier atau persamaan-persamaan non linier pada fungsi sasaran dan kendala dipecah menjadi beberapa persamaan linier dan diselesaikan dengan metode iterasi dan aproksimasi. (Makrup, 1995; Goulter, 1981 dalam Sarono W. dan Asmoro, 2007) menyatakan bahwa keunggulan program linier adalah kemudahannya untuk penyelesaian permasalahan optimasi berdimensi besar, sedangkan kelemahannya adalah kemungkinan terjadinya kesalahan dan kekeliruan dari hasil program ini sangat besar karena pendekatan yang dilakukan dalam melinierisasi fenomena non linier pada beberapa variabel tidak tepat. Oleh karena itu, keandalan program linier tergantung pada tingkat pendekatan dalam linierisasi hubungan antara variabel.

4. Program Non-linier

Program ini digunakan apabila terdapat hubungan yang non linear antar variabel-variabel yang dioptimasi, baik dalam tujuan maupun kendala. Program ini dahulu tidak banyak dipergunakan karena lebih sulit dibandingkan dengan program linear serta proses penyelesaiannya yang lambat membutuhkan memori komputer yang besar, selain itu membutuhkan penjabaran persamaan-persamaan matematis yang lebih rumit dibandingkan dengan program linear tetapi perkembangan hardware dan software komputer dapat mengatasi keterbatasan dari program ini (Kimpraswil, 2004).



5. Rule Curve

(Mc.Mahon, 1978 dalam Sarono W. dan Asmoro, 2007) menyebutkan bahwa *Rule curve* adalah suatu ilmu yang menunjukkan keadaan waduk pada akhir periode pengoperasian yang harus dicapai untuk suatu nilai *outflow* tertentu *Rule curve* ini digunakan sebagai pedoman pengoperasian waduk dalam menentukan pelepasan yang diizinkan dan sebagai harapan memenuhi kebutuhan. Akan tetapi pada kenyataannya, kondisi muka air waduk pada awal operasi belum tentu akan sama *rule curve* rencana. Untuk mencapai elevasi awal operasi yang direncanakan, mungkin harus lebih banyak volume air yang dibuang. Sebaliknya apabila debit terjadi dari tahun – tahun kering, rencana pelepasan harus disesuaikan dengan kondisi air yang ada.

2.10. Optimasi Operasi Waduk

Pengertian optimasi berhubungan erat dengan maksimal tetapi dengan batasan. Mengoptimalkan identik dengan memaksimumkan dengan sumber daya terbatas (Montarich dan Soetopo, 2011).

Ada tiga tahapan dalam mempersiapkan model optimasi (Kimpraswil, 2004), yaitu :

1. Mengidentifikasi fungsi objektif. Fungsi objektif mengukur efektivitas atau kegunaan yang menghubungkan beberapa kombinasi dari variabel. Fungsi objektif merupakan fungsi yang dioptimasi baik maksimum atau minimum. Contoh fungsi objektif adalah minimum kekurangan (minimum shortage), atau maksimum keuntungan.
2. Mengidentifikasi decision variable secara kuantitatif dan menentukan ketelitiannya.
3. Mengidentifikasi faktor-faktor tertentu yang membatasi (*decision variable*), tahapan ini akan menghasilkan persamaan kendala (*constraints*) yaitu



persamaan aljabar atau ketidak-samaan atau dalam beberapa kasus sama dengan persamaan diferensial, dimana persamaan tersebut harus dipenuhi dalam menentukan nilai maksimum atau minimum dari fungsi dengan persamaan diferensial dimana persamaan tersebut harus dipenuhi dalam menentukan nilai maksimum atau minimum dari fungsi objektif.

Solver merupakan bagian dari fungsi perintah yang sering kali disebut sebagai *what-if analysis tools*. *Solver* akan membantu menemukan nilai optimal (maksimum atau minimum) suatu rumus perhitungan (tujuan) dengan terlebih dahulu menentukan model dari suatu permasalahan yang meliputi:

1. Keputusan yang harus dibuat yang disebut variabel keputusan
2. Ukuran yang dinilai optimal yang disebut variabel tujuan
3. Batasan logis untuk mencapai tujuan yang disebut variabel kendala

Makrup pada tahun 1995 menyebutkan bahwa terdapat tiga komponen utama yang harus diperhatikan. Pertama, untuk apa melakukan sesuatu (*objective*), kedua bagaimana melaksanakannya (*decision variable*) dan ketiga adalah batasan-batasan apa yang digunakan (*constrain*). Di dalam model optimasi ketiga elemen di atas disusun dalam bentuk model matematis menjadi tiga komponen yaitu fungsi tujuan (*objective function*), variabel keputusan (*decision variable*), dan fungsi kendala (*constraint function*).

Spreadsheet seperti *Microsoft Excel* menyediakan cara yang lebih mudah untuk membangun model seperti itu. Sel-sel pada lembar kerja dapat memuat nomor, label, atau suatu formula perhitungan.

2.11. Kinerja Pengoperasian 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).

2.11.1. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya. Untuk pengoperasian waduk paling tidak ada dua macam definisi keandalan yaitu:

a) Persentase keadaan dimana waduk mampu memenuhi kebutuhannya.

Seringkali pada definisi keandalan ini dapat dikaitkan dengan kegagalan.

Dalam hal ini, waduk dianggap gagal jika waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan secara total.

b) Rerata persentase pelepasan waduk dibandingkan dengan kebutuhannya.

Dalam definisi ini, meskipun suplesi waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya, waduk keseluruhan, tidak dianggap gagal total. Tetapi dianggap waduk hanya dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya.

Secara matematis, definisi di atas dapat ditulis dengan variabel " Z_t " yang nilainya ditentukan sesuai dengan dua definisi di atas dan disajikan dalam persamaan berikut:

$$Z_t^1 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, 0 \text{ untuk } R_t \leq D_t$$

$$Z_t^2 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, R_t/D_t \text{ untuk } R_t \leq D_t$$

Dalam jangka panjang, nilai keandalan sistem untuk definisi keandalan yang pertama dapat ditulis sebagai berikut:

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t^1$$

Dengan:

n = Jangka waktu pengoperasian

R_t = Release pada waktu ke- t



D_t = Demand pada waktu ke- t

α_1 = Keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi.

Dalam studi ini dipergunakan definisi keandalan yang pertama. Waduk dianggap gagal jika tidak dapat mensuplai kebutuhan secara total. Kondisi tersebut dipergunakan untuk mengantisipasi pemenuhan kebutuhan lepasan energi listrik dan pemenuhan 80% kebutuhan di hilir waduk, karena jika pemenuhan kebutuhan lepasan energi listrik dan pemenuhan 80% kebutuhan di hilir kurang dari yang ditargetkan maka hasil optimasi tidak dijamin untuk terpenuhi.

2.11.2. Kelentingan (*Resiliency*)

Indikator ini mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Dengan mempergunakan definisi kegagalan yang pertama, perhitungan masa transisi dari kegagalan menjadi keadaannya memuaskan ditulis dengan variabel " W_t " sebagai berikut:

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } Rt - 1 \leq Dt - 1 \text{ dan } Rt \geq Dt \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases}$$

Dalam jangka panjang nilai rerata dari W_t akan menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan.

Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t$$

Dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekwensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan.



Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinu merupakan jumlah total waktu rerata waduk mengalami gagal dibagi dengan frekwensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_{gagal} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t}$$

Dimana T_{gagal} adalah jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinu.

Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam kegagalan secara kontinu dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_{gagal} = \frac{1 - \alpha 1}{\rho}$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal, maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar. Oleh karena indikator kelentingan didefinisikan sebagai γt berikut:

$$\gamma t = \frac{1}{T_{gagal}} = \frac{\rho}{1 - \alpha 1}$$

Dimana γt adalah kinerja kelentingan

2.11.3. Kerawanan (*Vulnerability*)

Kerawanan adalah besaran dari kegagalan yang didapat dari perbedaan antara kapasitas waduk dan jumlah air yang dibutuhkan, dibagi dengan jumlah air yang dibutuhkan.

Dalam hal ini jika terjadi kegagalan maka diukur seberapa besar suatu kegagalan yang terjadi. Dalam studi ini kerawanan didefinisikan sebagai nilai kekurangan (DEft) air pelepasan dari kebutuhan, nilai DEF, didefenisikan sebagai berikut:



$$DEFT = \begin{cases} Dt - Rt & \text{jika } Rt \leq Dt \\ 0 & \text{jika } Rt \geq Dt \end{cases}$$

Oleh karena kinerja kerawanan tersebut dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai berikut :

1. Nilai rerata "deficit ratio"

$$V1 = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{DEFT}{Dt} \right)}{\sum_{t=1}^n Wt}$$

2. Nilai maksimum "deficit ratio"

$$V2 = \text{Max} \left\{ \frac{DEFT}{Dt} \right\}$$

3. Nilai maksimum "deficit"

$$V3 = \text{Max} \{ DEFT \}$$



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Daerah Studi

Sungai Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang di Pulau Jawa (600 km) yang mengalir dari Pegunungan Sewu di Barat-Selatan Surakarta ke Laut Jawa di utara Surabaya, dengan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) 16.100 km². DAS Bengawan Solo merupakan DAS terbesar di Pulau Jawa, yang terletak di Propinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur. Lokasi DAS Bengawan Solo pada posisi 110°18'BT sampai 112°45'BT dan 6°49'LS sampai 8°08' LS. DAS Bengawan Solo dibagi ke dalam tiga Sub DAS, yang meliputi; Sub DAS Bengawan Solo Hulu, Sub DAS Kali Madiun dan Sub DAS Bengawan Solo Hilir. Luas Sub DAS Bengawan Solo Hulu ± 6.072 km², luas Sub DAS Kali Madiun ± 3.755 km², sedangkan luas Sub DAS Bengawan Solo Hilir ± 6.273 km². Peta wilayah DAS Bengawan Solo dapat dilihat pada gambar 3.1.

Pengembangan infrastruktur yang dilakukan di Sungai Bengawan Solo telah dilakukan oleh pemerintah, yaitu diantaranya dengan dibangunnya beberapa bendungan besar dan bendungan kecil untuk berbagai keperluan, seperti yang disajikan pada tabel 3.1.



Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo

Gambar 3.1 Peta DAS di Wilayah Sungai Bengawan


Tabel 3.1 Data Bendungan di Wilayah Sungai Bengawan Solo

NO	IDENTIFIKASI		LOKASI			Tipe Bendungan	Fungsi
	Nama Dam	Tahun	Sungai	Kab./Kota	Propinsi		
1	Delingan	1923	Tempuran	Karanganyar	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	PLTA
2	Ketro	1984	Ketro	Sragen	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
3	Krisak	1943	Krisak	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
4	Nawangan	1976	Kedungnungku	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
5	Ngancar	1946	Beling	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Batu Inti Tanah	Irigasi
6	Parang Joho	1980	Tempuran	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
7	Plumbon	1928	Baron	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
8	Song Putri	1984	Bengawan Solo	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Batu Inti Tanah	Irigasi
9	Wonogiri/Gajah Mungkur	1982	Bengawan Solo	Wonogiri	Jawa Tengah	Urg. Batu Inti Tanah	Serbaguna
10	Gondang	1986	Jurug	Lamongan	Jawa Timur	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
11	Pacal	1933	Pacal	Bojonegoro	Jawa Timur	Urg. Batu Inti Tanah	Irigasi
12	Pondok	1995	Madun/Dero	Ngawi	Jawa Timur	Urg. Batu Inti Tanah	Irigasi, PLTA
13	Prijetan	1916	Prijetan	Bojonegoro	Jawa Timur	Urg. Tanah Homogen	Irigasi
14	Tlogo Ngabel	1930	Tarum/Simnok	Ponorogo	Jawa Timur	Urg. Tanah Homogen	Irigasi, PLTA

Sumber : BBWS Bengawan Solo

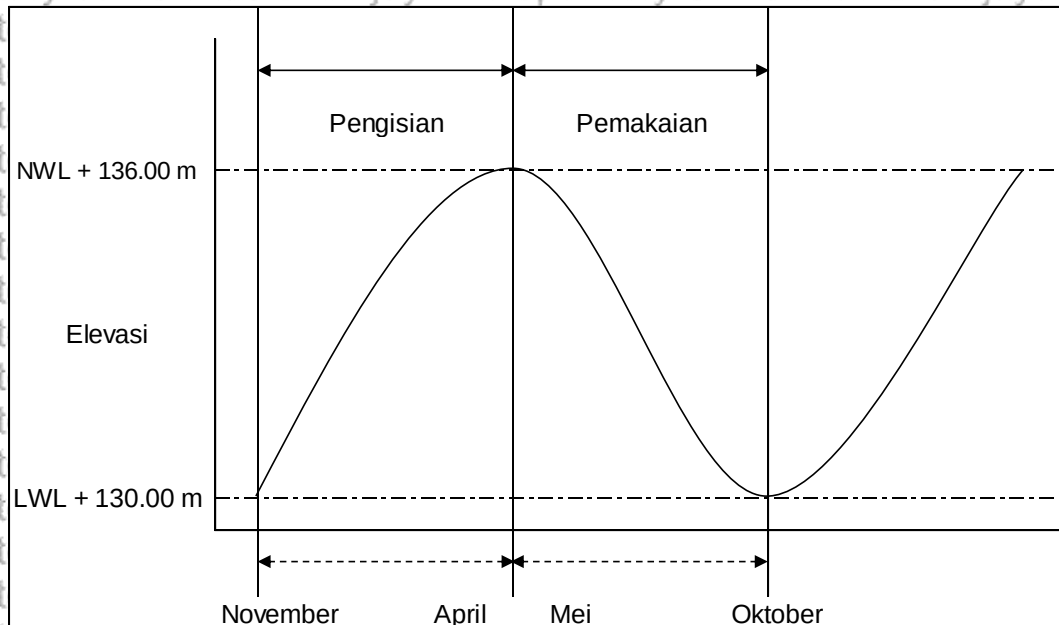
Dari semua bendungan yang ada di Wilayah Sungai Bengawan Solo, Waduk Wonogiri merupakan waduk terbesar yang pernah dibangun. Waduk Wonogiri disebut juga Bendungan Gajah Mungkur terletak di Desa Danuarjo, Kecamatan Wonogiri, Kabupaten Wonogiri Provinsi Jawa Tengah. Waduk Wonogiri memiliki luas *catchment area* 1.350 km². Waduk Wonogiri terletak 3 km di selatan Kota Kabupaten Wonogiri. Pembangunan Waduk Wonogiri dimulai sejak tahun 1976. Pengisian pertama dilakukan pada Bulan Juli 1981 dan kemudian diresmikan pada Bulan November di tahun yang sama. Diawal beroperasinya, Waduk Wonogiri berfungsi sebagai pengendali banjir dan baru mulai difungsikan untuk manfaat lainnya pada tahun 1983.

Manfaat utama dari Bendungan atau Waduk Wonogiri adalah untuk pengendali banjir, irigasi, penyedia listrik dan air minum. Manfaat lainnya untuk manfaat sekitar waduk yaitu perikanan darat, pariwisata dan konservasi sumber daya air. Peta lokasi Waduk Wonogiri disajikan pada gambar 3.3.

Pola Operasional untuk Waduk Wonogiri terbagi menjadi dua periode, yaitu:

1. Musim hujan, pada Bulan November s/d Bulan april
2. Musim kemarau, Bulan Mei s/d Bulan Oktober

Waktu pengisian dan pemakaian air waduk untuk masing – masing jenis dapat digambarkan sebagai berikut :

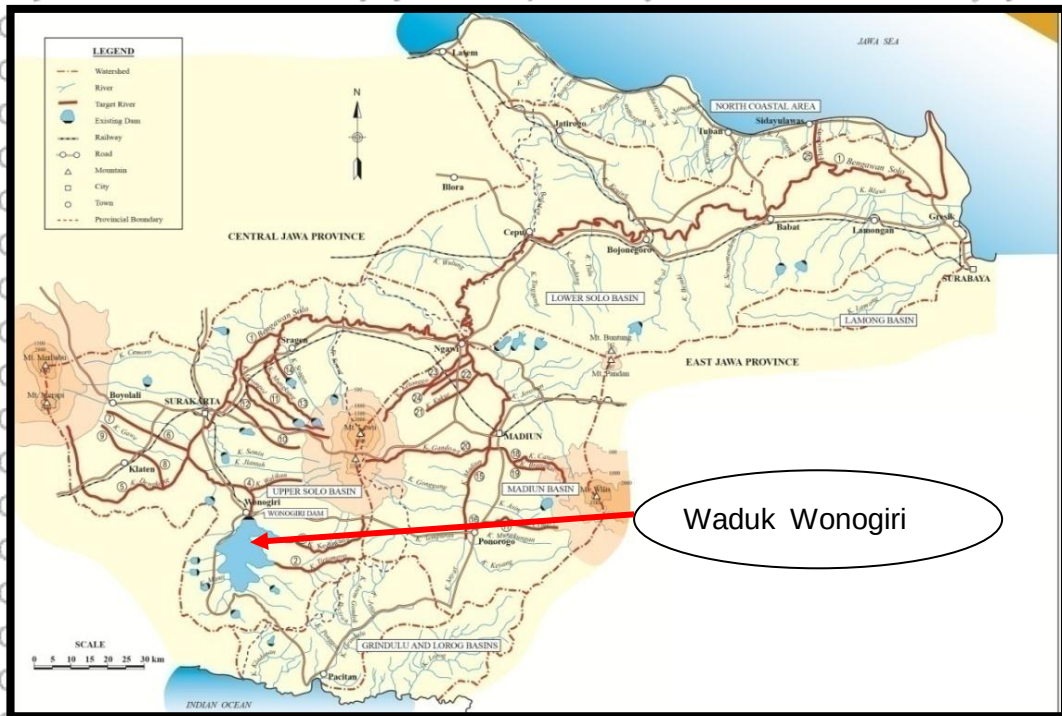


Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo

Gambar 3.2 Sketsa Pola Operasi Waduk Wonogiri

Sedimentasi yang terjadi di Bendungan Wonogiri mengakibatkan berkurangnya kapasitas tampungan aktif waduk. Low water level (LWL) yang diawal pengoperasiannya pada elevasi 127.00 meter kini menjadi 130.00 meter.

Kebijakan operasi Waduk Wonogiri pada akhir periode banjir (15 April) mengharuskan ketinggian air waduk berada ada elevasi +135.3 m dan pada akhir periode pengisian berada pada elevasi +136 m.



Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo

Gambar 3.3 Peta Lokasi Waduk Wonogiri

3.2. Data dan Kebutuhan Data

Untuk mengoptimasi pola operasi waduk dengan menggunakan simulasi model stokastik memerlukan data primer yang diperoleh langsung di lapangan maupun data sekunder yang diperoleh dari berbagai instansi. Kebutuhan data-data tersebut adalah sebagai berikut:



Tabel 3.2 Data dan Kebutuhan Data

NO	DATA	SUMBER
1	Data outflow eksisting	Perum Jasa Tirta I
2	Data inflow	Perum Jasa Tirta I
3	Data karakteristik waduk	Perum Jasa Tirta I
	– Data teknis waduk	
	– Kapasitas tampungan waduk	Perum Jasa Tirta I
4	Data kebutuhan air di hilir	
	– Data kebutuhan air irigasi	
	– Data kebutuhan air minum	
	– Data kebutuhan air industri	
5	Data instalasi PLTA Waduk Wonogiri	PLTA Wonogiri
	– Data teknis stasiun pembangkit listrik	
	– Data elevasi muka air Tailrace	
	– Data kehilangan tinggi tekan di <i>penstock</i> dan <i>waterway</i>	
6	Data pendukung lainnya	Studi pustaka dan sumber lainnya

3.2.1. Data Outflow Eksisting

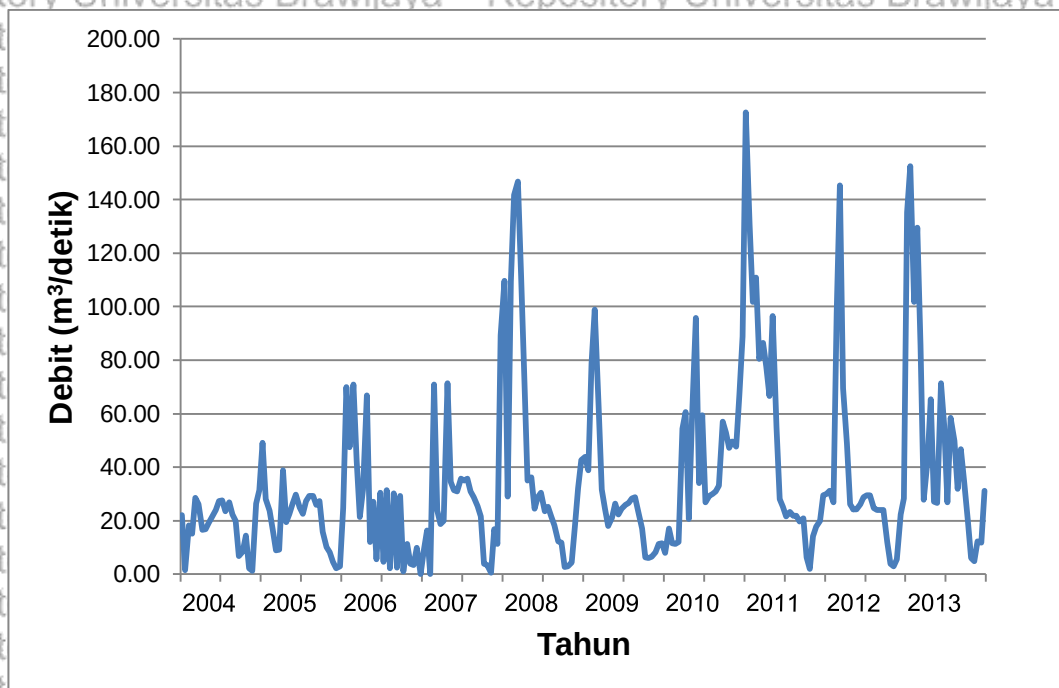
Data outflow historis yang digunakan pada penelitian ini adalah sepanjang 10

Tahun terakhir (2004 - 2013) yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta I Wonogiri.

Data ini kemudian akan dianalisis dengan menggunakan model simulasi untuk

mengetahui produksi listrik dan elevasi tampungan waduk eksisting. Grafik

outflow eksisting dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



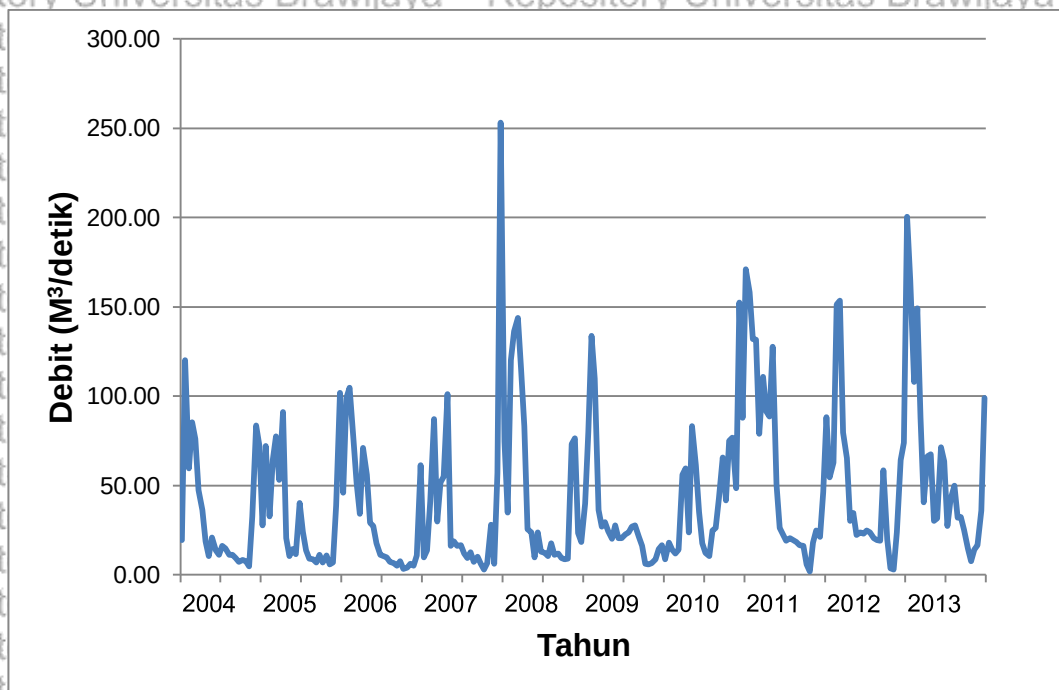
Sumber : Perum Jasa Tirta I

Gambar 3.4 Debit Outflow Eksisting Waduk Wonogiri Tahun 2004 - 2013

Dari gambar grafik debit outflow eksisting diatas dapat dilihat bahwa debit outflow terbesar terjadi pada Tahun 2011 dengan besaran 172.49 m³/detik.

3.2.2. Data Debit Inflow Waduk

Data debit inflow yang dibutuhkan adalah data debit yang masuk ke dalam sistem Waduk Wonogiri. Data debit inflow historis 15 (lima belas) harian yang tersedia seluruhnya sepanjang 10 tahun terakhir (2004 - 2013). Debit inflow yang terjadi di Waduk Wonogiri memiliki perbedaan fluktuasi maksimum dan minimum yang cukup besar dari tahun ke tahun. Pada musim basah debit inflow yang masuk ke Waduk Wonogiri sangat tinggi akan tetapi ketika musim kering tiba debit inflow yang masuk sangat rendah. Data Debit inflow yang masuk ke Waduk Wonogiri dapat dilihat pada gambar 3.5 dibawah ini



Sumber : Perum Jasa Tirta I

Gambar 3.5 Debit Inflow Waduk Wonogiri Tahun 2004 - 2013

Dari gambar grafik debit inflow diatas dapat dilihat bahwa debit inflow terbesar terjadi pada Tahun 2007 dengan besaran 253.29 m³/detik.

3.2.3. Data Karakteristik Waduk

Data karakteristik waduk yang dimaksud pada penelitian ini mencakup data teknis waduk dan data kapasitas tampungan waduk.

Data teknis Waduk Wonogiri pada awal perencanaan yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta I adalah sebagai berikut :

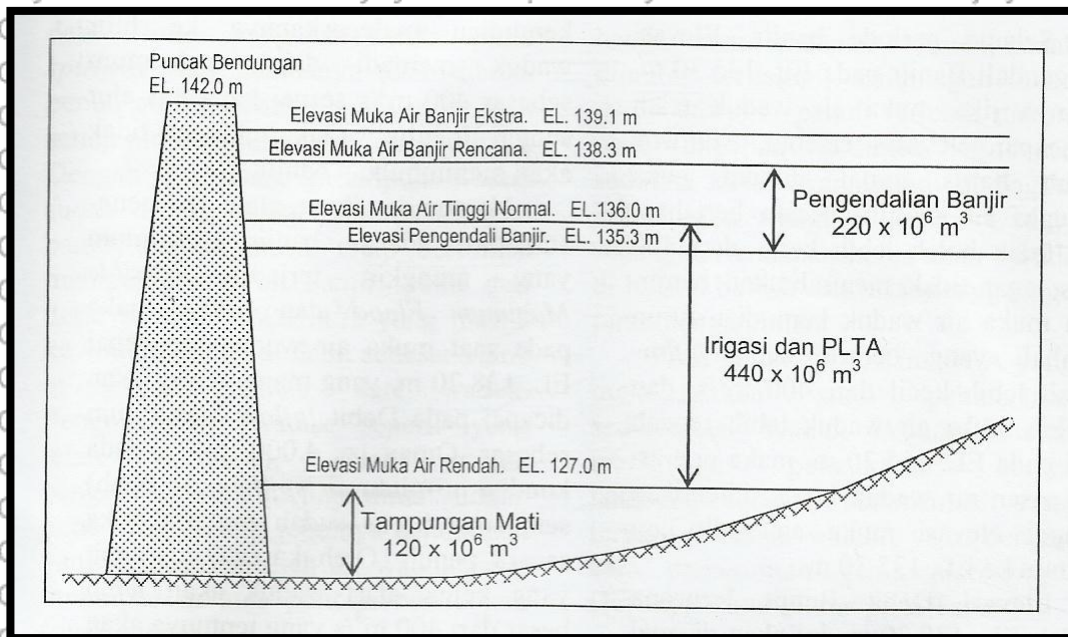
1. Tubuh Bendungan

- DTA/ Catchmen Area : 1.350 Km²
- Curah hujan rata-rata/thn : 2.074 mm

2. Waduk/Reservoir

- LWL (Low Water Level) : 127.00 m
- NFL (Normal Water Level) : 136.00 m

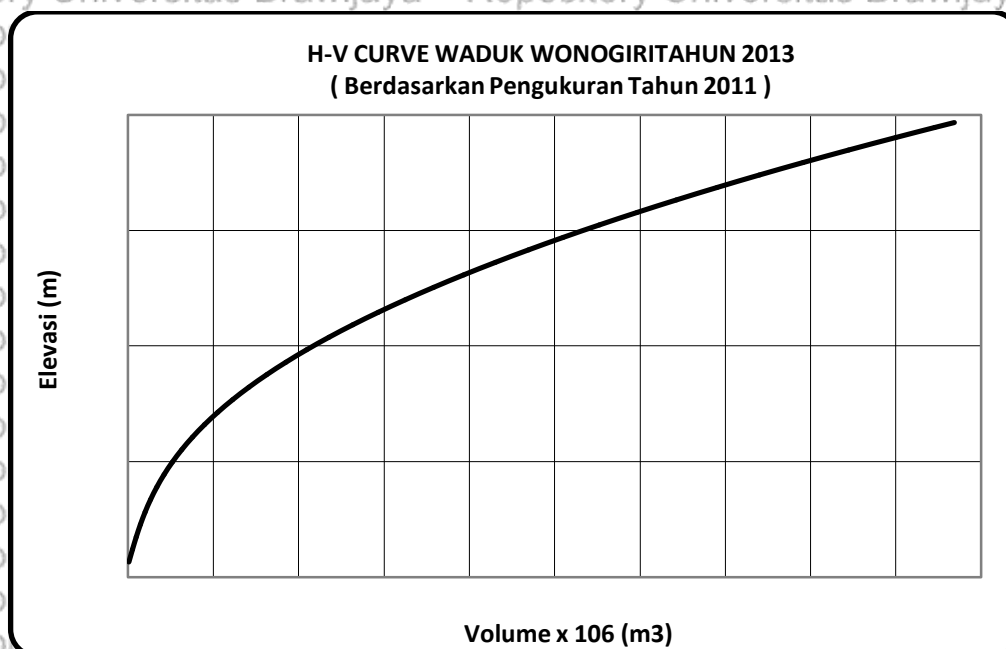
•	FWL (Flood Water Level)	: 138.30 m
•	El. 127.00 – 136.00	: (tampung/engan (87 km
•	El. 136.00 – 138.20	: Pasang surut (804 ha)
•	El. 138.20 – 140.00	: green belt (1653 ha)
•	Vol. pada el 138.30 m	: 735 juta m ³
•	Vol. peredam banjir	: 220 juta m ³
•	Vol. kantong lumpur	: 120 juta m ³
•	Luas engangan	: 73.60 km ²
3.	Main Dam	
•	Type	: Rockfill
•	El. puncak	: 142.00 m
•	Panjang puncak	: 830 m
•	Tinggi puncak	: 40 m
4.	Spillway	
•	Debit banjir max	: 5.100 m3/detik
•	PMF	: 9.600 m3/detik
•	Type	: Pelimpah dengan radial gate
•	Mercu pelimpah	: El. 131.00 m ; lebar 30 m
•	Pintu pelimpah	: 4 Pintu radial (lebar 7.5m & tinggi 7.8 m)



Sumber: Darjanta Budihardja, 2009

Gambar 3.6 Tinggi Muka Air dan Tampungan Awal Waduk Wonogiri

Data kapasitas tampungan dan luasan waduk yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada kurva massa dibawah ini :



Sumber: Perum Jasa Tirta I

Gambar 3.7 Lengkung Kapasitas Waduk Wonogiri



Dari lengkung kapasitas tersebut dapat diketahui tampungan waduk berbagai elevasi sebagai berikut :

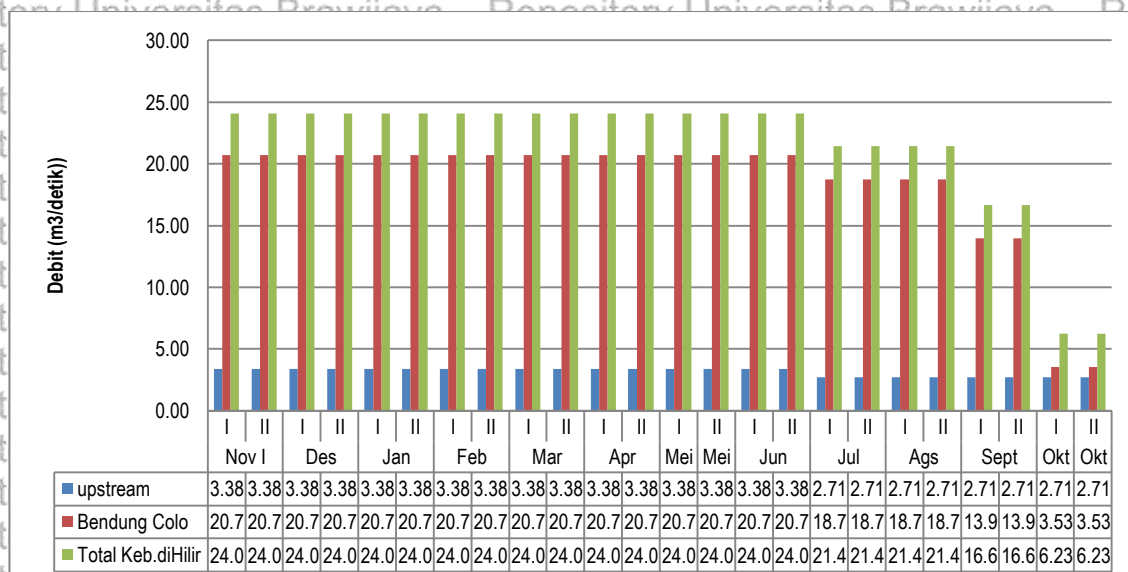
Tabel 3.3 Kapasitas Tampungan Waduk Wonogiri

No	Elevasi (meter)	Tampungan (juta m ³)
1	LWL + 127.00	59.468
2	NFL + 136.00	364.935
3	FWL + 138.3	490.118

Sumber : Perum Jasa Tirta I

3.2.4. Data Kebutuhan Air di Hilir

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, Waduk Wonogiri dibangun untuk memenuhi berbagai kebutuhan. Fungsi utama Waduk Wonogiri selain untuk memenuhi kebutuhan air pembangkit listrik tenaga air dan pengendali banjir juga berfungsi untuk memenuhi kebutuhan air di hilir. Kebutuhan air tersebut meliputi kebutuhan air irigasi (23.200 Ha), kebutuhan air minum (PDAM) dan kebutuhan air industri. Pada penelitian ini kebutuhan air irigasi dibatasi hanya sampai kebutuhan air di Bendung Colo saja.



Sumber : Perum Jasa Tirta I

Gambar 3.8 Kebutuhan Air di Hilir Waduk Wonogiri



3.2.5. Data Instalasi PLTA

Salah satu tujuan dibangunnya Waduk Wonogiri adalah sebagai pembangkit listrik. PLTA Waduk Wonogiri terletak di sebelah hilir bendungan. Instalasi PLTA Wonogiri memiliki 2 unit turbin type kaplan vertikal dengan kapasitas 65 KW dengan 2 unit generator arus bolak balik. Kapasitas terpasang PLTA Wonogiri adalah 12.400 KW. Kemampuan puncak tiap unit adalah 8.700 KW/Unit. Berdasarkan data yang diperoleh dari Perum Jasa Tirta I hasil PLTA tahunan adalah sebesar 32.600 MWh. Data Instalasi PLTA ini digunakan untuk menghitung perkiraan besarnya energi yang dihasilkan PLTA per periode bulan operasi.



Sumber: Hasil Dokumentasi

Gambar 3.9 Kompleks Perkantoran dan Turbin PLTA Wonogiri

3.2.6. Data Pendukung Lainnya

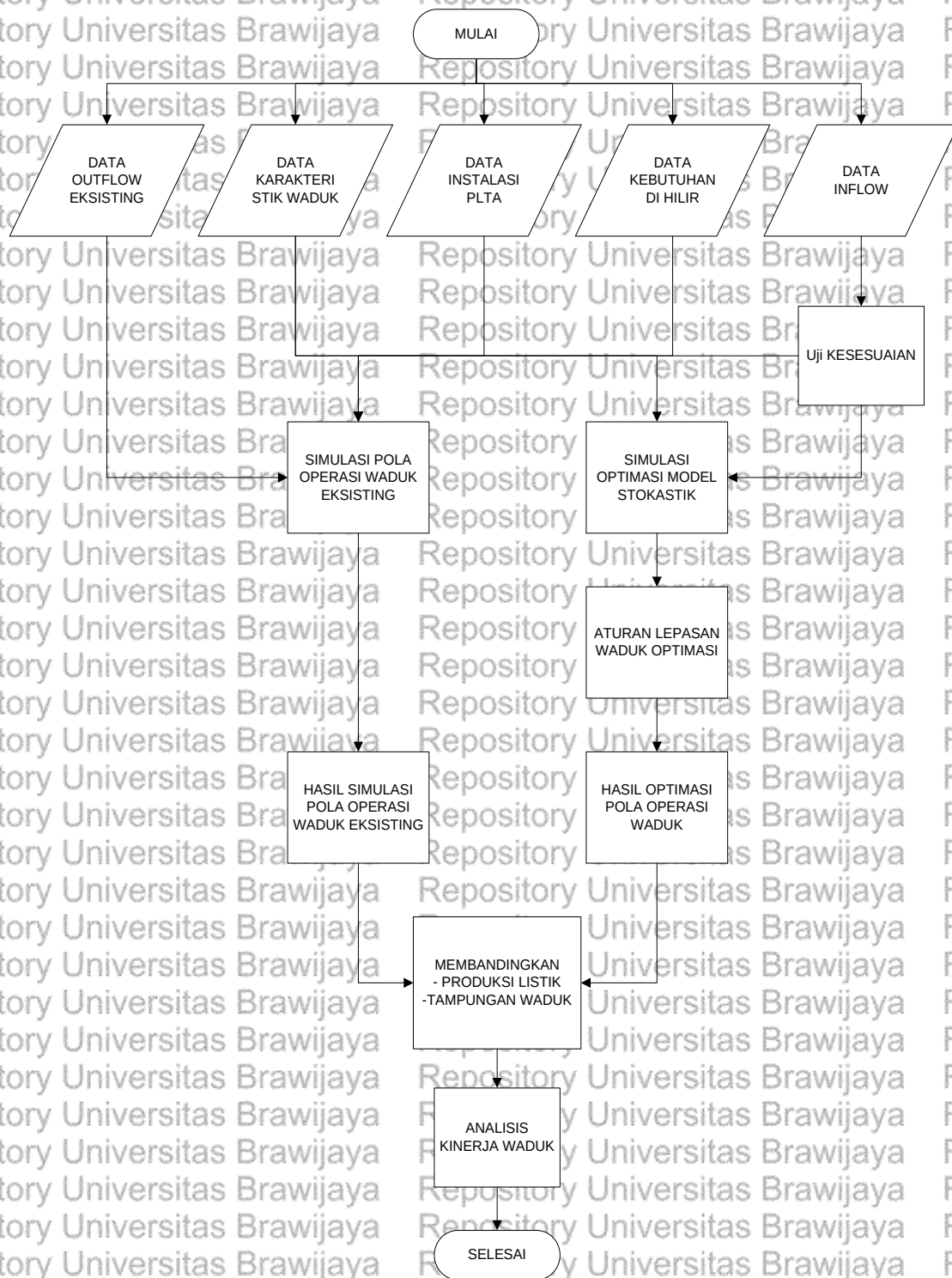
Data pendukung lainnya adalah data tambahan seperti peta-peta yang berhubungan dengan daerah penelitian, foto dokumentasi lokasi studi serta data-data lain yang diperoleh dari beberapa sumber seperti: Studi-studi yang telah dilakukan berbagai pihak di kawasan DAS Bengawan Solo dan Waduk Wonogiri.



3.3. Desain Penelitian

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:

1. 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.
2. 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.
3. Melakukan simulasi dengan menggunakan debit outflow untuk mendapatkan elevasi operasi muka air waduk dan perkiraan produksi listrik eksisting.
4. Melakukan perhitungan optimasi dengan menggunakan model simulasi stokastik berdasarkan rumusan model dengan bantuan program solver *evolutionary* yang merupakan bagian dari program Microsoft Excel. Optimasi dilakukan dengan membuat aturan simulasi berdasarkan status tampungan representatif.
5. Merumuskan pola kebijakan pengoperasian waduk yang didasarkan hasil optimasi.
6. Melakukan perbandingan produksi listrik hasil simulasi eksisting dengan hasil optimasi.
7. Melakukan perbandingan tampungan waduk hasil simulasi eksisting dengan hasil optimasi.
8. Melakukan evaluasi kinerja sistem Waduk Wohogiri bila menerapkan pola operasi waduk eksisting dan hasil optimasi.



Gambar 3.10 Bagan Alir Penelitian



Fungsi tujuan optimasi adalah memaksimalkan hasil atau unjuk kerja yang diharapkan dari sistem secara keseluruhan. Hasil sistem dalam hal ini adalah total produksi listrik selama 10 tahun 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 = Total Energi Listrik

r_n = 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:

1. Lepasn untuk produksi PLTA merupakan persentase dari debit maksimum PLTA berdasarkan persentase tampungan efektif waduk dimana aturan lepasn harus selalu naik.

$$dx = (dx_1, Sx_1) < (dx_{n+1}, Sx_{n+1}) < \dots < (dx_n, Sx_n)$$

Dimana :

dx = persentase lepasn debit PLTA (% x Q_{maxPLTA})

Sx = persentase batas minimum tampungan efektif

2. persentase lepasn debit PLTA (dx) harus besar sama dengan 0 dan kecil sama dengan 100

$$dx = 0 \leq dx_n \leq 100$$

3. Lepasn untuk produksi PLTA. Debit air yang dikeluarkan (dn) harus lebih besar atau sama dengan debit minimum turbin (Q_{minPLTA})

$$dn \geq Q_{\text{min PLTA atau}}$$

$$dn \geq 14 \text{ m}^3/\text{detik}$$

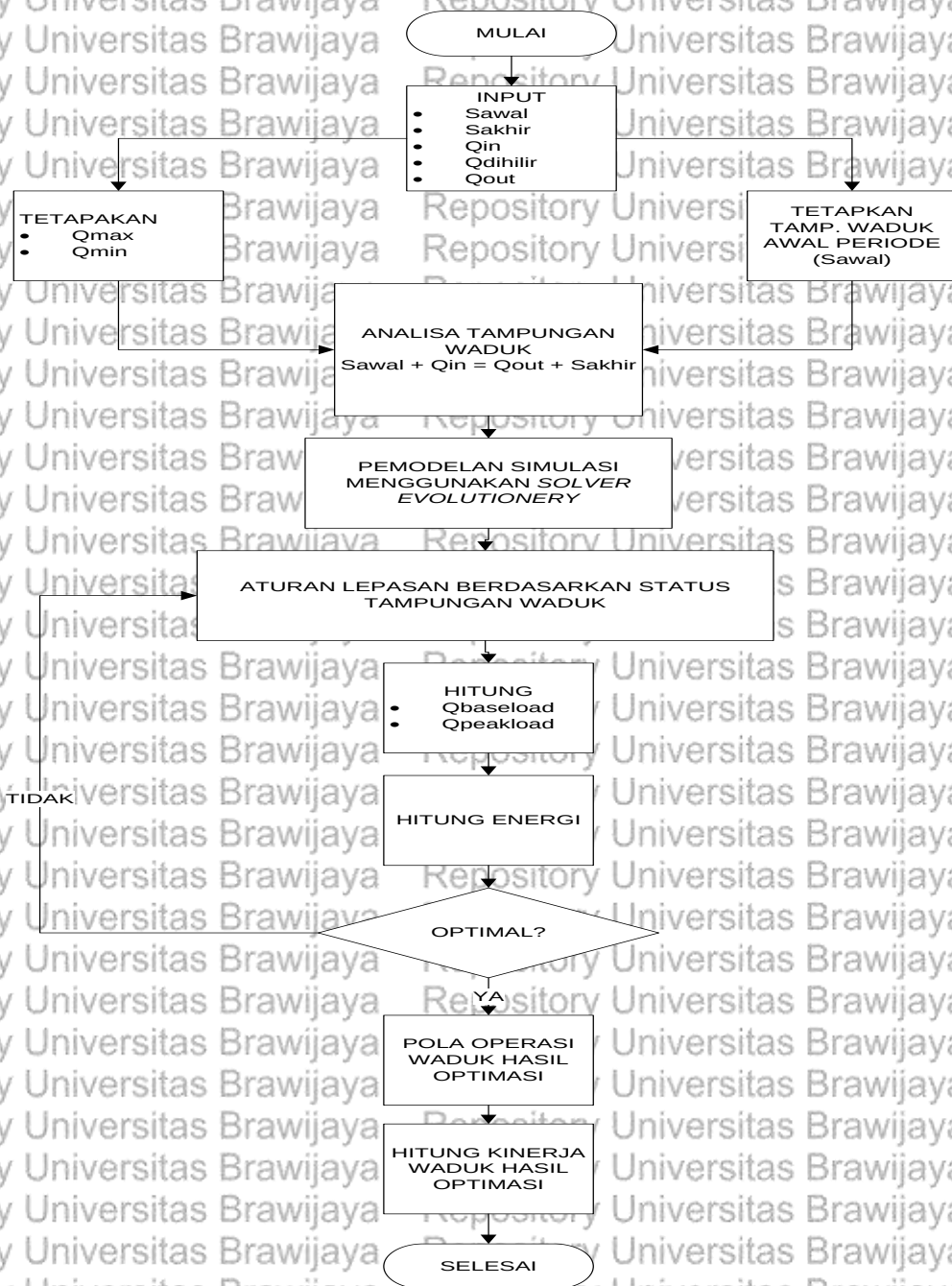
4. Lepasn untuk kebutuhan air dihilir. Debit yang dikeluarkan harus dapat memenuhi 80% dari kebutuhan di hilir waduk (Q_{hilir}).



$$dn \geq (80\% \times Q_{hilir})$$

5. Debit kritis waduk. Debit yang keluar dari pelimpah ($Q_{spillout}$) harus lebih kecil dari debit kritis waduk ($Q_{kritis} = 400 \text{ m}^3/\text{detik}$)

$$Q_{spillout} \leq Q_{kritis} 400 \text{ m}^3/\text{detik}$$



Gambar 3.11 Bagan Alir Simulasi Pola Operasi Waduk

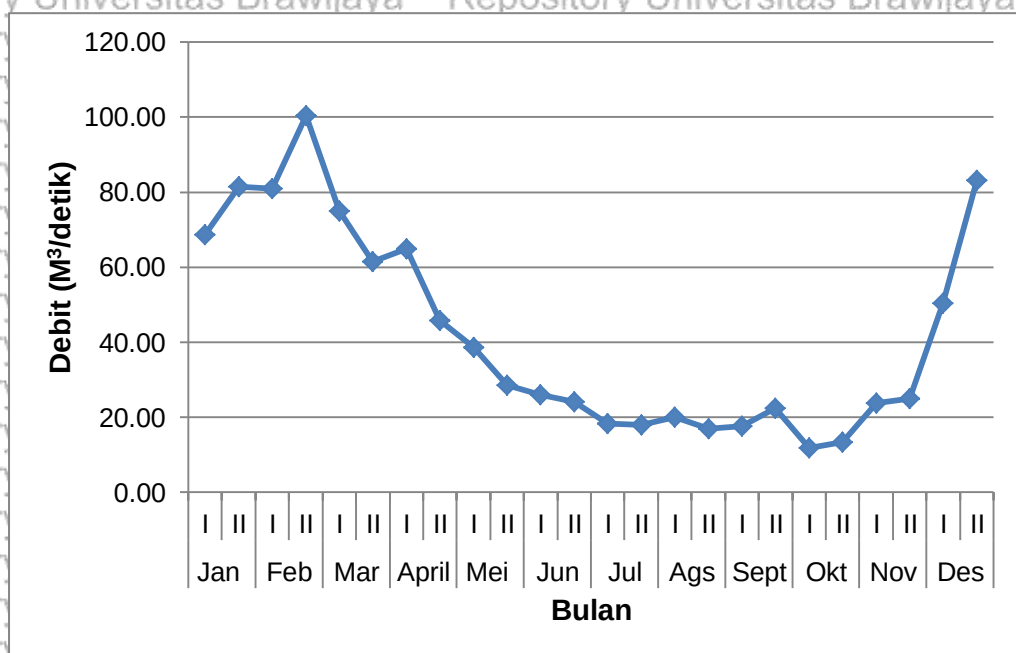


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Debit Inflow

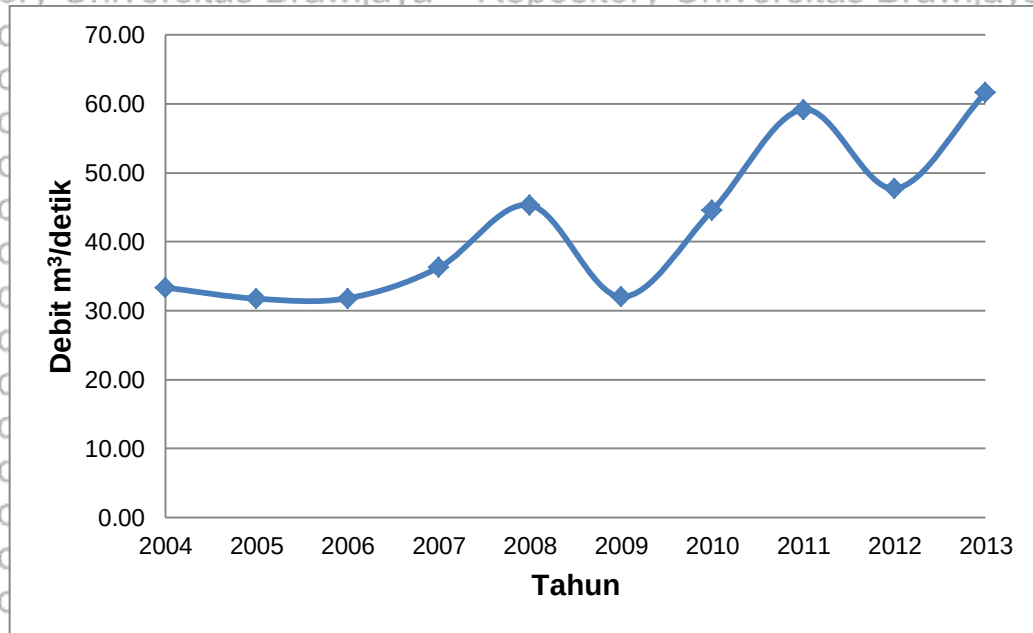
Analisis Debit inflow menggunakan data *rill* yang masuk ke dalam Waduk Wonogiri. Data Debit Inflow yang tersedia selama 10 tahun dari awal tahun 2004 hingga akhir tahun 2013. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 di bawah ini menunjukkan debit rerata Waduk Wonogiri.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.1 Debit Rerata Bulanan Waduk Wonogiri

Dari gambar 4.1 diatas dapat dilihat bahwa bulan basah dimulai pada Bulan November hingga Bulan April dan musim kering dimulai pada Bulan Mei hingga Bulan Oktober. Pada Bulan Februari periode ke II debit inflow Waduk Wonogiri memiliki debit air rerata terbesar dengan nilai 100.35 m³/detik dan Bulan Oktober periode pertama memilki debit air terkecil dengan nilai 11.88 m³/detik.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.2 Debit Rerata Pertahun Waduk Wonogiri

Dari gambar 4.2 diatas dapat diketahui bahwa debit inflow rata-rata terbesar terjadi pada Tahun 2011 dan 2013 dengan masing-masing debit $59.19 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan $61.66 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Dari data debit inflow ini kemudian dilakukan uji kesesuaian distribusi

4.1.1. Uji Kesesuaian Distribusi

Dalam penelitian ini, uji kesesuaian dilakukan dengan Uji *Chi Square* dan Uji *Smirnov Kolmogorov*.

4.1.1.1. Uji Chi Square

Uji *Chi Square* dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis, agar distribusi yang dipilih bisa ditetapkan maka: $X^2_{hitung} < X^2_{kritis}$

Prosedur uji *Chi Square* adalah:

1. Urutkan data pengamatan (dari besar ke kecil atau sebaliknya)



2. Kelompokkan data menjadi G kelas

$$\begin{aligned} 3. K &= 1 + 3.22 \log n \\ &= 1 + 3.22 \log 10 \\ &= 4 \end{aligned}$$

Sehingga dapat dibuat menjadi 4 kelas dengan interval peluang masing-masing kelas:

$$\text{Kelas 1} = P \leq 0.25$$

$$\text{Kelas 2} = P \leq 0.50$$

$$\text{Kelas 3} = P \leq 0.75$$

$$\text{Kelas 4} = P > 0.75$$

4. Menentukan persamaan garis lurus berdasarkan persamaan umum garis lurus yang digunakan (soewarno, 1991)

$$X = \bar{X} + k.S$$

Dimana:

$\bar{X}$ = Perkiraan nilai yang diharapkan terjadi dengan besar peluang tertentu.

$\bar{X}$ = nilai rata-rata hitung

S = deviasi standar

K = Faktor frekuensi

5. Jumlahkan data pengamatan sebesar O_i tiap-tiap kelas

6. Jumlahkan data dari persamaan distribusi yang digunakan sebesar E

7. Tiap-tiap kelas hitung nilai $(O_i - E_i)^2$ dan

8. Jumlah seluruh G kelas nilai untuk menentukan nilai X^2_{hitung}

Dari Uji *Chi Square* yang telah dilakukan memperlihatkan bahwa data inflow yang akan digunakan dalam simulasi optimasi dapat mewakili dari distribusi statistik data yang dianalisis. Untuk itu distribusi *LogPerson III* dapat dipakai dalam proses optimasi dengan metode simulasi stokastik. Berikut ini adalah rekapitulasi hasil perhitungan Uji *Chi Square* setiap periode bulan:



Tabel 4.1 Uji *Chi Square* Tiap Bulan (Tahun 2004-2013)

Tabel perhitungan uji *Chi Square* Bulan Januari Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 19.67	3.0	2.50	0.25	0.10
2	19.67 < X ≤ 41.36	2.0	2.50	0.25	0.10
3	41.36 < X ≤ 90.02	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 90.02	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel perhitungan uji *Chi Square* Bulan Februari Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 39.35	2.0	2.50	0.25	0.10
2	39.35 < X ≤ 65.26	3.0	2.50	0.25	0.10
3	65.26 < X ≤ 110.81	2.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 110.81	3.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel perhitungan uji *Chi Square* Bulan Januari Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 32.41	2.0	2.50	0.25	0.10
2	32.41 < X ≤ 58.00	3.0	2.50	0.25	0.10
3	58.00 < X ≤ 106.64	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 106.64	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel perhitungan uji *Chi Square* Bulan Februari Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 49.76	1.0	2.50	2.25	0.90
2	49.76 < X ≤ 83.17	2.0	2.50	0.25	0.10
3	83.17 < X ≤ 142.36	5.0	2.50	6.25	2.50
4	X ≥ 142.36	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		3.6

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Maret Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 36.31	2.0	2.50	0.25	0.10
2	36.31 < X ≤ 59.89	2.0	2.50	0.25	0.10
3	59.89 < X ≤ 101.11	4.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 101.11	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		1.2

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan April Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 46.99	2.0	2.50	0.25	0.10
2	46.99 < X ≤ 60.72	2.0	2.50	0.25	0.10
3	60.72 < X ≤ 79.42	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 79.42	3.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Maret Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 36.31	2.0	2.50	0.25	0.10
2	36.31 < X ≤ 59.89	2.0	2.50	0.25	0.10
3	59.89 < X ≤ 101.11	4.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 101.11	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		1.2

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan April Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 23.98	3.0	2.50	0.25	0.10
2	23.98 < X ≤ 37.12	3.0	2.50	0.25	0.10
3	37.12 < X ≤ 58.62	1.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 58.62	3.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		1.2

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Mei Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 15.71	2.0	2.50	0.25	0.10
2	15.71 < X ≤ 27.30	3.0	2.50	0.25	0.10
3	27.30 < X ≤ 48.67	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 48.67	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Juni Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 15.60	2.0	2.50	0.25	0.10
2	15.60 < X ≤ 22.26	3.0	2.50	0.25	0.10
3	22.26 < X ≤ 32.31	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 32.31	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Mei Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 16.99	2.0	2.50	0.25	0.10
2	16.99 < X ≤ 24.66	3.0	2.50	0.25	0.10
3	24.66 < X ≤ 36.40	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 36.40	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Juni Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 13.92	3.0	2.50	0.25	0.10
2	13.92 < X ≤ 20.30	2.0	2.50	0.25	0.10
3	20.30 < X ≤ 30.13	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 30.13	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Juli Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(Oi-Ei) ²	X ² = (Oi-Ei) ² /Ei
		Oi	Ei		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 13.34	4.0	2.50	2.25	0.90
2	13.34 < X ≤ 17.05	1.0	2.50	2.25	0.90
3	17.05 < X ≤ 22.04	1.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 22.04	4.0	2.50	2.25	0.90
	Jumlah	10.0	10.0		3.6

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Agustus Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(Oi-Ei) ²	X ² = (Oi-Ei) ² /Ei
		Oi	Ei		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 11.55	3.0	2.50	0.25	0.10
2	11.55 < X ≤ 17.01	1.0	2.50	2.25	0.90
3	17.01 < X ≤ 25.50	4.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 25.50	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		2.0

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Juli Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(Oi-Ei) ²	X ² = (Oi-Ei) ² /Ei
		Oi	Ei		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 11.20	4.0	2.50	2.25	0.90
2	11.20 < X ≤ 15.72	2.0	2.50	0.25	0.10
3	15.72 < X ≤ 22.42	1.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 22.42	3.0	2.5	0.25	0.1
	Jumlah	10.0	10.0		2.0

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Agustus Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(Oi-Ei) ²	X ² = (Oi-Ei) ² /Ei
		Oi	Ei		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 9.71	3.0	2.50	0.25	0.10
2	9.71 < X ≤ 14.43	2.0	2.50	0.25	0.10
3	14.43 < X ≤ 21.83	2.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 21.83	3.0	2.5	0.25	0.1
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan September Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X <= 9.00	2.0	2.50	0.25	0.10
2	9.00 < X <= 14.19	3.0	2.50	0.25	0.10
3	14.19 < X <= 22.84	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X >= 22.84	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Oktober Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X <= 4.90	2.0	2.50	0.25	0.10
2	4.90 < X <= 8.46	4.0	2.50	2.25	0.90
3	8.46 < X <= 14.97	2.0	2.50	0.25	0.10
4	X >= 14.97	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		1.2

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan September Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X <= 8.65	3.0	2.50	0.25	0.10
2	8.65 < X <= 15.39	2.0	2.50	0.25	0.10
3	15.39 < X <= 28.15	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X >= 28.15	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Oktober Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X <= 3.86	1.0	2.50	2.25	0.90
2	3.86 < X <= 7.35	4.0	2.50	2.25	0.90
3	7.35 < X <= 14.44	4.0	2.50	2.25	0.90
4	X >= 14.44	1.0	2.50	2.25	0.90
	Jumlah	10.0	10.0		3.6

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan November Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 5.83	3.0	2.50	0.25	0.10
2	5.83 < X ≤ 12.68	2.0	2.50	0.25	0.10
3	12.68 < X ≤ 28.60	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 28.60	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		0.4

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Desember Periode I

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 20.84	2.0	2.50	0.25	0.10
2	20.84 < X ≤ 36.51	2.0	2.50	0.25	0.10
3	36.51 < X ≤ 65.65	4.0	2.50	2.25	0.90
4	X ≥ 65.65	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		1.2

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan November Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 8.95	4.0	2.50	2.25	0.90
2	8.95 < X ≤ 16.85	1.0	2.50	2.25	0.90
3	16.85 < X ≤ 32.67	3.0	2.50	0.25	0.10
4	X ≥ 32.67	2.0	2.50	0.25	0.10
	Jumlah	10.0	10.0		2.0

Tabel Perhitungan Uji *Chi Square* Bulan Desember Periode II

No	Interval Debit (m ³ /dt)	Jumlah		(O _i -E _i) ²	X ² = (O _i -E _i) ² /E _i
		O _i	E _i		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.00 < X ≤ 35.75	2.0	2.50	0.25	0.10
2	35.75 < X ≤ 62.13	2.0	2.50	0.25	0.10
3	62.13 < X ≤ 110.80	5.0	2.50	6.25	2.50
4	X ≥ 110.80	1.0	2.50	2.25	0.90
	Jumlah	10.0	10.0		3.6



4.1.1.2. Uji Smirnov Kolmogorov

Uji kecocokan *Smirnov Kolmogorov*, sering juga disebut uji kecocokan non parametric (*non parametric test*), karena pengujiannya tidak menggunakan distribusi tertentu.

Langkah-langkah perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* adalah sebagai berikut:

1. Urutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya) dan tentukan besar peluang dan masing-masing data tersebut.
2. Tentukan nilai Log_x dari masing-masing data tersebut
3. Tentukan nilai masing-masing peluang tersebut tentukan selisihnya antara peluang pengamatan dengan peluang teoritis.
4. Tentukan nilai masing-masing peluang teoritis G

Berdasarkan tabel nilai kritis untuk uji *Smirnov Kolmogorov* tentukan harga ΔP . Apabila ΔP_{max} lebih kecil dari ΔP_{cr} maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi dapat diterima.

Sama halnya dengan Uji *Chi Square*, hasil Uji *Smirnov Kolmogorov* juga menunjukkan kecocokan atau kesesuaian data sehingga data dapat mewakili distribusi statistik yang dianalisis. Berikut rekapitulasi hasil Uji *Smirnov Kolmogorov* setiap periode bulannya:


Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Februari Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2010	14.07	1.148	9.091	-2.103	98.33	1.669	7.422
2	2005	32.80	1.516	18.182	-0.958	82.65	17.353	0.829
3	2007	40.95	1.612	27.273	-0.658	73.03	26.974	0.299
4	2004	59.79	1.777	36.364	-0.146	54.33	45.671	9.307
5	2012	62.94	1.799	45.455	-0.076	51.79	48.205	2.751
6	2006	104.69	2.020	54.545	0.612	27.68	72.318	17.773
7	2013	108.14	2.034	63.636	0.656	26.15	73.849	10.212
8	2008	120.30	2.080	72.727	0.800	21.12	78.879	6.152
9	2011	132.10	2.121	81.818	0.927	17.97	82.031	0.213
10	2009	134.01	2.127	90.909	0.946	17.55	82.447	8.462
							Δ maks	17.773

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Februari Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2010	11.96	1.078	9.091	-2.611	101.67	-1.674	10.765
2	2005	64.16	1.807	18.182	-0.373	62.63	37.372	19.190
3	2006	76.06	1.881	27.273	-0.146	54.35	45.654	18.381
4	2004	85.50	1.932	36.364	0.010	48.72	51.285	14.921
5	2007	87.24	1.941	45.455	0.037	47.78	52.224	6.770
6	2009	109.97	2.041	54.545	0.345	37.01	62.995	8.449
7	2011	131.78	2.120	63.636	0.586	28.59	71.408	7.771
8	2008	136.39	2.135	72.727	0.632	26.99	73.008	0.281
9	2013	149.09	2.173	81.818	0.750	22.85	77.148	4.670
10	2012	151.38	2.180	90.909	0.771	22.14	77.859	13.051
							Δ maks	19.190



Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Maret Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2010	14.20	1.152	9.091	-1.995	97.62	2.378	6.713
2	2007	30.09	1.478	18.182	-0.968	82.89	17.107	1.075
3	2009	36.47	1.562	27.273	-0.706	74.78	25.225	2.048
4	2006	51.30	1.710	36.364	-0.239	57.74	42.263	5.899
5	2004	76.15	1.882	45.455	0.301	38.53	61.469	16.014
6	2005	77.71	1.890	54.545	0.329	37.57	62.433	7.887
7	2011	78.89	1.897	63.636	0.350	36.84	63.156	0.481
8	2013	87.93	1.944	72.727	0.498	31.67	68.334	4.393
9	2008	143.88	2.158	81.818	1.171	12.71	87.286	5.468
10	2012	153.38	2.186	90.909	1.259	10.84	89.164	1.745
							Δ maks	16.014

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Maret Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2009	27.11	1.433	9.091	-1.516	93.79	6.205	2.886
2	2006	34.35	1.536	18.182	-1.016	84.04	15.963	2.219
3	2013	40.59	1.608	27.273	-0.663	73.22	26.783	0.490
4	2004	47.40	1.676	36.364	-0.335	61.23	38.769	2.406
5	2007	51.62	1.713	45.455	-0.154	54.64	45.362	0.093
6	2005	53.07	1.725	54.545	-0.096	52.50	47.496	7.049
7	2010	55.95	1.748	63.636	0.016	48.49	51.508	12.129
8	2012	79.68	1.901	72.727	0.763	22.40	77.600	4.873
9	2011	111.08	2.046	81.818	1.466	7.52	92.482	10.664
10	2008	114.72	2.060	90.909	1.534	6.51	93.486	2.577
							Δ maks	12.129



Tabel perhitungan uji Smirnov Kolmogorov Bulan April Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2009	29.48	1.470	9.091	-1.956	97.36	2.640	6.451
2	2004	36.41	1.561	18.182	-1.392	91.94	8.057	10.125
3	2007	55.02	1.741	27.273	-0.290	59.61	40.392	13.120
4	2010	59.71	1.776	36.364	-0.072	51.64	48.364	12.000
5	2012	65.29	1.815	45.455	0.166	43.25	56.754	11.299
6	2013	66.40	1.822	54.545	0.211	41.68	58.323	3.778
7	2006	71.05	1.852	63.636	0.392	35.37	64.630	0.994
8	2008	83.40	1.921	72.727	0.820	20.44	79.565	6.837
9	2005	91.09	1.959	81.818	1.055	15.22	84.785	2.967
10	2011	91.47	1.961	90.909	1.066	14.97	85.026	5.883
							Δ maks	13.120

Tabel perhitungan uji Smirnov Kolmogorov Bulan April Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2004	18.65	1.271	9.091	-1.106	86.22	13.785	4.694
2	2005	20.55	1.313	18.182	-0.953	82.53	17.468	0.714
3	2010	23.82	1.377	27.273	-0.722	75.38	24.616	2.657
4	2009	24.47	1.389	36.364	-0.680	73.86	26.145	10.219
5	2008	25.57	1.408	45.455	-0.611	71.33	28.670	16.785
6	2012	30.36	1.482	54.545	-0.342	61.50	38.500	16.045
7	2006	56.16	1.749	63.636	0.622	27.35	72.648	9.012
8	2013	67.44	1.829	72.727	0.908	18.36	81.638	8.911
9	2011	88.80	1.948	81.818	1.340	9.38	90.619	8.801
10	2007	101.24	2.005	90.909	1.545	6.35	93.650	2.740
							Δ maks	16.785



Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Mei Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2005	10.54	1.023	9.091	-1.206	88.64	11.359	2.268
2	2004	10.55	1.023	18.182	-1.205	88.61	11.388	6.794
3	2007	16.39	1.215	27.273	-0.659	73.07	26.932	0.341
4	2009	20.28	1.307	36.364	-0.395	63.44	36.561	0.198
5	2008	23.92	1.379	45.455	-0.191	55.98	44.025	1.430
6	2006	29.16	1.465	54.545	0.054	47.15	52.851	1.695
7	2013	30.29	1.481	63.636	0.102	45.50	54.499	9.138
8	2012	34.45	1.537	72.727	0.261	39.94	60.064	12.663
9	2010	83.21	1.920	81.818	1.353	9.18	90.816	8.998
10	2011	127.90	2.107	90.909	1.885	3.52	96.475	5.566
							Δ maks	12.663

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Mei Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2008	9.90	0.996	9.091	-1.705	95.71	4.289	4.802
2	2005	14.62	1.165	18.182	-0.988	83.38	16.625	1.557
3	2007	18.65	1.271	27.273	-0.541	68.75	31.248	3.975
4	2004	21.08	1.324	36.364	-0.316	60.54	39.465	3.101
5	2012	22.43	1.351	45.455	-0.202	56.37	43.628	1.827
6	2009	27.45	1.438	54.545	0.170	43.12	56.875	2.330
7	2009	27.66	1.442	63.636	0.184	42.62	57.382	6.254
8	2013	31.83	1.503	72.727	0.442	33.61	66.390	6.337
9	2011	50.84	1.706	81.818	1.303	9.92	90.082	8.263
10	2010	61.44	1.788	90.909	1.651	4.91	95.088	4.178
							Δ maks	8.263


Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Juni Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2005	11.60	1.065	9.091	-1.281	90.27	9.728	0.637
2	2004	13.62	1.134	18.182	-0.972	82.99	17.011	1.171
3	2007	16.15	1.208	27.273	-0.644	72.54	27.459	0.187
4	2006	17.66	1.247	36.364	-0.473	66.29	33.712	2.651
5	2009	20.49	1.312	45.455	-0.187	55.83	44.168	1.287
6	2008	23.69	1.375	54.545	0.092	45.82	54.177	0.368
7	2012	23.93	1.379	63.636	0.112	45.15	54.846	8.790
8	2011	26.19	1.418	72.727	0.285	39.08	60.915	11.812
9	2010	35.14	1.546	81.818	0.850	19.61	80.394	1.425
10	2013	71.51	1.854	90.909	2.217	1.75	98.251	7.342
							Δ maks	11.812

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Juni Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2006	11.35	1.055	9.091	-1.081	85.62	14.378	5.287
2	2004	11.41	1.057	18.182	-1.073	85.42	14.576	3.606
3	2008	12.93	1.112	27.273	-0.845	79.88	20.120	7.152
4	2007	16.55	1.219	36.364	-0.398	63.53	36.474	0.111
5	2010	17.87	1.252	45.455	-0.259	58.46	41.537	3.918
6	2009	20.69	1.316	54.545	0.008	48.78	51.216	3.330
7	2011	22.63	1.355	63.636	0.170	43.12	56.876	6.761
8	2012	23.17	1.365	72.727	0.213	41.62	58.384	14.343
9	2005	40.46	1.607	81.818	1.224	11.59	88.415	6.597
10	2013	63.49	1.803	90.909	2.042	2.59	97.410	6.501
							Δ maks	14.343

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2007	9.66	0.985	9.091	-1.008	83.87	16.135	7.044
2	2006	9.76	0.989	18.182	-0.989	83.40	16.604	1.578
3	2010	10.52	1.022	27.273	-0.837	79.59	20.410	6.863
4	2008	10.54	1.023	36.364	-0.834	79.48	20.517	15.847
5	2005	13.83	1.141	45.455	-0.286	59.45	40.551	4.903
6	2004	14.72	1.168	54.545	-0.160	54.84	45.156	9.390
7	2011	20.63	1.314	63.636	0.521	30.86	69.138	5.501
8	2012	23.65	1.374	72.727	0.797	21.24	78.765	6.038
9	2009	23.86	1.378	81.818	0.815	20.61	79.393	2.425
10	2013	42.56	1.629	90.909	1.982	2.94	97.056	6.147
							Δ maks	15.847

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2006	6.45	0.809	9.091	-1.421	92.37	7.632	1.458
2	2007	7.48	0.874	18.182	-1.164	87.62	12.383	5.799
3	2005	8.80	0.944	27.273	-0.883	80.84	19.160	8.113
4	2008	11.23	1.051	36.364	-0.460	65.81	34.191	2.172
5	2004	11.44	1.059	45.455	-0.428	64.65	35.351	10.104
6	2011	18.52	1.268	54.545	0.404	34.95	65.053	10.508
7	2012	19.56	1.291	63.636	0.499	31.64	68.358	4.722
8	2010	26.21	1.418	72.727	1.005	16.29	83.714	10.987
9	2009	27.63	1.441	81.818	1.096	14.32	85.677	3.858
10	2013	32.03	1.506	90.909	1.352	9.20	90.799	0.111
							Δ maks	10.987

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2007	6.19	0.792	9.091	-1.107	86.25	13.747	4.656
2	2004	7.19	0.857	18.182	-0.931	81.98	18.017	0.165
3	2006	7.53	0.877	27.273	-0.875	80.64	19.362	7.910
4	2008	9.59	0.982	36.364	-0.588	70.50	29.503	6.861
5	2005	11.25	1.051	45.455	-0.399	63.60	36.402	9.053
6	2009	16.23	1.210	54.545	0.035	47.82	52.184	2.362
7	2011	16.36	1.214	63.636	0.045	47.47	52.535	11.102
8	2013	25.28	1.403	72.727	0.561	29.45	70.548	2.179
9	2012	58.74	1.769	81.818	1.562	6.10	93.898	12.079
10	2010	65.80	1.818	90.909	1.697	4.65	95.354	4.445
							Δ maks	12.079

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2011	2.03	0.307	9.091	-1.396	92.00	8.002	1.089
2	2012	3.91	0.592	18.182	-0.697	74.48	25.519	7.337
3	2006	4.27	0.630	27.273	-0.604	71.07	28.926	1.653
4	2009	6.01	0.779	36.364	-0.241	57.81	42.193	5.830
5	2007	6.80	0.833	45.455	-0.110	53.02	46.983	1.528
6	2013	7.60	0.881	54.545	0.008	48.76	51.235	3.310
7	2004	7.65	0.884	63.636	0.015	48.54	51.462	12.174
8	2008	9.18	0.963	72.727	0.208	41.79	58.205	14.522
9	2005	10.79	1.033	81.818	0.380	35.78	64.221	17.597
10	2010	74.93	1.875	90.909	2.438	1.03	98.973	8.064
							Δ maks	17.597

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan November Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2012	2.96	0.471	9.091	-1.309	90.69	9.309	0.219
2	2004	5.00	0.699	18.182	-0.846	79.92	20.081	1.899
3	2005	5.79	0.763	27.273	-0.718	75.22	24.775	2.498
4	2006	6.43	0.808	36.364	-0.626	71.87	28.128	8.235
5	2009	6.49	0.812	45.455	-0.618	71.57	28.426	17.028
6	2013	14.16	1.151	54.545	0.070	46.62	53.379	1.166
7	2011	18.25	1.261	63.636	0.293	38.80	61.195	2.441
8	2007	28.21	1.450	72.727	0.677	25.42	74.584	1.857
9	2008	73.18	1.864	81.818	1.517	6.77	93.231	11.413
10	2010	76.85	1.886	90.909	1.560	6.13	93.866	2.957
							Δ maks	17.028

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan November Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2006	5.21	0.717	9.091	-1.298	90.54	9.463	0.372
2	2007	6.20	0.792	18.182	-1.110	86.32	13.680	4.501
3	2005	6.99	0.844	27.273	-0.980	83.17	16.828	10.445
4	2009	8.82	0.945	36.364	-0.728	75.59	24.407	11.957
5	2013	16.68	1.222	45.455	-0.038	50.40	49.598	4.143
6	2012	23.68	1.374	54.545	0.341	37.15	62.850	8.305
7	2011	24.94	1.397	63.636	0.397	35.20	64.803	1.166
8	2004	32.61	1.513	72.727	0.687	25.07	74.934	2.207
9	2010	48.64	1.687	81.818	1.119	13.83	86.171	4.352
10	2008	76.53	1.884	90.909	1.610	5.39	94.607	3.698
							Δ maks	11.957


Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Desember Periode I

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2006	10.95	1.039	9.091	-1.498	93.52	6.484	2.607
2	2009	14.46	1.160	18.182	-1.158	87.49	12.513	5.669
3	2011	21.49	1.332	27.273	-0.674	73.64	26.359	0.914
4	2008	23.48	1.371	36.364	-0.566	69.69	30.309	6.055
5	2013	36.15	1.558	45.455	-0.039	50.44	49.557	4.103
6	2005	38.83	1.589	54.545	0.048	47.38	52.623	1.923
7	2007	57.21	1.757	63.636	0.521	30.86	69.137	5.501
8	2012	64.31	1.808	72.727	0.664	25.87	74.126	1.399
9	2004	83.61	1.922	81.818	0.984	16.73	83.266	1.448
10	2010	152.63	2.184	90.909	1.719	4.51	95.486	4.577
							Δ maks	6.055

Tabel perhitungan uji *Smirnov Kolmogorov* Bulan Desember Periode II

No	Tahun	Debit	Log Q	Pe	G	Pr (%)	Pt	ΔP
1	2009	16.76	1.224	9.091	-1.649	95.34	4.655	4.436
2	2008	18.53	1.268	18.182	-1.525	93.93	6.072	12.110
3	2011	46.40	1.666	27.273	-0.389	63.21	36.793	9.520
4	2006	61.56	1.789	36.364	-0.039	50.42	49.577	13.213
5	2004	72.51	1.860	45.455	0.164	43.33	56.674	11.220
6	2012	73.99	1.869	54.545	0.189	42.45	57.548	3.002
7	2010	87.92	1.944	63.636	0.403	34.99	65.005	1.369
8	2013	98.95	1.995	72.727	0.549	29.89	70.111	2.616
9	2005	101.87	2.008	81.818	0.585	28.63	71.367	10.451
10	2007	253.29	2.404	90.909	1.713	4.55	95.448	4.539
							Δ maks	13.213

4.2. Simulasi Pola Operasi Waduk Eksisting

Simulasi pola operasi waduk eksisting dilakukan dengan menggunakan debit outflow historis dari tahun 2004 hingga tahun 2013. Tujuan simulasi ini untuk mengetahui perkiraan produksi listrik serta tampungan Waduk Wonogiri eksisting yang nantinya akan dibandingkan dengan hasil pola operasi waduk optimasi. Walaupun dalam kenyataannya PLTA memiliki dua turbin type Kaplan vertikal yang dapat berfungsi bergantian maupun bersamaan, akan tetapi pada penelitian



ini energi yang dihasilkan diasumsikan hanya berasal dari satu turbin saja sehingga debit maksimum PLTA yang digunakan 37.5 m³/detik.

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

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 untuk melakukan fungsinya yaitu sebagai pengendali banjir, pemenuhan kebutuhan air PLTA, pemenuhan air di hilir waduk seperti irigasi, air baku dan industri. Adapun data yang digunakan dalam simulasi pola operasi waduk eksisting adalah sebagai berikut:

- Tampungan Banjir (S_{banjir}) (El. 138.30 m) : 490.118 juta m³
- Tampungan Maksimum Operasi (S_{maxOP}) (el. 136.00 m) : 364.935 juta m³
- Tampungan Minimum Operasi (S_{minOP}) (el.130.00 m) : 128.832 juta m³
- Tampungan Efektif (S_{efektif}) : 236.108 juta m³
- Debit Minimum PLTA (Q_{minPLTA}) : 14 m³/detik
- Debit Maksimum PLTA (Q_{maxPLTA}) : 37.5 m³/detik
- Debit Kritis Banjir ($Q_{\text{kritisbanjir}}$) : 400 m³/detik
- Base Load Rencana (T_{baseload}) : 19 Jam
- Peak Load Rencana (T_{peakload}) : 5 Jam
- Elevasi Awal Operasi : 130.50 meter

Tabel perhitungan simulasi waduk eksisting terdapat pada lampiran. Berikut merupakan penjelasan tiap kolom pada tabel tersebut:

- Kolom (1) Tahun simulasi
- Kolom (2) Nama bulan simulasi
- Kolom (3) Periode bulan



Dalam satu bulan terdapat dua periode

Kolom (4) Jumlah hari dalam satu periode

Periode I berjumlah 15 hari dan periode II berjumlah 16 hari

Kolom (5) Inflow (Q_{inflow}) dalam debit m^3/dtk

Kolom (6) Inflow dalam volume juta m^3

$$(6) = \{(5) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (7) Kebutuhan di hilir (Q_{hilir}) dalam debit m^3/dtk

Kolom (8) Kebutuhan di hilir dalam volume juta m^3

$$(8) = \{(7) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (9) Outflow eksisting ($Q_{outeksisting}$) dalam debit m^3/dtk

Kolom (10) Outflow eksisting dalam volume juta m^3

$$(10) = \{(9) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (11) Volume tampungan waduk diawal periode (S_{awal}) dalam m^3

Vol Tampungan awal waduk sama dengan volume akhir waduk periode sebelumnya.

Kolom (12) Volume tampungan waduk diakhir periode (S_{akhir}) dalam m^3

Jika $(12) = (6) + (11) - (10) > S_{maks\ OP}$, maka $(12) = S_{maks\ OP}$

$$(12) = (6) + (11) - (10) < S_{maks\ OP}, (12) = (6) + (11) - (10)$$

Kolom (13) Volume limpasan ($Q_{spillout}$) dalam satu periode satuan m^3

Jika $(13) = (6) - (10) + (11) \geq S_{maks\ OP}$, maka

$$(13) = (6) - (10) + (11) - S_{maks\ OP}$$

Jika $(13) = (6) - (10) + (11) \leq S_{maks\ OP}$ maka $(13) = 0$

Kolom (14) Elevasi Muka Air Waduk dalam satuan m

EI. MAW diperoleh dari kurva H-V Waduk Wonogiri

Kolom (15) Volume outflow yang masuk ke turbin dalam satuan m^3

$$(15) = (10)$$

Kolom (16) Debit outflow yang masuk ke turbin dalam (m^3/dtk)



$$(16) = \{(15) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (17) Debit turbin pada kondisi base load (Q_{baseload}) dalam satuan m^3/dtk

Jika $(16) < Q_{\text{minPLTA}}$, maka $(17) = 0$

Jika $Q_{\text{minPLTA}} < (16) < Q_{\text{maxPLTA}}$, maka $\{[(8) \times 24 - (Q_{\text{maxPLTA}} \times T_{\text{peakload}})]\} / T_{\text{Baseload}}$

Jika $(17) > Q_{\text{maxPLTA}}$, maka $(17) = Q_{\text{maxPLTA}}$

Kolom (18) Waktu operasi turbin pada kondisi base load (T_{baseload}) dalam satuan jam.

Jika $(17) < Q_{\text{minPLTA}}$ maka $\{[(17) \times 24] - [Q_{\text{maxPLTA}} \times T_{\text{peakload}}]\} / Q_{\text{minPLTA}}$

Jika $Q_{\text{minPLTA}} < (17) < Q_{\text{maxPLTA}}$ maka $\{[(17) \times 24] - [Q_{\text{maxPLTA}} \times T_{\text{peakload}}]\} / T_{\text{Baseload}}$

Jika $(17) > Q_{\text{maxPLTA}}$ maka $(18) = T_{\text{baseload}}$

Kolom (19) Daya turbin pada kondisi base load dalam satuan MW

$$(19) = \{9.807 \times (17) \times H_e \times E_{tg}\} / 1000$$

Kolom (20) Produksi listrik pada kondisi base load dalam satuan MWh

$$(20) = (19) \times (18)$$

Kolom (21) Debit turbin pada kondisi peak load (Q_{peakload}) dalam satuan m^3/dtk

$$(21) = Q_{\text{maxPLTA}}$$

Kolom (22) Waktu operasi turbin pada peak load (T_{peakload}) dalam satuan jam

$$(22) = T_{\text{Peakload}}$$

Kolom (23) Daya turbin pada kondisi peak load dalam satuan MW

$$(23) = \{9.807 \times (17) \times H_e \times E_{tg}\} / 1000$$

Kolom (24) Produksi listrik pada kondisi peak load dalam satuan MWh

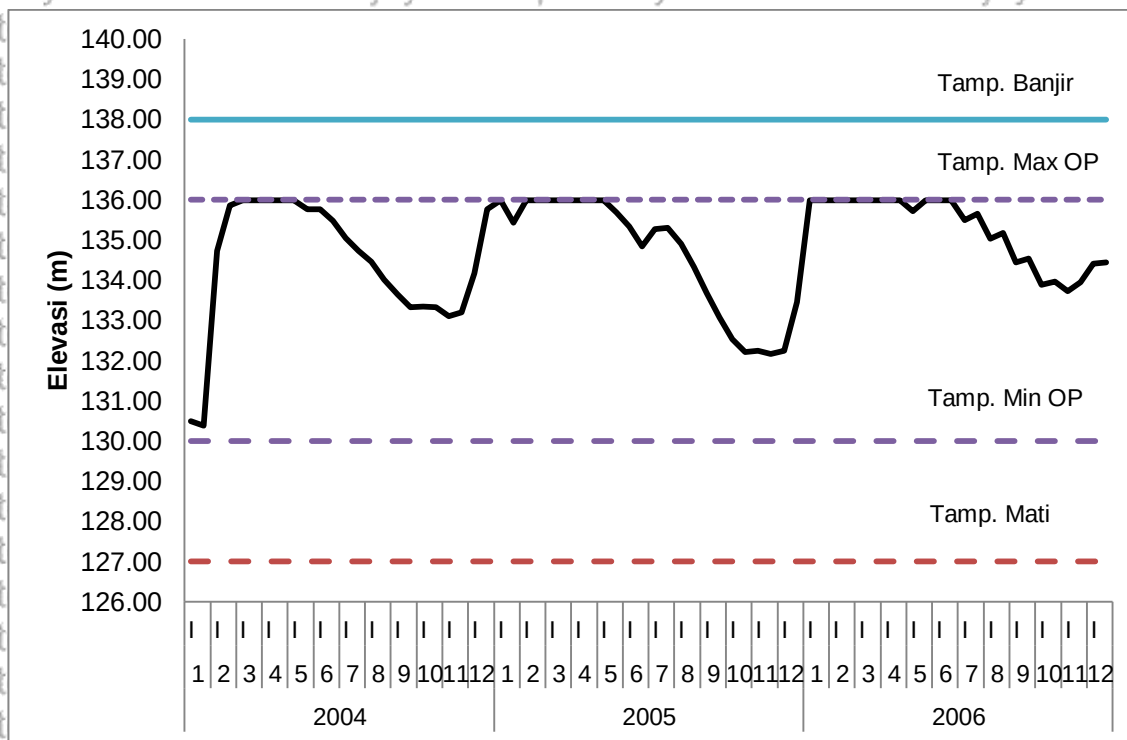
$$(24) = (19) \times (18)$$



Kolom (25) Total Energi dalam satuan MWh

$$(25) = (20) + (24)$$

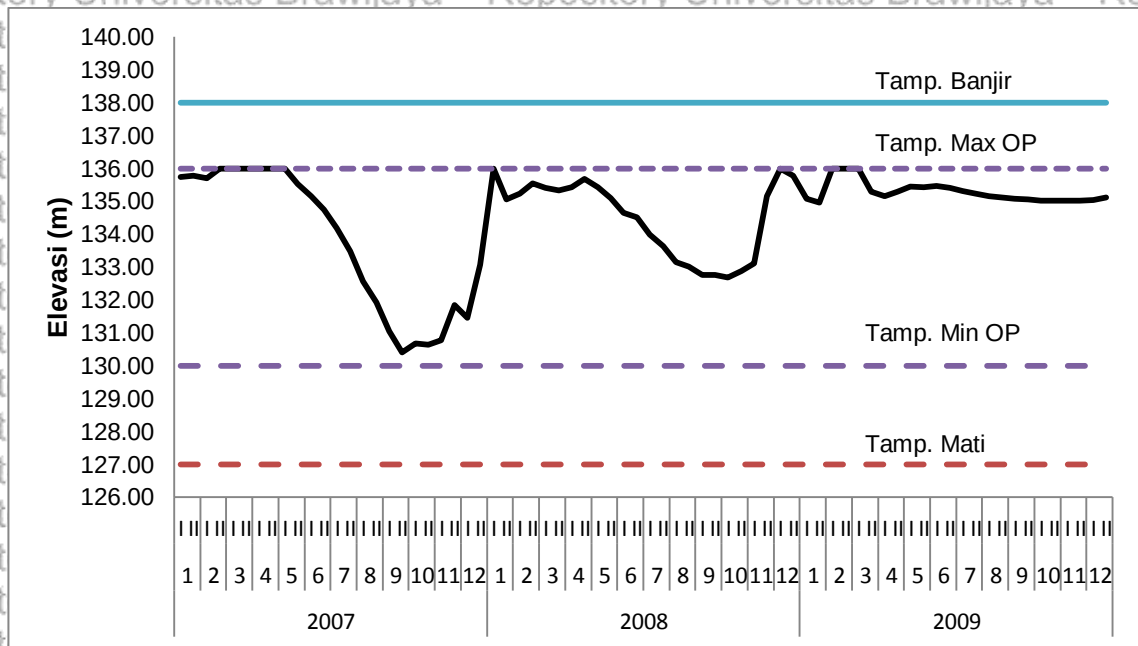
Dari hasil simulasi pola operasi waduk eksisting dapat diketahui elevasi permukaan Waduk Wonogiri dari tahun 2004 - 2013 sebagai berikut:



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.3 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2004 – 2006

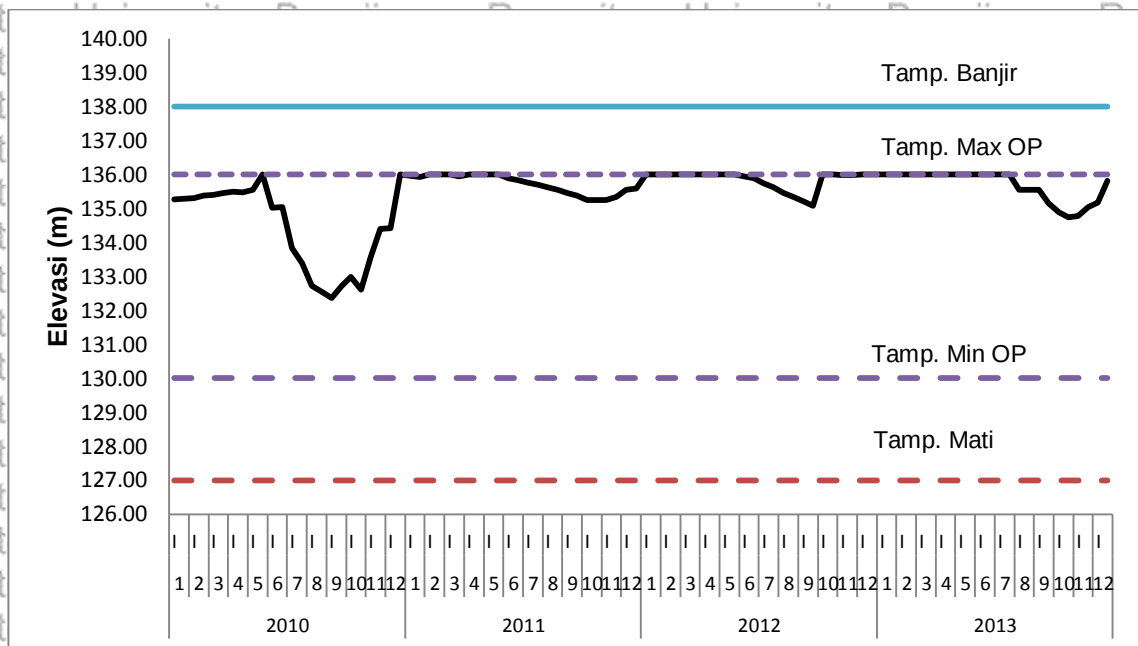
Gambar 4.3 diatas menggambarkan elevasi muka air waduk pola operasi waduk eksisting dari tahun 2004 hingga 2006. Selama 3 tahun beroperasi elevasi terendah terjadi pada Bulan November periode ke II tahun 2005 dengan ketinggian elevasi 132.16 meter. Akan tetapi ketinggian tersebut masih diatas elevasi minimum operasi yang berada pada elevasi 130.00 meter.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.4 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2007 – 2009

Dari gambar 4.4 diatas dapat dilihat bahwa pada tahun 2007 terjadi penurunan volume tampungan yang dimulai pada Bulan Mei hingga Bulan September yang menyebabkan elevasi terendah berada pada ketinggian 130.41 meter.



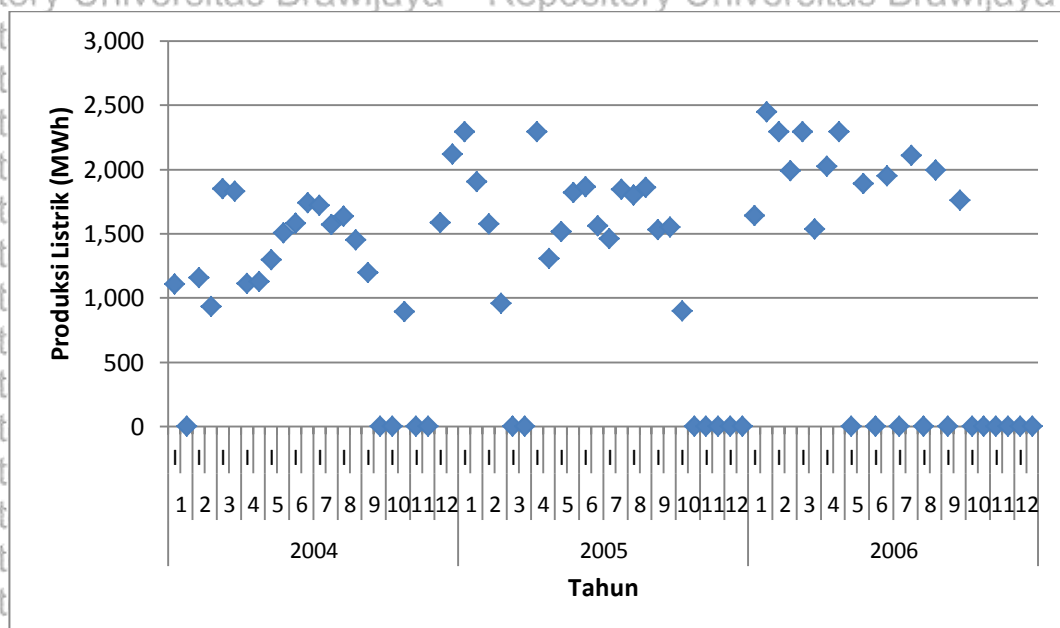
Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.5 Elevasi Muka Air Waduk Eksisting Tahun 2010 - 2013



Dari Gambar 4.5 diatas menunjukan gambar elevasi muka air waduk dari Tahun 2010 hingga Tahun 2013. Dapat dilihat bahwa elevasi muka air waduk berada pada ketinggian yang cukup tinggi hingga menyentuh garis elevasi maksimum operasi. Hal tersebut menyebabkan ketersediaan debit untuk pembangkit listrik dan kebutuhan di hilir dapat terpenuhi dengan baik. Bila dilihat secara keseluruhan selama 10 tahun simulasi bahwa pola operasi waduk eksisting berhasil mempertahankan ketinggian elevasinya diatas elevasi tampungan operasi minimum dan tidak pernah terjadi kekosongan tampungan.

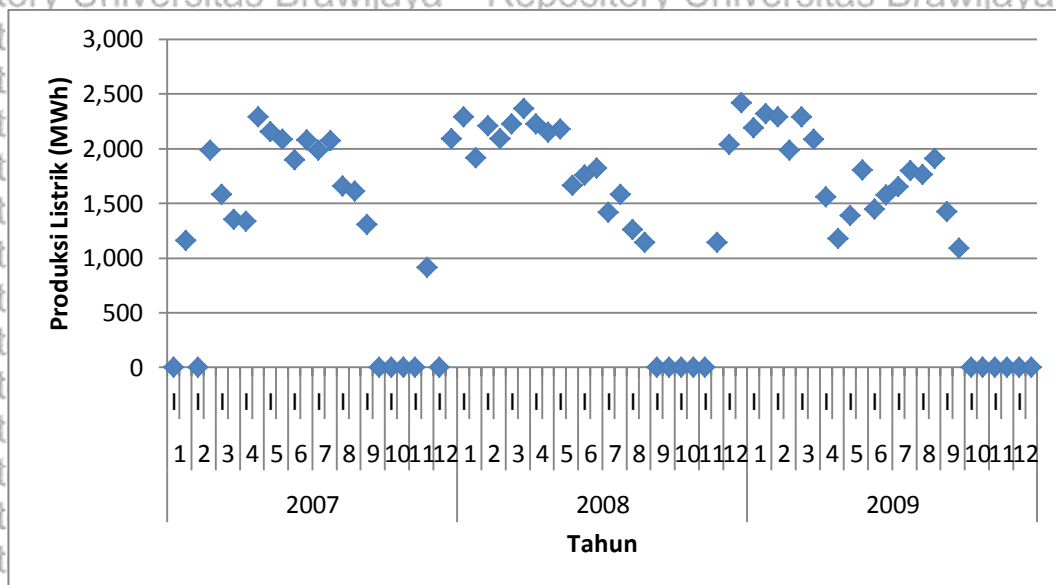
Dari hasil simulasi pola operasi waduk eksisting dapat diketahui perkiraan produksi listrik Waduk Wonogiri. Adapun produksi listrik hasil simulasi disajikan pada gambar dibawah ini.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.6 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2004 - 2006

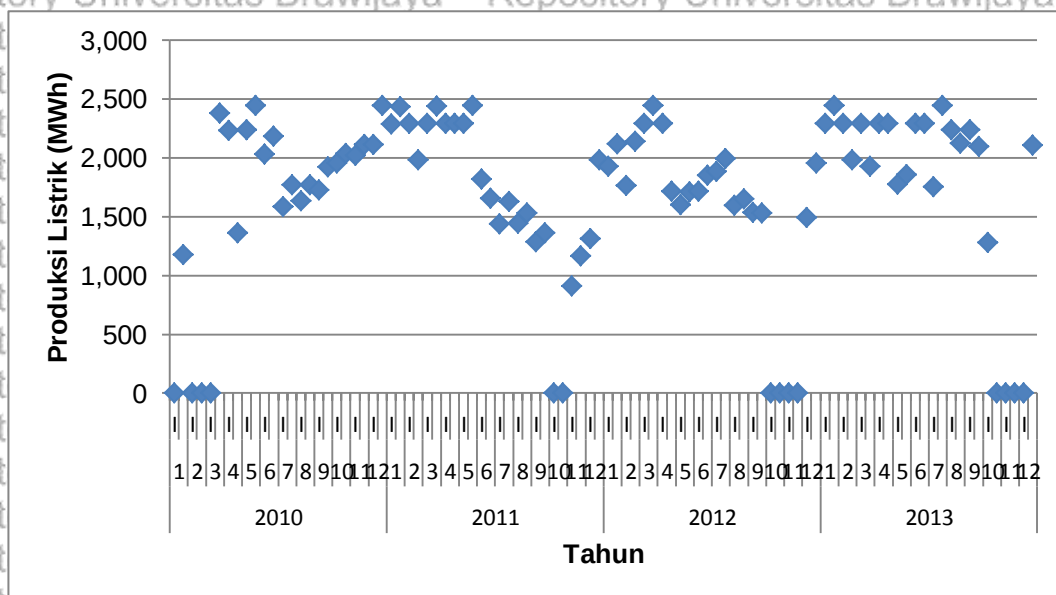
Dari gambar 4.6 diatas dapat dilihat bahwa produksi listrik terbesar terjadi pada Tahun 2005. Pada tahun 2006 sering sekali ditemukan PLTA tidak berproduksi yang ditandai dengan nilai produksi listrik 0 MWh/15hari.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.7 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2007 – 2009

Dari gambar 4.7 diatas dapat dilihat produksi listrik terbesar terjadi pada tahun 2008. Akan tetapi bila diperhatikan adanya pola yang hampir sama pada hasil produksi listrik dari tahun 2007 hingga 2009 yaitu pada Bulan September, Oktober, November dan Desember terjadi penurunan produksi listrik yang ditandai dengan nilai produksi listrik 0 MWh/15hari.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.8 Produksi Listrik Eksisting Tahun 2010 – 2013



Dari gambar 4.8 diatas dapat dilihat bahwa tahun 2010 hingga 2013 produksi listrik PLTA Wonogiri cukup tinggi bila dibandingkan dengan tahun – tahun sebelumnya. Bahkan tahun 2013 merupakan tahun dengan produktivitas listrik terbesar selama 10 tahun waduk beroperasi.

Bila disimpulkan dari ketiga gambar grafik produksi listrik eksisting diatas dapat diketahui bahwa selama 10 tahun beroperasi dari tahun 2004 hingga tahun 2013, Waduk Wonogiri telah dapat menghasilkan produksi listrik sebanyak 28.75% produksi listrik lebih besar dari 2.000 MWh/15hari, 32.50% produksi listrik diatara kisaran 1.500 – 2.000 MWh/15hari dan 38.75% produksi listrik dibawah 1.500 MWh/15hari. Dari gambar grafik produksi listrik diatas juga dapat dilihat bahwa Waduk Wonogiri mengalami penurunan produksi pada Bulan Oktober, November dan Desember. Bahkan pada bulan-bulan tersebut ditemukan produksi listrik berada pada besaran 0 MWh/15hari. Hal ini terjadi karena pada Bulan Oktober, November dan Desember selain merupakan musim kering/kemarau, pada bulan-bulan tersebut sering kali pada Irigasi Colo dilakukan pengeringan lahan serta pada Waduk Wonogiri dilakukan kegiatan operasi dan pemeliharaan rutin berupa pengerukan sedimentasi di intake waduk. Keadaan tersebutlah yang menyebabkan PLTA Wonogiri tidak dapat beroperasi secara maksimal.

4.3. Optimasi Pola Operasi Waduk Dengan Simulasi Stokastik

Optimasi pola operasi waduk dengan simulasi stokastik dilakukan dengan membuat aturan lepasan yang maksimum berdasarkan status tampungan waduk dengan menggunakan bantuan program *solver evolutionery*.

Adapun Komponen-komponen dalam optimasi dengan menggunakan model simulasi stokastik adalah sebagai berikut:



- Fungsi Tujuan adalah memaksimalkan total produksi listrik dalam 10 tahun

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

- Variabel Keputusan adalah aturan lepasan waduk berdasarkan status tampungan.

Dalam penelitian ini, batas minimum tampungan efektif dideskritkan menjadi 11 alternatif tampungan dengan dengan grid yang sama.

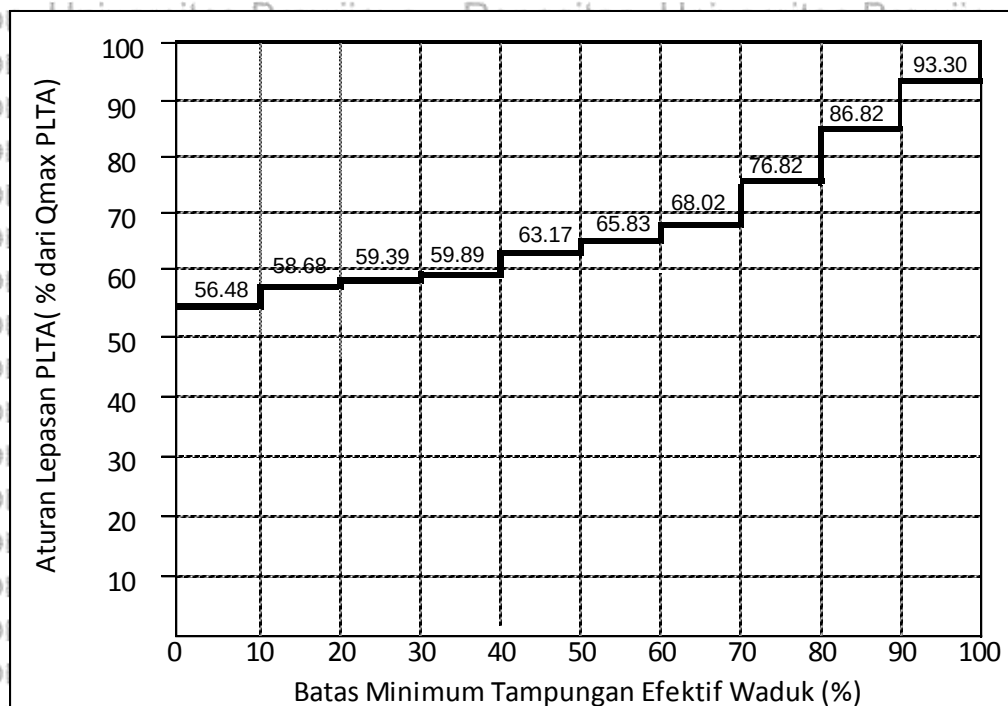
- 0 % dari tampungan efektif
- 10% dari tampungan efektif
- 20% dari tampungan efektif
- 30% dari tampungan efektif
- 40% dari tampungan efektif
- 50% dari tampungan efektif
- 60% dari tampungan efektif
- 70% dari tampungan efektif
- 80% dari tampungan efektif
- 90% dari tampungan efektif
- 100% dari tampungan efektif

Program solver evolutionary digunakan dalam mencari persentase lepasan ($Q_{\text{maks PLTA}}$) pada setiap 11 alternatif tampungan yang dapat menghasilkan total produksi listrik maksimum dalam 10 tahun dengan variabel kendala adalah aturan lepasan harus selalu naik dalam artian volume lepasan tampungan 0% harus lebih kecil dari volume tampungan 10% dan volume tampungan 10% harus lebih kecil dari volume tampungan 20% dan seterusnya, persentase lepasan debit PLTA harus besar sama dengan 0 dan kecil sama dengan 100, Lepasn untuk produksi PLTA harus lebih besar atau sama dengan debit minimum turbin (Q_{minPLTA}), Lepasn



untuk kebutuhan air dihilir harus dapat memenuhi 80% dari kebutuhan di hilir waduk (Q_{hilir}) serta debit yang keluar dari limpasan (Q_{spillout}) harus lebih kecil dari debit kritis waduk ($Q_{\text{kritis}} = 400 \text{ m}^3/\text{detik}$).

Aturan lepasan waduk yang paling optimum hasil *running* program *solver* *evolutionary* untuk mendapatkan total produksi yang paling maksimal disajikan pada gambar dan tabel dibawah ini.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.9 Lepasn Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi

Berdasarkan Gambar 4.9 dapat dijelaskan apabila tampungan waduk lebih besar dari 80% dari kapasitas tampungan aktif berarti lepasn sebesar 86.82% dari kebutuhan dalam hal ini adalah debit maksimum PLTA, atau apabila tampungan waduk lebih besar dari 90% dari kapasitas tampungan aktif berarti lepasn sebesar 93.30% dari debit maksimum PLTA dan seterusnya. Apabila tampungan waduk tepat berada pada batas minimum tampungan waduk, maka lepasn adalah mengikuti kisaran sebelumnya. Jadi misalnya tampungan waduk berada pada angka 0% maka lepasn sebesar 0% (bukan 10%).



Pada penelitian ini diasumsikan Bulan Oktober merupakan bulan dimana kegiatan pengeringan di Irigasi Colo dan juga kegiatan operasi dan pemeliharaan rutin berupa pengerukan di intake waduk dilakukan, sehingga debit outflow yang digunakan pada simulasi sebesar debit kebutuhan di hilir yaitu $6.23 \text{ m}^3/\text{detik}$ atau 8.08 juta m^3 . Kondisi tampungan waduk pada saat optimasi diumpamakan dalam keadaan penuh atau pada elevasi $+136.0$ meter. Tabel perhitungan optimasi pola operasi waduk dengan menggunakan metode stokastik dapat dilihat dilampiran. Berikut merupakan penjelasan tiap kolom pada tabel tersebut:

Kolom (1) Tahun simulasi

Kolom (2) Nama bulan simulasi

Kolom (3) Periode bulan

Dalam satu bulan terdapat dua periode

Kolom (4) Jumlah hari dalam satu periode

Periode I berjumlah 15 hari dan periode II berjumlah 16 hari.

Kolom (5) Inflow dalam debit m^3/dtk (Q_{inflow})

Kolom (6) Inflow dalam volume juta m^3

$$(6) = \{(5) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (7) Kebutuhan di hilir dalam debit m^3/dtk (Q_{hilir})

Kolom (8) Kebutuhan di hilir dalam volume juta m^3

$$(8) = \{(7) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$$

Kolom (9) Debit Outflow hasil optimasi dalam persen ($Q_{\text{out simulasi}}$)

Debit outflow diperoleh dengan menggunakan solver *evolutionary* untuk mendapatkan lepasan optimum berdasarkan status tampungan waduk.

Kolom (10) Outflow hasil optimasi dalam volume juta m^3

$$(10) = (9) \times Q_{\text{maxPLTA}}$$



Kolom (11) Volume tampungan waduk diawal periode dalam m^3 (S_{awal})
 Vol Tampungan awal waduk sama dengan volume akhir waduk periode sebelumnya.

Kolom (12) Volume tampungan waduk diakhir periode dalam m^3 (S_{akhir})
 Jika $(12) = (6) + (11) - (10) > S_{maks\ OP}$, maka $(12) = S_{maks\ OP}$
 $(12) = (6) + (11) - (10) < S_{maks\ OP}$, $(12) = (6) + (11) - (10)$

Kolom (13) Volume limpasan ($Q_{spillout}$) dalam satu periode satuan m^3
 Jika $(13) = (6) - (10) + (11) \geq S_{maks\ OP}$, maka
 $(13) = (6) - (10) + (11) - S_{maks\ OP}$

Jika $(13) = (6) - (10) + (11) \leq S_{maks\ OP}$ maka $(13) = 0$

Kolom (14) Elevasi Muka Air Waduk dalam satuan m
 El. MAW diperoleh dari kurva H-V Waduk Wonogiri

Kolom (15) Volume outflow yang masuk ke turbin dalam satuan m^3
 $(15) = (10)$

Kolom (16) Debit outflow yang masuk ke turbin dalam (m^3/dtk)
 $(16) = \{(15) \times (4) \times 60 \times 60 \times 24\} / 1000000$

Kolom (17) Debit turbin pada kondisi base load ($Q_{baseload}$) dalam satuan m^3/dtk

Jika $(16) < Q_{minPLTA}$, maka $(17) = 0$

Jika $Q_{minPLTA} < (16) < Q_{maxPLTA}$, maka $\{(8) \times 24 - (Q_{maxPLTA} \times T_{peakload})\} / T_{Baseload}$

Jika $(17) > Q_{maxPLTA}$, maka $(17) = Q_{maxPLTA}$

Kolom (18) Waktu operasi turbin pada kondisi base load ($T_{baseload}$) dalam satuan jam.

Jika $(17) \leq Q_{minPLTA}$ maka $\{(17) \times 24\} / [Q_{maxPLTA} \times T_{peakload}] / Q_{minPLTA}$



Jika $Q_{minPLTA} < (17) < Q_{maxPLTA}$ maka $\{[(17) \times 24] - [Q_{maxPLTA} \times \text{peakload}]] / T_{\text{Baseload}}$

Jika $(17) > Q_{maxPLTA}$ maka $(18) = T_{\text{baseload}}$

Kolom (19) Daya turbin pada kondisi base load dalam satuan MW

$$(19) = \{9.807 \times (17) \times H_e \times E_{tg}\} / 1000$$

Kolom (20) Produksi listrik pada kondisi base load dalam satuan MWh

$$(20) = (19) \times (18)$$

Kolom (21) Debit turbin pada kondisi peak load (Q_{peakload}) dalam satuan m^3/dtk

$$(21) = Q_{\text{maxPLT}}$$

Kolom (22) Waktu operasi turbin pada peak load (T_{peakload}) dalam satuan jam

$$(22) = T_{\text{peakload}}$$

Kolom (23) Daya turbin pada kondisi peak load dalam satuan MW

$$(23) = \{9.807 \times (17) \times H_e \times E_{tg}\} / 1000$$

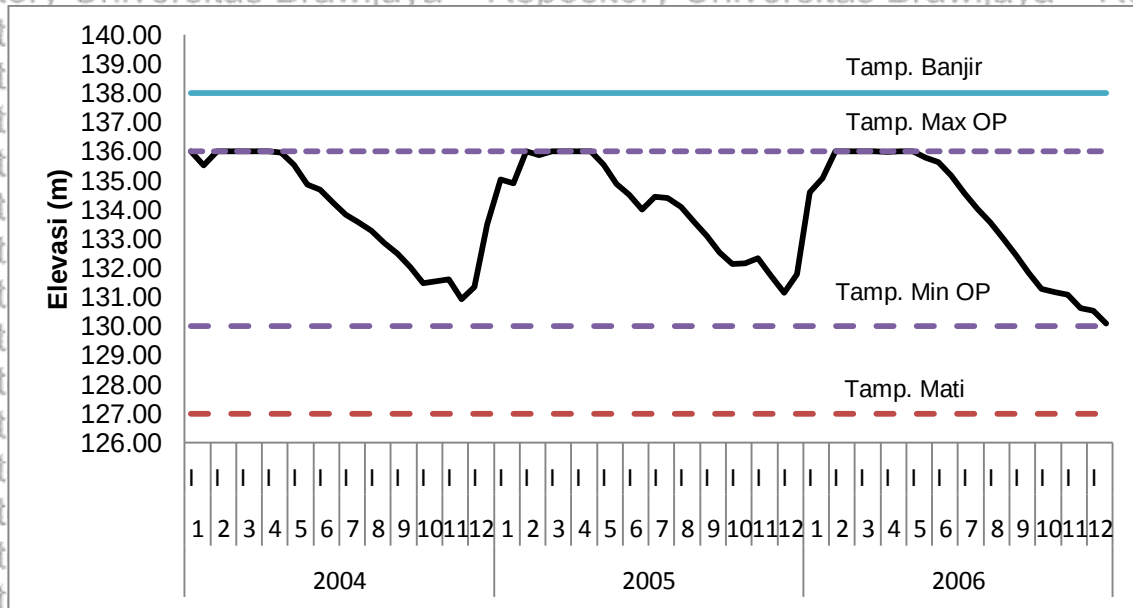
Kolom (24) Produksi listrik pada kondisi peak load dalam satuan MWh

$$(24) = (19) \times (18)$$

Kolom (25) Total Energi dalam satuan MWh

$$(25) = (20) + (24)$$

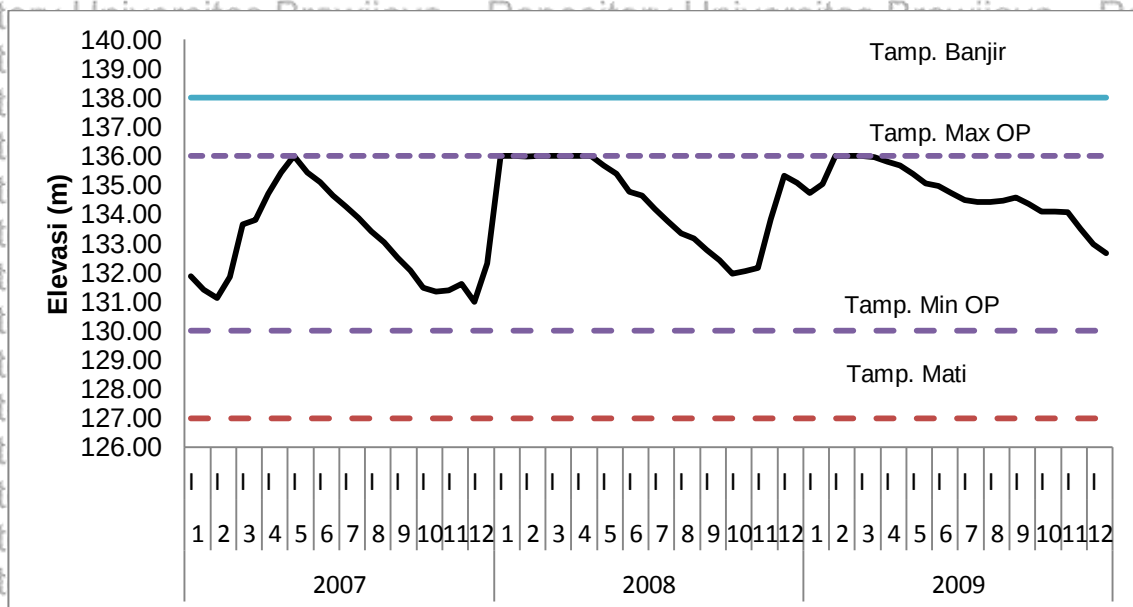
Dari hasil optimasi pola operasi waduk dengan simulasi stokastik dapat diperoleh elevasi operasi waduk. Adapun elevasi tersebut sebagai berikut:



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.10 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2004 - 2006

Dari gambar 4.10 diatas dapat diketahui elevasi tertinggi terjadi pada Bulan Januari hingga April dengan Bulan Oktober merupakan bulan dengan elevasi waduk terendah.



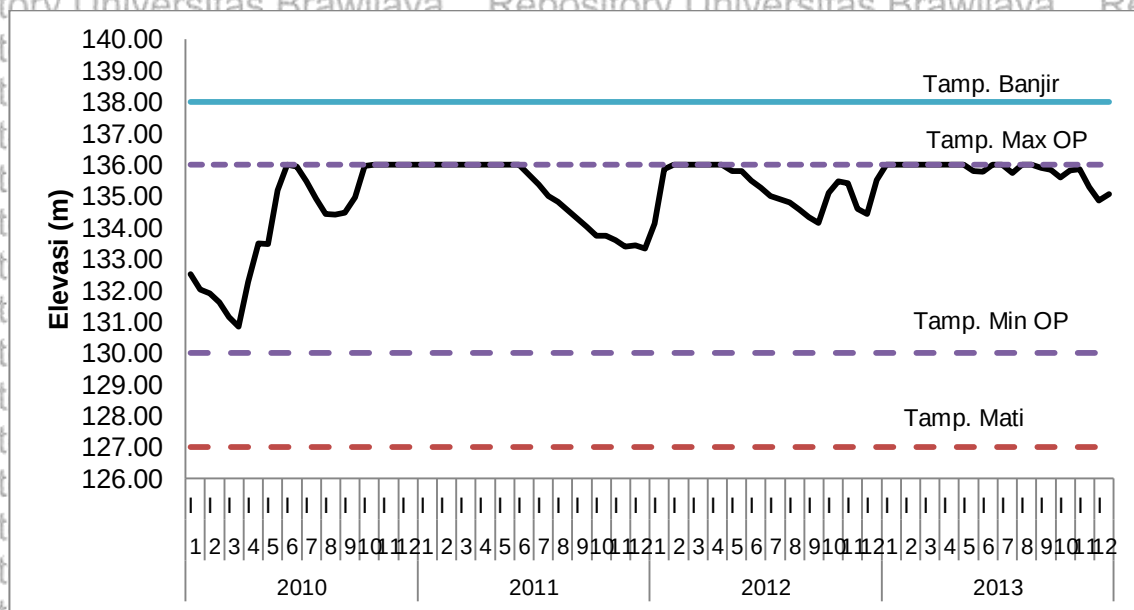
Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.11 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2007 - 2009

Dari gambar 4.11 diatas dapat dilihat bahwa elevasi muka air waduk dari tahun 2007 hingga 2009 juga tidak pernah menyentuh garis elevasi tampungan



minimum operasi. Hal ini mengindikasikan bahwa waduk tidak pernah mengalami kekosongan tampungan yang merupakan keadaan yang harus dihindari dalam pengoperasian waduk. Akan tetapi pada tahun 2007 hanya Bulan April periode II dan Bulan Mei periode I saja yang elevasi tampungannya dapat menyentuh garis batas maksimum operasi.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.12 Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi Tahun 2010 - 2013

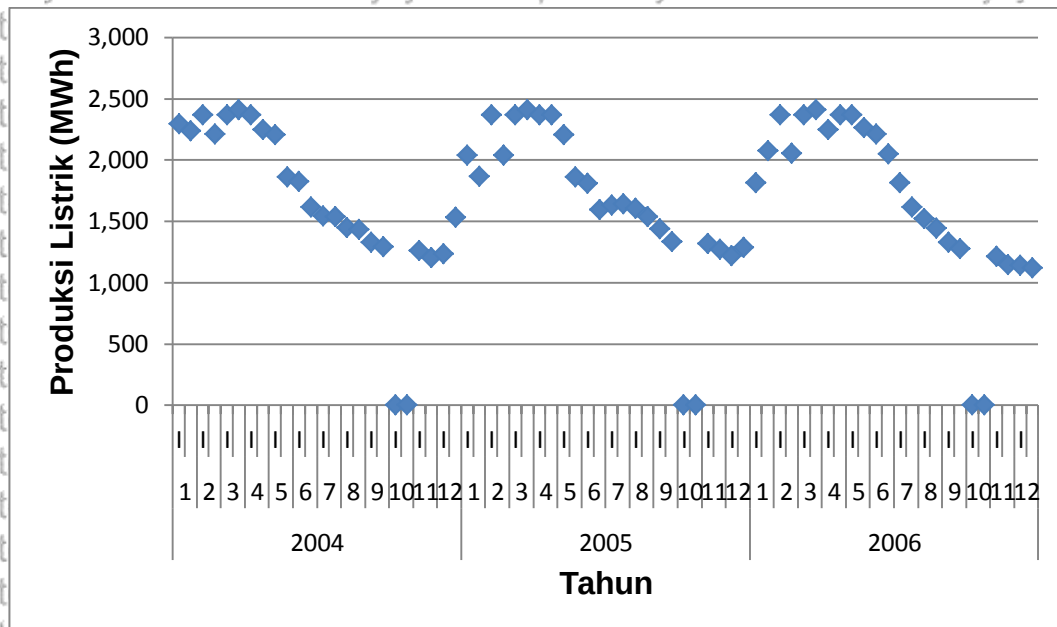
Dari gambar 4.12 diatas dapat dilihat bahwa seperti halnya dengan simulasi eksisting, pada tahun 2011 hingga 2013 elevasi tampungan Waduk Wonogiri cukup tinggi hingga berada di maksimum operasi PLTA, hal ini terjadi karena pada tahun 2011 hingga 2013 debit inflow Waduk Wonogiri cukup besar seperti yang telah dijelaskan pada gambar 4.2.

Dari ketiga gambar grafik hasil perhitungan elevasi permukaan waduk diatas dapat dilihat bahwa pola operasi waduk optimasi berada pada elevasi 130.89 - 136.00 meter. Tampungan pola operasi waduk optimasi juga berhasil dalam menghindari kekosongan pada tampungan. Dari 10 tahun simulasi, tidak jarang elevasi tampungan menyentuh garis batas tampungan maksimum operasi waduk



sehingga pemenuhan lepasan untuk menghasilkan produksi listrik juga dapat terpenuhi dengan baik.

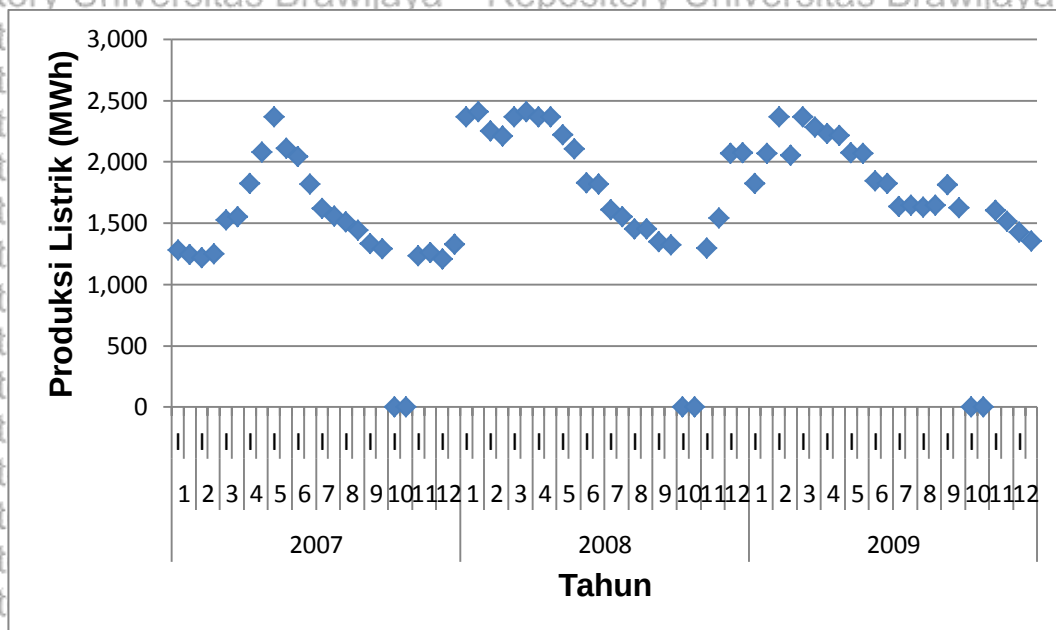
Produksi listrik hasil simulasi optimasi dapat dilihat pada gambar-gambar dibawah ini:



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.13 Produksi Listrik Hasil Optimasi Tahun 2004 – 2006

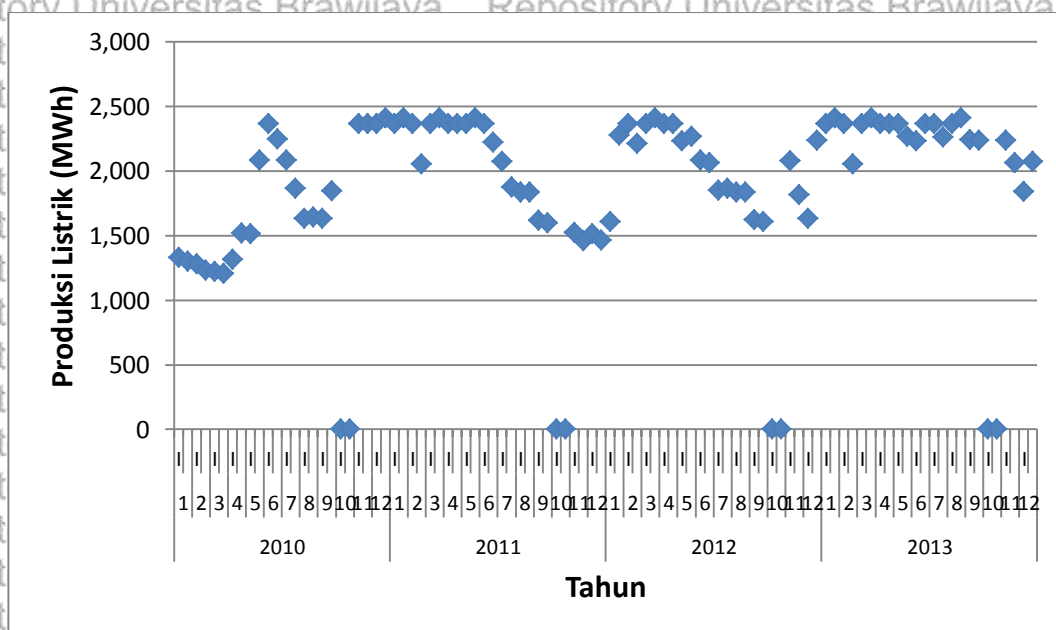
Dari gambar 4.13 diatas dapat dilihat bahwa produksi listrik tahun 2004 hingga 2006 memiliki produksi listrik yang hampir berimbang. Pada Bulan Januari hingga Bulan Mei merupakan bulan dimana produktivitas cukup tinggi yang ditandai dengan nilai produksi listrik berada pada besaran diatas 2.000 MWh/15hari.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.14 Produksi Listrik Hasil Optimalisasi Tahun 2007 – 2009

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa tahun 2007 merupakan tahun dengan nilai produksi listrik terendah. Hasil produksi listrik ini sesuai dengan hasil elevasi tampungan waduk dimana pada tahun 2007 hanya terdapat 2 periode yang dapat menyentuh batas tampungan maksimum operasi waduk.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.15 Produksi Listrik Hasil Optimalisasi Tahun 2010 - 2013



Dari gambar 4.15 diatas dapat dilihat bahwa tahun 2012 dan tahun 2013 merupakan tahun dengan produktivitas tertinggi selama 10 tahun. Bahkan pada Tahun 2013 produksi listrik diatas 2.000 MWh/15hari setiap periode bulan simulasi.

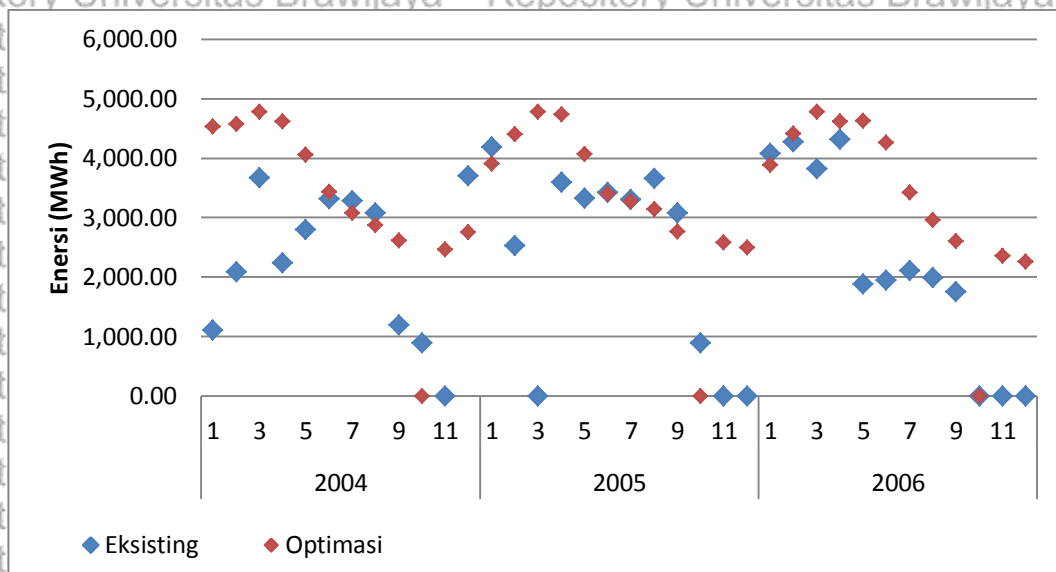
Dari ketiga gambar hasil perhitungan produksi listrik optimasi diatas dapat dilihat bahwa pada selama 10 tahun beroperasi Waduk Wonogiri menghasilkan 45.00% produksi listrik diatas 2.000 MWh/15hari, 27.08% produksi listrik diantara 1.500 - 2.000 MWh/15hari, 19.58% produksi listrik diantara 0 - 1500 MWh/15hari dan 8.33% produksi listrik 0 MWh/15hari. Akan tetapi produksi listrik sebesar 0 MWh/15hari terjadi karena pada Bulan Oktober memang PLTA Wonogiri diasumsikan tidak beroperasi sehingga dengan demikian hasil produksi listrik optimasi telah dapat dikatakan memenuhi kebutuhan listrik tiap tahunnya.

4.4. Perbandingan Hasil Pola Operasi Eksisting dengan Hasil Optimasi

Pada penelitian ini, ada dua aspek yang akan dibandingkan antara hasil simulasi eksisting dengan hasil optimasi dengan menggunakan model simulasi stokastik, yaitu perbandingan produksi listrik dan perbandingan tampungan waduk. Adapun hasil perbandingan kedua aspek tersebut dijabarkan sebagai berikut:

4.4.1. Perbandingan Produksi Listrik

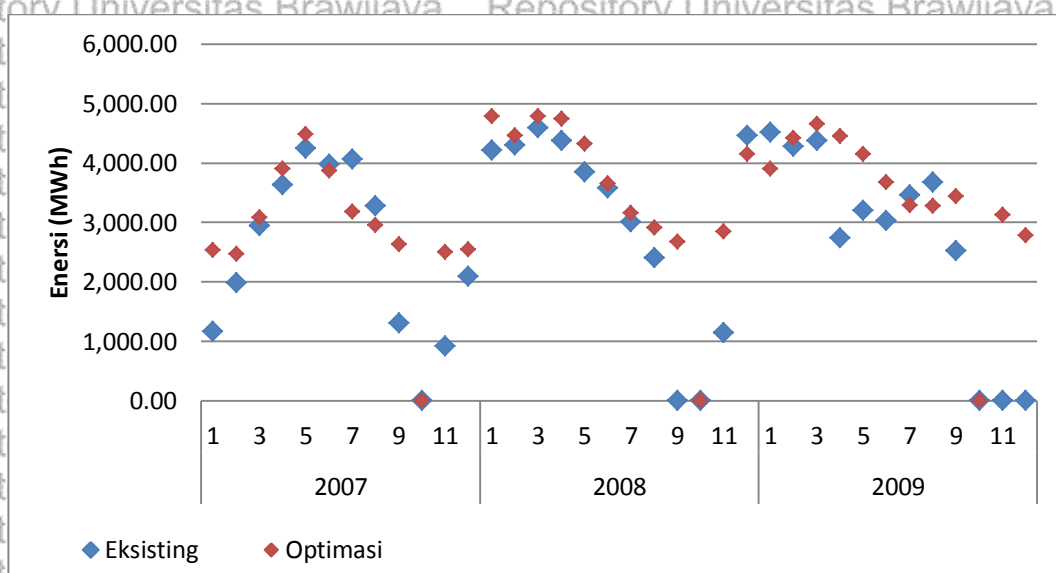
Simulasi terhadap Waduk Wonogiri menggunakan pola operasi hasil optimasi selama 10 tahun yaitu tahun 2004 - 2013 menunjukan peningkatan produksi listrik jika dibandingkan dengan simulasi pola operasi waduk dengan data outflow eksisting, hal ini tampak dalam uraian grafik dibawah ini:



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.16 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 – 2006

Dari gambar 4.16 diatas dapat dilihat bahwa produksi listrik optimasi dari tahun 2004 hingga tahun 2006 umumnya lebih baik bila dibandingkan produksi listrik hasil pola operasi eksisting. Dari 3 tahun simulasi, produksi listrik optimasi mengalami peningkatan rerata pertahun 47.00% yaitu dari 27.204 MWh/15hari menjadi 39.859 MWh/15hari.

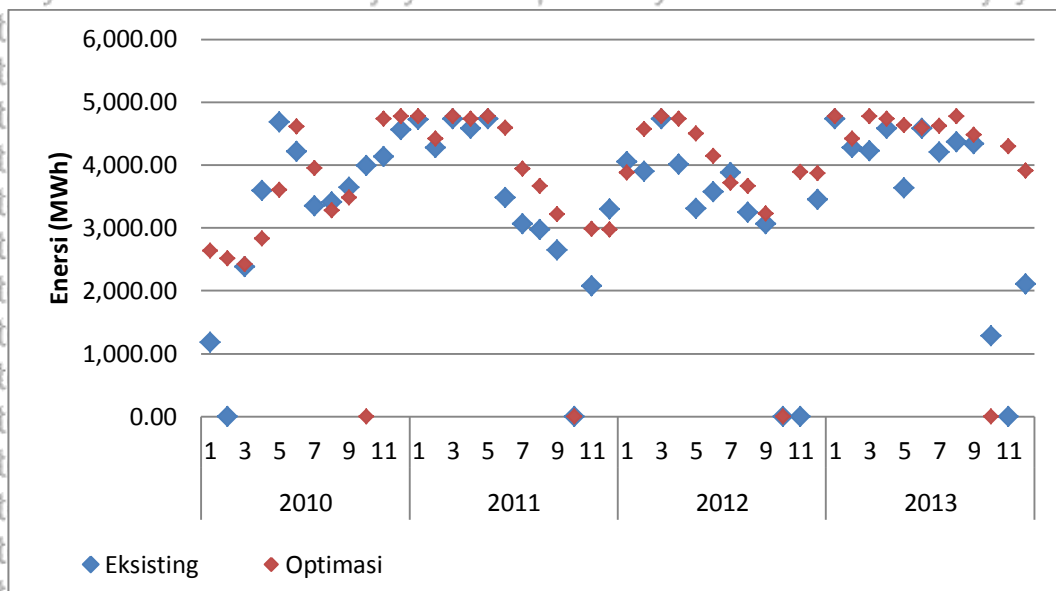


Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.17 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 - 2009



Sama halnya dengan perbandingan produksi listrik tahun 2004 - 2006, produksi listrik optimasi juga lebih unggul pada tahun 2007 hingga 2009 dimana margin tertinggi terjadi pada tahun 2009 dengan peningkatan produksi listrik sebesar 9.347 MWh/15hari atau sekitar 29.00% dari produksi waduk eksisting.



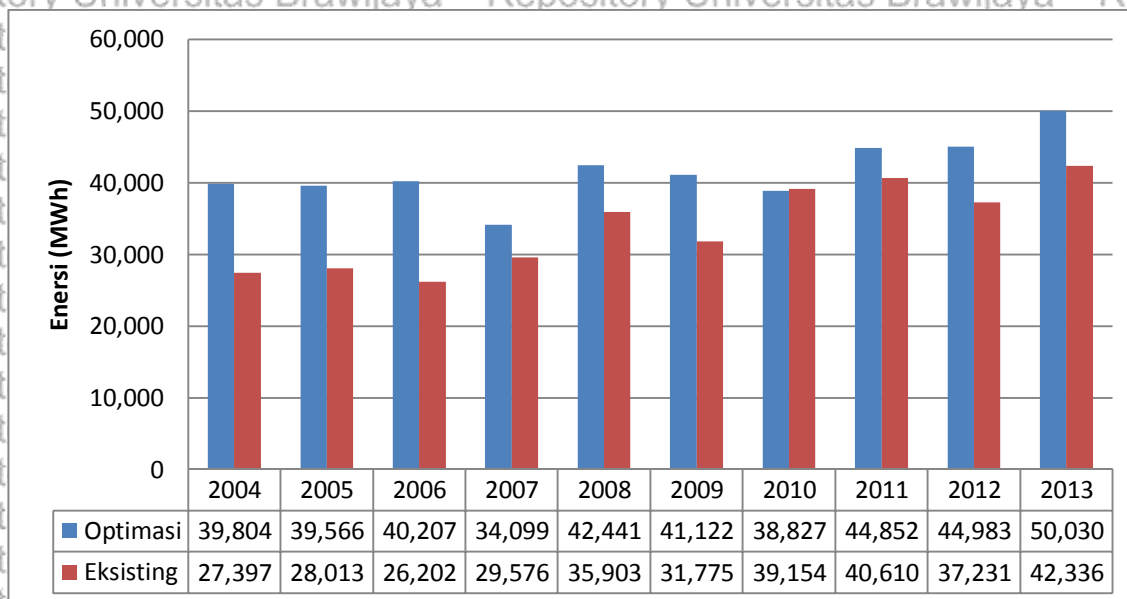
Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.18 Perbandingan Produksi Listrik Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 – 2009

Dari gambar 4.18 diatas dapat diketahui bahwa secara keseluruhan produksi listrik pola operasi waduk optimasi lebih baik dari pada produksi listrik eksisting.

Akan tetapi pada tahun 2010, Simulasi pola operasi waduk eksisting memiliki produksi listrik sebesar 39.154 MWh/15hari atau lebih besar 327 MWh dari produksi listrik optimasi 38.827 MWh/15hari.

Rekapitulasi perbandingan produksi listrik dengan menggunakan pola operasi waduk eksisting dan optimasi dapat dilihat pada gambar 4.19 dan tabel 4.4 dibawah ini.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.19 Perbandingan Produksi Listrik Total Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2013

Apabila dinyatakan dalam bentuk tabel perbandingan produksi listrik total waduk eksisting dengan optimasi adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3 Perbandingan Produksi Listrik Total Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 - 2013

Tahun	Energi (MWh)	
	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
Rata -rata/tahun	33,820	41,593
Total Produksi	338,196	415,930

Sumber: Hasil Perhitungan



Dari grafik dan tabel diatas menunjukan bahwa dengan menggunakan pola kebijakan operasi berdasarkan simulasi dengan menggunakan metode 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.

Walaupun produksi energi listrik tahunan total hasil optimasi lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, akan tetapi pada bulan-bulan tertentu produksi eksisting lebih besar dari hasil optimasi. Kejadian ini terjadi pada umumnya pada Bulan Juni - September yang merupakan bulan-bulan kering/kemarau.

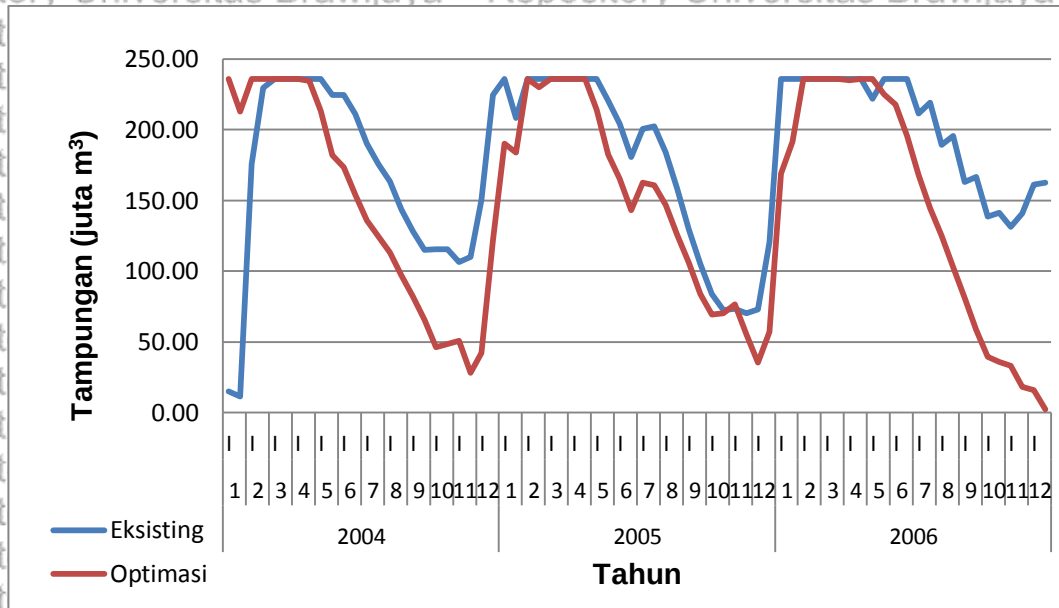
Dari perbandingan produksi listrik diatas dapat dinyatakan bahwa pola operasi waduk optimasi lebih baik bila dibandingkan dengan produksi listrik eksisting.

4.4.2. Perbandingan Tampungan Waduk

Tujuan utama dalam sebuah pengoptimasian adalah menghasilkan suatu keluaran yang semaksimal mungkin, misalnya untuk memaksimalkan produksi listrik pada suatu pengoperasian waduk.

Namum pada pengoperasian waduk menggunakan model stokastik ini disamping bertujuan untuk memaksimalkan produksi listrik yang sebesar-besarnya juga bertujuan untuk menjaga kondisi tampungan waduk, sehingga kondisi tampungan tidak mengalami kekosongan. Kekosongan waduk ini minimal akan mengurangi fungsi dari waduk menjadi tidak efisien dan tidak efektif.

Beberapa grafik di bawah ini menunjukan besarnya tampungan waduk pada tiap periode bulan operasi dari simulasi waduk selama 10 tahun yaitu tahun 2004 sampai tahun 2013. Untuk kondisi waduk pengoperasian eksisting dan pengoperasian wadukk dengan pola pengoperasian waduk optimasi.

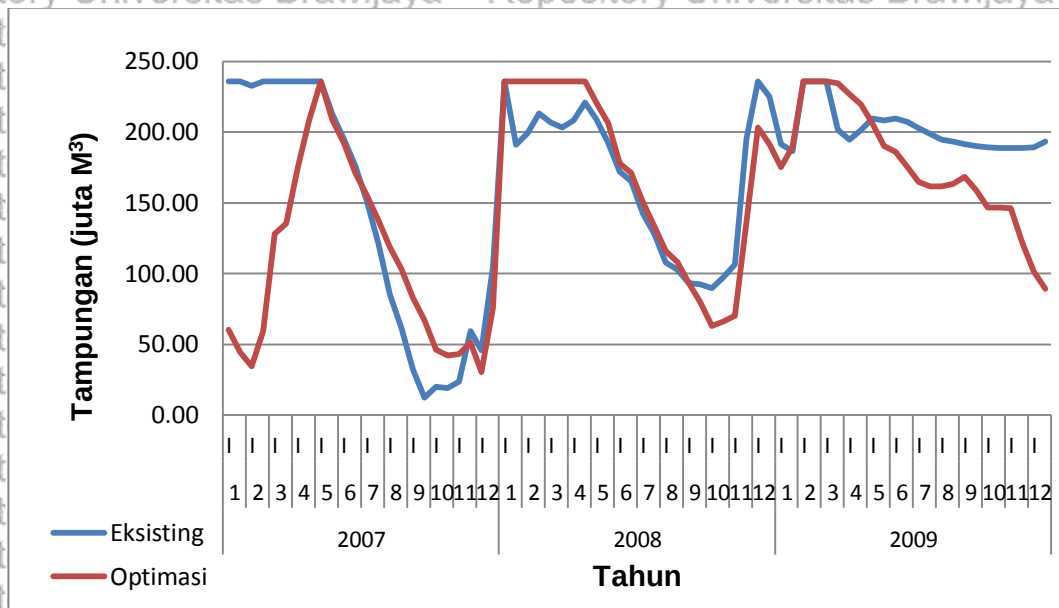


Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.20 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2004 – 2006

Gambar 4.20 diatas menggambarkan volume tampungan eksisting dan optimasi.

Dapat dilihat umumnya volume tampungan waduk eksisting lebih besar bila dibandingkan dengan tampungan pola operasi waduk optimasi, terutama pada tahun 2004 dan 2006.

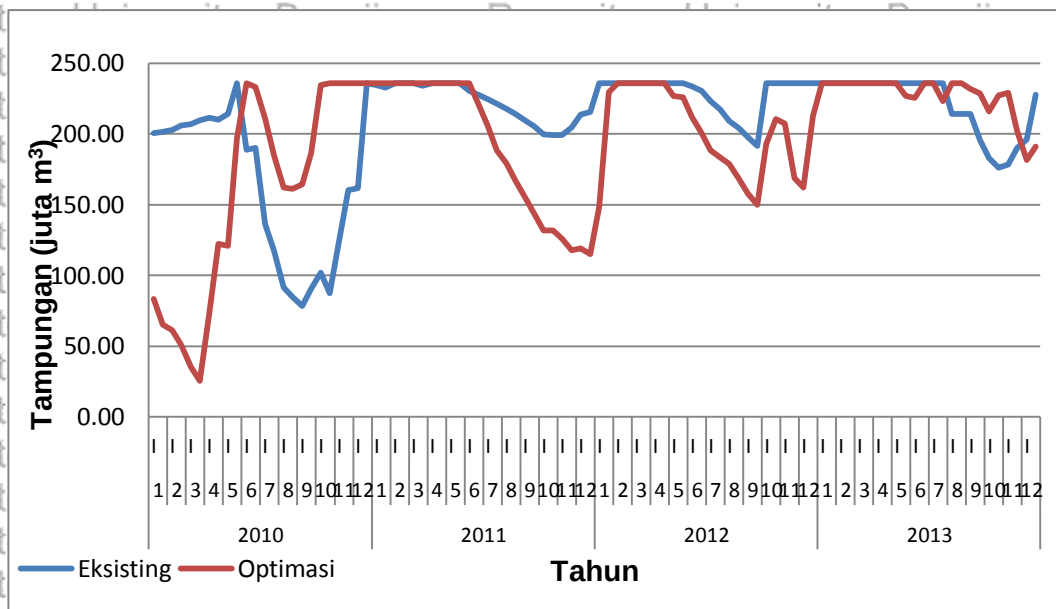


Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.21 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2007 – 2009



Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa pada tahun 2008 volume tampungan waduk optimasi lebih besar bila dibandingkan volume tampungan pola operasi eksisting.



Sumber : Hasil Perhitungan

Gambar 4.21 Perbandingan Tampungan Waduk Eksisting dengan Optimasi Tahun 2010 - 2013

Dari gambar 4.21 diatas dapat diketahui bahwa volume tampungan waduk dari tahun 2010 hingga 2013 cukup besar setiap tahunnya. Ini mengindikasikan bahwa debit inflow Waduk Wonogiri lebih besar dari pada outflow yang dilepaskan oleh Waduk Wonogiri. Volume tampungan yang cukup besar memberikan jaminan ketersediaan debit untuk pemenuhan kebutuhan energi pembangkit listrik dan juga kebutuhan di hilir waduk.

Dari ketiga gambar perbandingan tampungan diatas tampak 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. Ketika kondisi tampungan waduk optimasi rendah, kondisi tampungan waduk eksisting juga rendah dan begitu pula ketika kondisi tampungan tinggi.

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 seperti datangnya inflow yang ditimbulkan oleh hujan maupun kehilangan air waduk akibat pengupan sehingga besarnya air yang dikeluarkan tidak mengakibatkan kekosongan waduk.

4.5. Evaluasi Kinerja Waduk

Ada tiga indikator yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja waduk yaitu keandalan, kelentingan dan kerawanan. Indikator-indikator tersebut kemudian digunakan untuk mengevaluasi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan pembangkit listrik tenaga air dan juga mengevaluasi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan air di hilir waduk.

4.5.1. Keandalan Waduk

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 $14 \text{ m}^3/\text{detik}$.

Data gagal terjadi apa bila operasi waduk dibawah target yang telah ditetapkan.

Total bulan operasi simulasi tahun 2004 - 2013 adalah $10 \text{ tahun} \times 12 \text{ bulan} \times 2 \text{ periode} = 240$, akan tetapi pada simulasi dengan menggunakan pola operasi



waduk hasil optimasi bulan oktober diasumsikan PLTA tidak berproduksi sehingga total bulan simulasi untuk PLTA menjadi 10 tahun x 11 bulan x 2 periode = 220, n = 220.

Tabel 4.4 Perhitungan Keandalan Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepas PLTA

Keandalan	Pemenuhan PLTA	
	Eksisting	Optimasi
Jumlah Data	240	220
Jumlah Gagal	42	0
Jumlah Sukses	198	220
Keandalan	82.50%	100.00%

Sumber: Hasil Perhitungan

Contoh perhitungan Tabel diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada simulasi eksisting total bulan dalam keadaan gagal dalam pemenuhan kebutuhan PLTA adalah 42 berarti total bulan yang sukses adalah 198.

Keandalan (*reliability*) Waduk Wonogiri dalam memenuhi kebutuhan PLTA dengan menerapkan pola operasi waduk eksisting adalah:

$$\alpha = \frac{198}{240} \times 100\% \\ = 82.50\%$$

Dengan cara yang sama keandalan waduk dalam pemenuhan kebutuhan PLTA bila menerapkan pola operasi waduk optimasi adalah 100%.

Dari hasil perhitungan keandalan waduk di atas dapat disimpulkan bahwa pola operasi waduk optimasi lebih baik bila dibandingkan dengan pola operasi eksisting.

4.5.2. Keandalan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk

Pada penelitian ini keandalan memenuhi kebutuhan di hilir waduk dinyatakan dengan kemampuan waduk dalam memenuhi 80% kebutuhan di Hilir Waduk.



Tabel 4.5 Perhitungan Kehandalan Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk

Kehandalan	Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi
Jumlah Data	240	240
Jumlah Gagal	59	55
Jumlah Sukses	181	240
Kehandalan	75.42%	100%

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan yang disajikan pada tabel diatas menunjukan bahwa dengan menggunakan pola operasi waduk hasil optimasi waduk dapat memenuhi 100% kebutuhan di hilir waduk. Hasil ini lebih baik bila dibandingkan dengan menerapkan pola operasi waduk eksisting yang hanya dapat memenuhi 75.42% kebutuhan di hilir waduk.

4.5.3. Kelentingan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA

Kelentingan berfungsi mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Perhitungan indikator kelentingan waduk dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.6 Perhitungan Kelentingan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA

Kelentingan	Pemenuhan PLTA	
	Eksisting	Optimasi
Jumlah Transisi	20	0
Jumlah Bulan Gagal	42	0
Rata-rata Gagal	2.1	0
Kelentingan	47.62%	100.00%

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan pola operasi waduk optimasi, nilai kelentingan adalah 100%, ini terjadi karena pada pola operasi waduk optimasi tidak pernah terjadi kegagalan dalam memenuhi



kebutuhan lepasan PLTA. Perhitungan nilai kelentingan (*Resiliency*) waduk pada pola operasi eksisting dapat dijelaskan sebagai berikut:

Frekuensi terjadi masa transisi dari sukses ke gagal atau sebaliknya

$$\sum Wt = 20$$

Jangka waktu rata-rata waduk dalam keadaan gagal:

$$T_{\text{gagal}} = \frac{42}{20} = 2.1$$

$$\text{Jadi } \gamma_{\text{PLTA}} = 47.62\%$$

Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal untuk memenuhi kebutuhan air PLTA dengan menggunakan pola operasi eksisting adalah sebesar 47.62%.

4.5.4. Kelentingan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan di Hilir

Perhitungan indikator kelentingan waduk dalam memenuhi kebutuhan kebutuhan di hilir waduk dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.7 Perhitungan Kelentingan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk

Kelentingan	Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi
Jumlah Transisi	21	0.00
Jumlah Bulan Gagal	59	0.00
Rata-rata Gagal	2.81	0.00
Kelentingan	35.59%	100.00%

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan nilai kelentingan (*resiliency*) dalam memenuhi kebutuhan di hilir waduk pada tabel di atas dapat dijelaskan sebagai berikut :

Pada simulasi pola operasi waduk eksisting, frekuensi terjadi masa transisi dari sukses ke gagal atau sebaliknya

$$\sum Wt = 21$$

Jangka waktu rata-rata waduk dalam keadaan gagal:



$$T_{\text{gagal}} = \frac{59}{21} = 2.81$$

$$\text{Jadi } \gamma_{\text{hilir}} = 35.59\%$$

Dengan cara yang sama diperoleh kelentingan waduk pola operasi optimasi adalah 100%. Dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat bahwa kelentingan waduk pola operasi optimasi lebih baik dari pola operasi waduk eksisting..

4.5.5. Kerawanan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan PLTA

Kerawanan berfungsi untuk menentukan atau mengukur seberapa besar rawan suatu kegagalan jika terjadi kegagalan. Dalam hal ini jika terjadi kegagalan maka dapat diukur seberapa besar suatu kegagalan yang terjadi.

Tabel 4.8 Perhitungan Kerawanan Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Lepasn PLTA

Kerawanan	Pemenuhan PLTA	
	Eksisting	Optimasi
Total Defisit (Juta m ³)	593.56	0.00
Rata-rata Defisit (Juta m ³)	14.13	0.00
Rata-rata Defisit Ratio (%)	12.78	0.00
Max Defisit Ratio (v ₂) (%)	100.00	0.00
Maksimum Defisit (V ₃) (Juta m ³)	19.35	0.00

Sumber: Hasil Perhitungan

Pada pola operasi waduk eksisting, total defisit pada pemenuhan air PLTA adalah 593.56 juta m³ sehingga rata-rata defisit adalah $593.56/59 = 14.13$ juta m³. nilai rata-rata defisit ratio adalah 12.78%. Hal ini menjelaskan bahwa bila terjadi kegagalan dalam memenuhi kebutuhan air di hilir waduk maka 12.78% dari kebutuhan tidak dapat terpenuhi, dengan rata-rata defisit sebesar 14.13 juta m³/15hari setiap terjadi kegagalan. Nilai maksimum defisit ratio (v₂) adalah 100% dengan nilai maksimum defisit v₃ = 19.35 juta m³.

4.5.6. Kerawanan Waduk Dalam Memenuhi Kebutuhan di Hilir

Indikator kerawanan waduk dalam memenuhi kebutuhan di Hilir dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.9 Perhitungan Kerawanan Waduk Waduk Wonogiri Dalam Memenuhi Kebutuhan Di Hilir Waduk

Kerawanan	Pemenuhan Di Hilir	
	Eksisting	Optimasi
Total Defisit (Juta m ³)	663.97	0.00
Rata-rata Defisit (Juta m ³)	11.25	0.00
Rata-rata Defisit Ratio (%)	12.18	0.00
Max Defisit Ratio (v ₂) (%)	100.00	0.00
Maksimum Defisit (V ₃) (Juta m ³)	36.63	0.00

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa kerawanan waduk bila terjadi kegagalan adalah 12.18% untuk pola operasi waduk eksisting dan 0% untuk pola operasi waduk optimasi, sehingga dapat di simpulkan bahwa pola operasi waduk eksisting lebih rawan terjadi kegagalan dari pada waduk optimasi.



BAB V PENUTUP

100

5.1. Kesimpulan

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

1. Dari hasil simulasi dengan menggunakan pola operasi waduk eksisting selama 10 tahun dari awal tahun 2004 hingga akhir tahun 2013 dapat diketahui bahwa total produksi listrik yang dihasilkan oleh PLTA Wonogiri adalah 338.196 Juta MWh/15hari atau rata-rata 33.820 MWh/15hari pertahunnya. Tampung waduk eksisting juga tidak pernah mengalami kondisi kosong dimana kekosongan tampungan merupakan hal yang harus dihindari dalam pengoperasian waduk. Kekosongan tampungan akan mengurangi fungsi waduk menjadi tidak efisien dan tidak efektif.
2. Dari hasil simulasi dengan menggunakan bantuan program solver *evolutionary* diperoleh aturan lepasan waduk untuk mendapatkan produksi listrik yang paling optimal.



Tabel 5.1 Lepasn Berdasarkan Tampungan Waduk Hasil Optimasi

No	Aturan Lepasn	
	Batas Minimum Tampungan Efektif (%)	Lepasn PLTA (% dari QmaxPLTA)
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 bila dibandingkan dengan hasil produksi listrik pola operasi waduk eksisting. Produksi listrik mengalami peningkatan produksi rerata tahunan 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. 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 trend yang hampir sama.
4. Hasil evaluasi kinerja pola operasi waduk eksisting dan pola operasi waduk optimasi disajikan pada tabel dibawah ini:



Tabel 5.1 Rekapitulasi kinerja waduk

Kinerja	Pemenuhan PLTA		Pemenuhan 80% kebutuhan di hilir waduk	
	Eksisting	Optimasi	Eksisting	Optimasi
Keandalan	82.50%	100.00%	75.42%	100.00%
Kelentingan	47.62%	100.00%	35.59%	100.00%
Kerawanan	12.79%	0.00%	12.18%	0.00%

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel diatas diketahui bahwa waduk hasil optimasi lebih baik bila dibandingkan dengan kinerja waduk eksisting. Dengan menerapkan pola operasi waduk optimasi Waduk Wonogiri memiliki keandalan 100% dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan pemenuhan 80% dari kebutuhan di hilir waduk. Hal ini mengindikasikan bahwa waduk tidak pernah mengalami kegagalan dalam memenuhi kebutuhan lepasan PLTA dan kebutuhan 80% air di hilir waduk.

5.2. Saran

Saran yang berkaitan dengan penelitian ini untuk pengembangan dan peningkatan ataupun tindak lanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penyusunan pola operasi waduk dalam penelitian ini menggunakan data 15 harian, maka untuk penelitian lebih lanjut disarankan menggunakan periode yang lebih pendek sehingga mendekati sistem yang sebenarnya.
2. Dalam penelitian ini pengaruh sedimentasi hanya berupa perubahan elevasi tampungan minimum operasi yang menyebabkan berkurangnya kapasitas tampungan aktif waduk, maka untuk pengembangan penelitian disarankan pola operasi juga memperhatikan laju sedimentasi tiap tahunnya sehingga dapat diketahui pengaruh laju sedimentasi terhadap pola operasi waduk.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2011). *Proposal Documents of Rehabilitation for Wonogiri Multipurpose Dam for Design Approval*, Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Anonim. (2010). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tentang Bendungan, Jakarta.
- Anonim. (2010). Laporan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2010-2019.
- Asmoro, Widhi. Eko Saroni W (2007). *Evaluasi Kinerja Waduk Wadaslintang*. Skripsi, Universitas Diponegoro, Semarang
- Aprizal. (2003). Optimasi Waduk Menggunakan Program Dinamik Stokastik (Kasus Waduk Saguling Jawa Barat), Tesis, Semarang: Program Pascasarjana Universitas Diponegoro
- 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.
- Goldberg, D.E (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, MA: Addison-Wesley
- Hilmi, Moh. (2012). Optimasi Pola Operasi Waduk Pelaparado Di Kabupaten Bima Provinsi NTB, Tesis, Malang: Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)
- Irvani, Harvi. (2012). Studi Optimasi Pola Operasi Waduk Sutami Akibat Perubahan Iklim, Tesis Malang: Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)



- Janga Reddy dan Kumar Nagesh (2006). Optimal Reservoir Operation Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm, *Jurnal Water Resources Management* 20:861-878
- Kholis, Natsrul. (2000). Optimasi Pengoperasian Waduk Sutami Dengan Program Dinamik Deterministik, Skripsi, Malang: Fakultas Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)
- Kuiper, Edward. (1965). *Water Resources Development Planning Engineering And Economics*. Manitoba: London Butterworths
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith D.A., (1981) *Water resources System Planning and Analysis*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J
- Mantisan, C.H. (2010). Studi Optimasi Ketersediaan Dan Kebutuhan Air Irigasi Pada Pola Tata Tanam D.I. Sumber Bureng (894 Ha) Periode 2009/2010 Melalui Program Dinamik, *Skripsi*, Malang: Fakultas Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)
- Miranti, Febry Asthia. (2010). Peningkatan Kinerja Operasi Waduk Wonogiri, *Skripsi*, Surakarta: Jurusan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret. (Tidak dipublikasikan)
- Montarchi, L. (2010). *Hidrologi Praktis*. Bandung: CV. Lubuk Agung.
- Montarchi, L. & Soetopo, W. (2011). *Teknik Sumber Daya Air Manajemen Sumber Daya Air*. Bandung: CV. Lubuk Agung.
- Montarchi, L. & Soetopo, W. (2013). *Statistik Terapan Untuk Teknik Pengairan*. Malang: CV. Citra.
- Mukhlisin, M. (2007). Environmental Study Impact Of Sediment Flushing On Downstream Area Case Study: Planning Of Sediment Flushing On Gajah Mungkur Dam Wonogiri, Central Java, *Skripsi*, Semarang: Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang.



- Nait, C. (2005). *Optimasi Pola Operasi Waduk Tilong dengan Program Dinamik Deterministik*, Tesis, Bandung: Program Magister Pengembangan Sumber Daya Air Institut Teknologi Bandung. (Tidak dipublikasikan)
- Natalia, Karni. (2008). *Penyusunan Rule Curve Waduk Menggunakan Model Program Dinamik Deterministik*, Skripsi, Malang: Fakultas Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)
- Sardi, dkk. (2008). *Kajian Penanganan Sedimentasi Dengan Waduk Penampung Sedimen Pada Bendungan Serbaguna Wonogiri*, Forum Teknik Sipil No. XVIII
- Soedibyo. (2003). *Teknik Bendungan*. Jakarta : PT. Sentra Sarana Abadi
- Soetopo. W. (2010). *Operasi Waduk Tunggal*. Malang: CV. Asrori
- Soetopo, W. (2011). *Model – model Simulasi Deterministik Untuk Sistem Sumber Daya Air*. Malang: CV. Citra
- Soetopo, W. (2012). *Model – model Simulasi Stokastik Untuk Sistem Sumber Daya Air*. Malang: CV. Citra
- Sreenivasan, K.R & Vedula, S. (1996). *Reservoir Operation For Hydropower Optimization A Chance-Constrained Approach*, India: Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science.
- Wangsadipura, M & Suria, Rachmat (2006). *Penggunaan Program Dinamik Deterministik dalam Penentuan Kurva Pengatur Pengoperasian Waduk Berdasarkan Kondisi Musim Tahun Air*, *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan* Vol. II No 1
- Yuliani, Indah (2000). *Optimasi Pengoperasian Waduk Sutami Untuk PLTA dan Pengendalian Banjir Dengan Program Dinamik Stokastik*, Skripsi, Malang: Fakultas Teknik Pengairan Universitas Brawijaya. (Tidak dipublikasikan)