

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK SUTAMI MENGGUNAKAN MODEL PEMROGRAMAN LINIER KABUR (FUZZY LINEAR PROGRAMMING)

Yenson Priyadi Abel¹, Rispiningtati², Widandi Soetopo²

¹Mahasiswa Magister Teknik Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia; e_mail : yenson_s2ub@ymail.com

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang

ABSTRAK: Bendungan Sutami terletak di Desa Karangates, Kecamatan Sumber Pucung, Kabupaten Malang. Manfaat utama untuk pengendalian banjir, irigasi, PLTA sebesar 3 x 35 MW dan memenuhi kebutuhan debit minimum 56 m³/det untuk daerah hilir. Pada awal perencanaan, debit minimum turbin PLTA adalah 25 m³/det dan debit maksimum 51.39 m³/det. Dalam usia 40 tahun, turbin hanya mampu menerima debit maksimum sebesar 46.09 m³/det. Untuk mempertahankan produksi energi listrik yaitu dengan mengoptimalkan outflow yang masuk ke turbin. Dirancang menggunakan model pemrograman linier kabur yang dipadukan dengan model simulasi untuk penilaian kinerja pola operasi waduk. Dalam kajian ini diperoleh hasil optimasi selama 11 tahun berupa produksi energi optimal sebesar 5606.66 GWh, kurva pengatur tinggi muka air baru dan simulasi menghasilkan keandalan 100.00 % untuk model dan eksisting.

Kata Kunci : Program linier kabur, optimasi, simulasi, pola operasi waduk, waduk Sutami.

ABSTRACT: *Sutami Reservoir is located in Karangates Village, Sumber Pucung District, Malang Regency. Its primary benefits are for flood control, irrigation, power generation of 3 x 35 MW, and to supply a minimum discharge of 56 m³/sec for downstream regions. Early on, it was planned that the minimum discharge for the hydropower turbine would be 25 m³/sec and the maximum discharge would be 51.39 m³/sec. In its 40 years of age, the turbine has only been capable of handling a maximum discharge of 46.09 m³/sec. Electricity production can be maintained by optimizing the outflow that enters the turbine. A model was designed using a fuzzy linear programming model, which is combined with a simulation model for reservoir operating rule performance evaluation. In this study, an optimization of 11 years was obtained, in the form of optimal energy production of 5606.66 GWh, a new rule curve for the regulation of water surface levels, and a simulated result of 100% reliability for the model and existing implementation.*

Keywords : *Fuzzy linear programming, optimization, simulation, reservoir operation rule, Sutami reservoir.*

A. PENDAHULUAN

Krisis energi yang terjadi di Negara kita hanya dapat diatasi dengan mencari sumber-sumber energi baru atau mengoptimalkan kinerja sistem. Air pada waduk yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik merupakan sumber energi yang perlu dioptimalkan.

Kendala dalam mengoptimalkan kinerja sebuah sistem terdapat variabel - variabel yang tidak dapat dipastikan dengan tepat, maka yang

terjadi adalah ketidaktentuan (*uncertainty*) atau kekaburan (*fuzzy*). Hal tersebut dapat dimodelkan dengan distribusi probabilitas dan fungsi keanggotaan *fuzzy* (Loucks, D.P and Beek,E.V, 2005: 135).

Model optimasi pola operasi waduk Sutami akan dirancang dengan menggunakan model optimasi program linier kabur (*fuzzy linear programming*). Hasil solusi dipadukan dengan model simulasi dalam memahami kinerja daripada operasi waduk.

Dengan memperhatikan kondisi –kondisi diatas, maka permasalahan dalam studi ini dirumuskan sebagai berikut :

1. Berapakah produksi energi PLTA Sutami maksimal yang didapat dari hasil optimasi Program Linier Kabur ?.
2. Bagaimanakah perbandingan lepasan dan produksi energi dari hasil optimasi Program Linier Kabur dibandingkan dengan optimasi Program Linier dan Data Lapangan ?
3. Bagaimanakah perbandingan hasil simulasi tahun 2009 - 2011 berupa produksi energi dan kinerja keandalan dibandingkan kondisi eksisting ?

B. BAHAN DAN METODE

B.1. Uji Stasioner

Uji stasioner dimaksudkan untuk menguji kestabilan nilai varian dan rata-rata dari deret berkala. Pengujian nilai varian dari deret berkala dapat dilakukan dengan Uji-F (Soewarno, 1995:38):

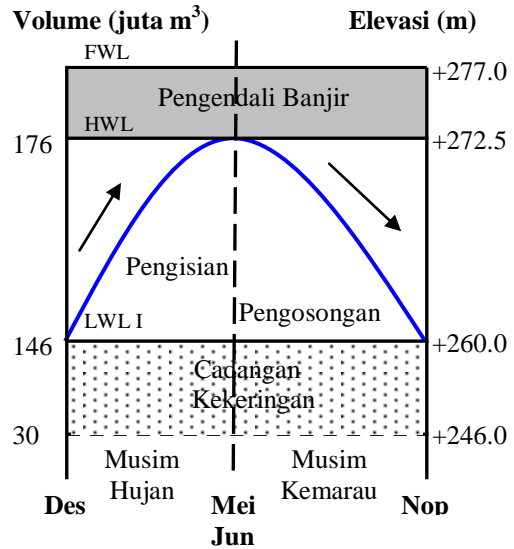
$$F = \frac{N_1 \cdot S_1^2 (N_2 - 1)}{N_2 \cdot S_2^2 (N_1 - 1)} \quad (2.1)$$

Apabila hasil pengujian nilai varian tidak stabil atau tidak homogen berarti deret berkala tersebut tidak stasioner, dan tidak perlu melakukan pengujian selanjutnya, akan tetapi sebaliknya jika angka varian menunjukkan stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan dari nilai rata-ratanya. Pengujian kesamaan jenis nilai rata-rata dapat dilakukan dengan menggunakan uji-t sebagai berikut (Soewarno 1995: 18):

$$T = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sigma \left| \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right|^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

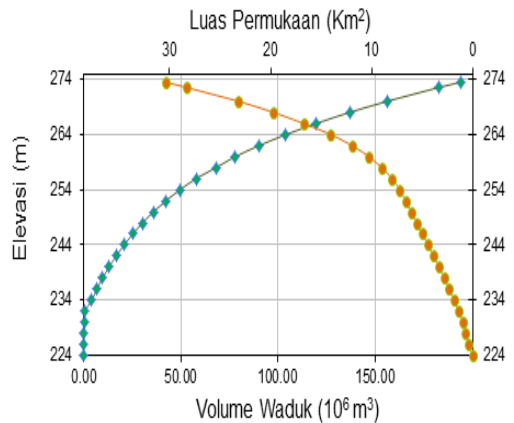
B.2. Dasar operasi waduk Sutami

Waduk Sutami adalah waduk yang beroperasi tahunan/musiman. Waduk ini menampung air selama debit lebih atau musim hujan dan melepaskannya pada saat debit kurang atau pada musim kemarau (Haryadi, 2000: 27)



Gambar 1. Pola Operasi Waduk Sutami

Sumber: Perum Jasa Tirta I, 2014

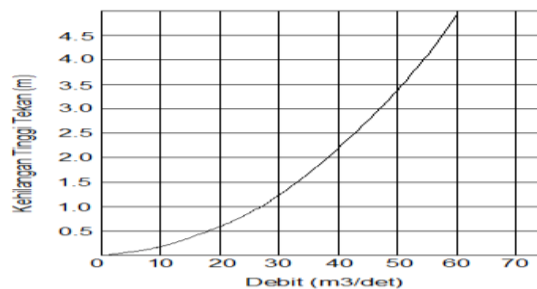


Gambar 2. Kurva Gabungan H-A-V

Sumber: Perum Jasa Tirta I, 2014

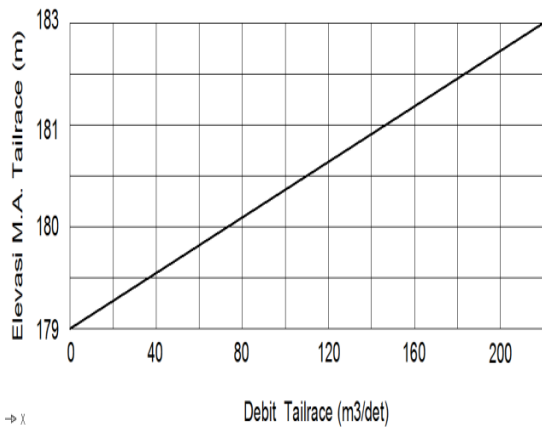
Produksi energi adalah prioritas utama yang berkembang pesat dalam pemanfaatan tinggi jatuh air untuk memutar turbin elektrik. Dengan mengekstraksi 80-90% energi potensial tinggi jatuh, PLTA saat ini merupakan sumber energi listrik yang paling efisien (Mays,L.W,1996:31.1– 31.3)

Data karakteristik PLTA waduk Sutami, adalah sebagai berikut :

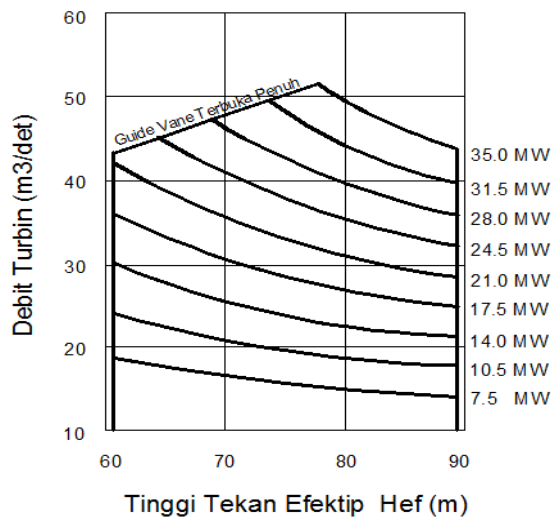


Gambar 3. Kehilangan Tinggi Tekan

Sumber: Soetopo, Widandi. 1984 : 38



Gambar 4. Karakteristik Instalasi PLTA
Sumber: Soetopo, Widandi, 1984 : 39



Gambar 5. Output Per Unit PLTA
Sumber: Soetopo, Widandi, 1984 : 40

Hubungan antara lepasan debit ke turbin untuk menghasilkan listrik bersifat non linier, kompleks dan tidak menentu. Pendekatan yang dipergunakan adalah menggunakan program linier yang dikombinasi dengan logika kabur menjadi program linier kabur (*Fuzzy Linear Programming*). Kekaburan dalam hal ini adalah pada fungsi batasan dan pada cara pandang kita melihat permasalahan. Seperti pernyataan dari Profesor Zadeh yaitu : “Kompleksitas dan ketidaktentuan berhubungan erat, semakin dekat/detail kita melihat suatu permasalahan dalam dunia nyata maka semakin kabur/tidak jelas penyelesaiannya”(Sen, Zekai, 2010: 1).

B.2. Optimasi program linier kabur

Maks : $\sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j$

batasan : $\sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j \leq \tilde{b}_i \quad (i \in N_m)$
 $X_j \geq 0, \quad (j \in N_n) \quad (1)$

Pada kasus ini $\tilde{b}_i \quad (i \in N_m)$ adalah bilangan kabur yang diikuti fungsi keanggotaan linier :

$$\mu_{b_i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq b_i \\ \frac{b_i + p_i - x}{p_i} & \text{if } b_i < x < b_i + p_i \\ 0 & \text{if } b_i + p_i \leq x \end{cases} \quad (2)$$

dimana $x \in R$. Untuk masing-masing vektor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, pertama kita hitung tingkatannya, $D_i(x)$ dimana x adalah variabel batas ($i \in N_m$) pada rumus :

$$D_i(x) = B_i \left(\sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j \right) \quad (3)$$

Tingkatan ini adalah himpunan kabur dalam R, dan irisannya $\bigcap_{i=1}^m D_i$ adalah anggota himpunan kabur. Batas bawah dari nilai optimal ($Z_{lower} = Z_l$), diperoleh dengan menyelesaikan masalah program linier standar :

Maks : $Z = c \cdot x$

Batasan : $\sum_{j=1}^n a_j \cdot X_j \leq b_i \quad (i \in N_m)$
 $X_j \geq 0, \quad (j \in N_n) \quad (4)$

Batas atas dari nilai optimal ($Z_{upper} = Z_U$) diperoleh dengan cara yang sama dengan menyelesaikan masalah program linier dimana tiap – tiap nilai b_i diganti dengan $b_i + p_i$:

Maks : $Z = c \cdot x$

Batasan : $\sum_{j=1}^n a_j \cdot X_j \leq b_i + p_i \quad (i \in N_m)$
 $X_j \geq 0, \quad (j \in N_n) \quad (5)$

Kemudian nilai optimal himpunan kabur , G dimana anggota himpunan kabur R didefinisikan sebagai fungsi keanggotaan linier $G(x)$ untuk tujuan berikut :

$$\mu G(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j < Z_L \\ \frac{\sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j - Z_L}{Z_U - Z_L} & \text{if } Z_L \leq \sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j < Z_U \\ 1 & \text{if } \sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j \geq Z_U \end{cases} \quad (6)$$

Grafik (6) menggambarkan fungsi keanggotaan linier yang didapat dari persamaan (6) untuk tujuan kabur yang ditampilkan dalam Gambar 2.

Himpunan kabur dilambangkan i dengan batasan C_i , dimana anggota himpunan R, didefinisikan :

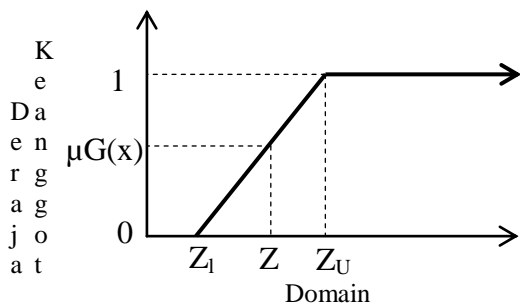
$$\mu C_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j < b_i \\ \frac{(b_i + p_i) - \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j}{p_i} & \text{if } b_i < \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j \leq b_i + p_i \\ 1 & \text{if } b_i + p_i < \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j \end{cases} \quad (7)$$

Grafik fungsi keanggotaan linier dari persamaan (7) untuk sumberdaya kabur ditampilkan dalam Gambar 7.

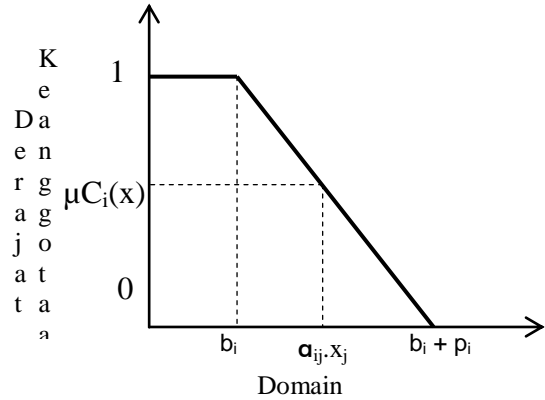
Dengan menggabungkan informasi diatas, masalah yang didapat dari Persamaan (1) diubah menjadi masalah optimasi selanjutnya sebagai berikut ini :

Maksimumkan : λ
 Batasan : $\mu G(x) \geq \lambda$
 $\mu C_i(x) \geq \lambda \quad 1 \leq i \leq m$
 $x \geq 0, 0 \leq \lambda \leq 1$ (8)

dimana : $\mu G(x)$ = x merupakan anggota himpunan fungsi karakteristik G
 $\mu C_i(x)$ = x merupakan anggota himpunan fungsi karakteristik C_i



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Tujuan
 Sumber: <http://www.SciRP.org/journal/jwarp>



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Batasan

Sumber: <http://www.SciRP.org/journal/jwarp>

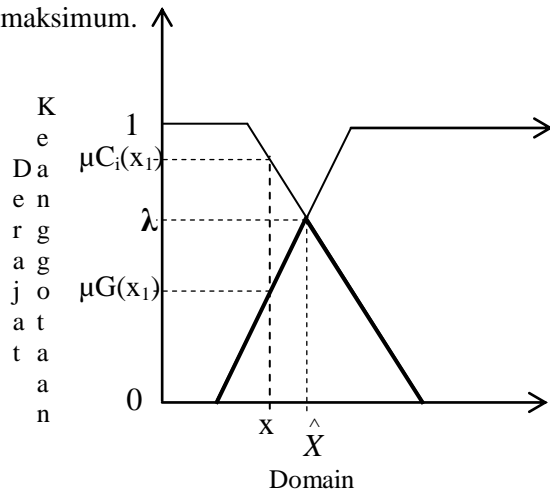
Dengan menggunakan persamaan (6), (7) dan (8) dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

Maks : λ
 Batasan : $\lambda (Z_u - Z_l) - cx \leq - Z_l$
 $\lambda \cdot p_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot X_j \leq b_i + p_i \quad (i \in N_m)$
 $\lambda, X_j \geq 0, \quad (j \in N_n)$ (9)

Dimana, λ adalah tingkat kepuasan/kepekaan ataupun derajat keanggotaan yang nilainya berkisar antara 0 sampai dengan 1. Masalah diatas sebenarnya masalah untuk menemukan $\hat{X} \in R$ seperti berikut :

$$[(\bigcap_{i=1}^m D_i) \cap G] (x) \quad (10)$$

Untuk mencapai nilai maksimum dari: masalah untuk mendapatkan titik (λ) yang cocok bagi nilai fungsi batasan dan fungsi tujuan pada nilai derajat maksimum.



Gambar 8. Solusi Program Linier Kabur

Sumber : http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=-Zuf3uk6-UI

B.4. Perumusan simulasi waduk Sutami

Adapun batasan-batasan dari simulasi dengan asumsi sebagai berikut :

1. Debit Inflow adalah debit bulanan ditambah inflow rata-rata dari waduk Lahor sebesar $10 \text{ m}^3/\text{det}$.
2. Debit minimum turbin $25 \text{ m}^3/\text{det}$ dan debit maksimum $46.09 \text{ m}^3/\text{det}$.
3. Simulasi dilakukan dengan coba-coba Q outflow PLTA berdasarkan Rule Curve hasil optimasi.
4. Awal simulasi dilakukan pada bulan Nopember yang merupakan awal pengisian waduk Sutami.
5. Air digunakan seoptimal mungkin sehingga lepasan yang dilakukan adalah lepasan maksimal dan diusahakan tidak ada spillout.
6. Keberhasilan simulasi ditinjau dari 1 tahun atau musim operasi.
7. Kontrol simulasi yaitu elevasi muka air terendah turbin dapat beroperasi $+246.000$.
8. Produksi energi hasil dari simulasi merupakan pembandingan bagi energi hasil dari optimasi, sehingga yang digunakan adalah hasil optimasi.

B.4. Ukuran kinerja operasi waduk

a. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk dapat memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya.

Adapun tahapan perhitungan :

1. Tentukan jumlah data, jumlah simulasi gagal dan simulasi sukses.
2. Keandalan = $(\text{jlh gagal}/\text{jlh data}) \times 100\%$

b. Kelentingan (*Resiliency*)

Kelentingan merupakan indikator dalam mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Adapun tahapan perhitungan :

1. Hitung jumlah transisi, rerata transisi, rerata sukses, $1 - \text{rerata sukses}$
2. Kelentingan = $\text{rerata transisi}/(1 - \text{rerata sukses}) \times 100\%$

c. Kerawanan (*Vulnerability*)

Kerawanan adalah besaran dari kegagalan/defisit yang didapat dari perbedaan antara kapasitas waduk dan jumlah air yang dibutuhkan, dibagi dengan jumlah air yang dibutuhkan. Adapun tahapan perhitungan :

1. Hitung jumlah defisit, hitung jumlah kebutuhan pada bulan gagal

2. Kerawanan = $(\text{jlh defisit}/\text{jlh keb. Bulan gagal}) \times 100\%$

B.5. Metode Penelitian

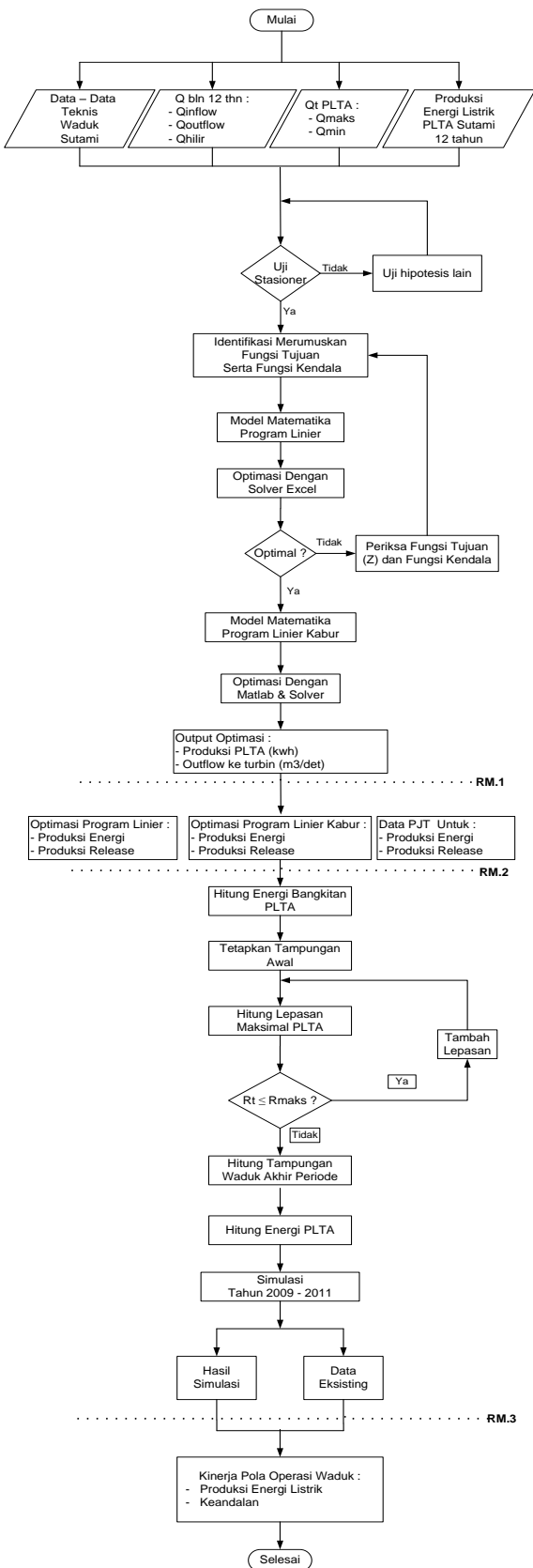
B.5.1. Pengumpulan Data

Data – data yang diperlukan dalam studi ini diperoleh dari Perusahaan Umum Jasa Tirta I, Malang yang beralamat di Jalan Surabaya No. 2A Malang.

Adapun data – data yang diperlukan adalah sebagai berikut :

- a. Debit Inflow bulanan Waduk Sutami dari tahun 2002 sampai 2013
- b. Debit Outflow bulanan Waduk Sutami dari tahun 2002 sampai 2013
- c. Kebutuhan air bulanan di daerah hilir dari tahun 2002 s/d 2013
- d. Data teknis waduk Sutami
- e. Pola operasi waduk Sutami
- f. Produksi listrik tahun 2002 s/d 2013

B.5.2. Metodologi



Gambar 9. Diagram Alir Studi
 Sumber : Hasil Analisa Studi

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data debit andalan PJT yang dipergunakan merupakan total inflow yang masuk ke waduk Sutami yang berasal dari outflow Sengguruh, inflow *remaining basin* dan rerata inflow Lahor.

1. Uji Stasioner

Uji stasioner dimaksudkan untuk menguji kestabilan nilai varian dan rata-rata dari deret berkala. Pengujian nilai varian dari deret berkala dapat dilakukan dengan Uji-F (Soewarno, 1995:38):

Untuk uji stasioner digunakan 2 uji hipotesis yaitu uji F dan uji T. Adapun tahapan uji F sebagai berikut :

1. Menghitung nilai F

$$F_{hitung} = \frac{N_1 \cdot S_1^2 (N_2 - 1)}{N_2 \cdot S_2^2 (N_1 - 1)} = 0.7508$$

2. Mencari nilai F dari tabel

Untuk $\alpha = 5\%$ pada derajat kebebasan $dk1 = dk2$ dan $dk = n - 1 = 72 - 1 = 71$ dari tabel distribusi F maka $F_{tabel} = 1.5142$.

3. Kesimpulan Hipotesis

Oleh karena $F_{hitung} < F_{tabel}$ maka nilai varian menunjukkan bahwa **kedua kelompok data homogen atau stasioner**.

Apabila hasil pengujian nilai varian tidak stabil atau tidak homogen berarti deret berkala tersebut tidak stasioner, dan tidak perlu melakukan pengujian selanjutnya, akan tetapi sebaliknya jika angka varian menunjukkan stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan nilai rata-ratanya. Pengujian kesamaan jenis nilai rata-rata dapat dilakukan dengan menggunakan uji-t (soewarno 1995: 18):

Adapun tahapan uji T sebagai berikut :

1. Menghitung nilai σ

$$\sigma = \left| \frac{N_1 \cdot S_1^2 + N_2 \cdot S_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \right|^{\frac{1}{2}} = 14719.50$$

2. Menghitung nilai T

$$T_{hitung} = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sigma \left| \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right|^{\frac{1}{2}}} = 1.05$$

3. Mencari nilai T dari tabel

Untuk $\alpha = 5\%$ pada kedua sisi dimana menggunakan kolom $t_{0.975}$, dimana derajat bebas $n = n_1 + n_2 - 2 = 72 + 72 - 2 = 142$ maka dari tabel distribusi t diperoleh nilai $T_{tabel} = 1.96$.

4. Kesimpulan Hipotesis

Oleh karena nilai $T_{hitung} < T_{tabel}$ maka **kedua kelompok data berasal dari populasi yang sama.**

Apabila dari hasil uji F dan uji T hasilnya tidak memuaskan dilakukan uji hipotesis lainnya seperti uji Z namun apabila hasilnya cukup memuaskan maka hanya kedua uji ini yang akan dipergunakan. Maka data yang telah diuji dapat dipergunakan karena stabil secara varian maupun reratanya atau stasioner.

2. Optimasi Program Linier Kabur

Tahapan optimasi program linier kabur (plk) dengan menyelesaikan terlebih dahulu optimasi program linier yaitu :

1. Menentukan Fungsi Tujuan yaitu memaksimalkan total energi setahun
Maksimumkan :
 $Z = \sum E_t = E1 + E2 + E3 + E4 + \dots + E12$
2. Menentukan Fungsi Batasan :
 - $S_{min} \leq S_t \leq S_{mak} + \Delta S_t$
 $25 \leq S_t \leq 117.18 + 20.82 t$
 - $R_{min} \leq R_t \leq R_{mak} + \Delta R_t$
 $25 \leq R_t \leq 117.18 + 20.82 t$
 - $\sum I_t = \sum R_t$ dalam setahun
 - $E_t \geq 0$

dimana :

- E = Energi listrik pertahun (kwh)
= $9.8 \times E_{tg} \times R \times H_{ef} \times N$
- E_{tg} = Efisiensi turbin generator, besarnya 0.790
- R = *Release* ke turbin (m^3/det)
- H_{ef} = Tinggi jatuh efektif (m)
- TWL = Muka air belakang (*Tail water level*), el. 179 m
- HL = Kehilangan tinggi (*Head Loss*), besarnya 2.85 m
- N = Waktu (*hour/jam*)
- E_1, E_2, E_3, E_t = Energi bulanan
- S_t = Tampungan bulanan (m^3)
- S_{min} = Tamp. minimum (m^3)
- S_{mak} = Tamp.maksimum (m^3)
- ΔS_t = Perubahan tampungan (m^3)
- R_t = Outflow turbin (m^3/det)
- R_{min} = *Release* minimum ke turbin yaitu $25 m^3/det$
- R_{mak} = *Release* maksimum ke turbin yaitu $46.09 m^3/det$
- ΔR_t = Perubahan outflow (m^3/det)
- I_t = Debit inflow (m^3/det)

3. Menyelesaikan program linier dengan memaksimalkan fungsi dari tujuan (Z) menggunakan program linier model Ris (Rispiningtati, 2010: 2) dengan fasilitas solver pada excel. Untuk kondisi $t=0$ ($\lambda=1$) dan $t=1$ ($\lambda=0$), dimana :

- Kondisi $t=0$ ($\lambda=1$) merupakan kondisi optimasi program linier sebenarnya dan dijadikan sebagai batas bawah ($Z_{Lower} = Z_L$) bagi program linier kabur.
- Kondisi $t=1$ ($\lambda=0$) merupakan kondisi optimasi program linier dengan toleransi interval atau dengan kata lain program linier yang fungsi batasannya dilenturkan (*latitude*) dan dijadikan sebagai batas atas ($Z_{Upper} = Z_U$) bagi PLK.

dimana :

- λ = derajat kepuasan/derajat keanggotaan himpunan fuzzy
- t = interval bergerak dari 0 ke 1
- 3. Hitung nilai koefisien kendala (P_o), yaitu hasil pengurangan dari Z pada saat $t=1$ dengan Z pada saat $t=0$.
 $P_o = Z_U - Z_L$
- 4. Gambar fungsi keanggotaan tiap – tiap persamaan yang digunakan oleh Model Program Linier Kabur.
- 5. Membuat persamaan baru berdasarkan poin 4 dengan mencari nilai λ -cut dapat dihitung sebagai $\lambda = 1 - t$.
- 6. Menyelesaikan persamaan untuk memperoleh nilai λ dan Z.
- 7. Memasukan nilai Z ke dalam optimasi untuk memperoleh energi perbulan.

Contoh hasil perhitungan optimasi waduk Sutami-Lahor Tahun 2002/2003 sebagai berikut :

Tabel 1. Optimasi Dengan Program Linier Tahun 2002/2003

Kendala									Hasil Optimasi			
m ³ /det	10 ⁶ m ³	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m	m		m ³ /det	10 ⁶ m ³	10 ⁶ Kwh	
Qmax	S Max	Q min	Smin	Qbutuh	Sbutuh	El.Max	El.Min	Eff.	Orerata	Out Opt	E. Opt	
117	304	25	63	56	671	273	260	1	65	2033	385.65	
$S_n = S_{n-1} + I_n - O_n$			$SO = S_n - S_{max}$				Grav.	10				Batas
	I	S _n	I - O	SO			TWL	179	HL	3	Bawah	
	m ³ /det	m ³ /det	m ³ /det	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m	m ³ /det	m	m ³ /det	10 ⁶ Kwh	10 ⁶ Kwh	
Bulan	Inflow	Sn	ΔS	SO	S. Wdk	Elev.	Qbutuh	H	O Opt	H. Opt	E. Opt	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	
Okt		25										
Nop	48	25	0	0	65	263.54	66	82	48	82	22	
Des	77	77	52	0	199	263.54	86	82	25	82	11	
Jan	97	117	40	0	304	266.84	77	85	57	85	27	
Peb	109	117	0	0	304	271.03	72	89	109	89	54	
Mar	103	117	0	0	304	272.12	71	90	103	90	52	
Apr	73	73	-44	0	190	272.50	74	91	117	91	59	
Mei	66	25	-48	0	65	272.50	71	91	114	91	58	
Jun	51	25	0	0	65	272.03	71	90	51	90	26	
Jul	44	25	0	0	65	270.73	57	89	44	89	22	
Agt	38	25	0	0	65	268.99	49	87	38	87	19	
Sept	37	25	0	0	65	266.83	45	85	37	85	17	
Okt	42	25	0	0	65	263.54	53	82	42	82	19	
Jlh	784		0	0			792		784	1042	385.65	
Rerata	65						66	87	65	87	32	

Sumber : Perhitungan

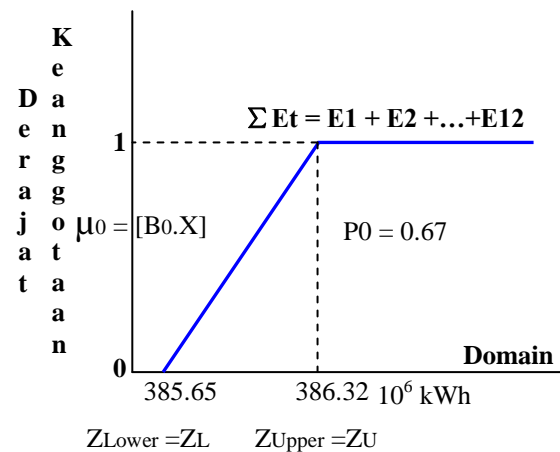
Tabel 2. Optimasi Lanjutan Batas Atas Tahun 2002/2003

Kendala									Hasil Optimasi			
m ³ /det	10 ⁶ m ³	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m	m		m ³ /det	10 ⁶ m ³	10 ⁶ Kwh	
Qmax	S Max	Q min	Smin	Qbutuh	Sbutuh	El.Max	El.Min	Eff.	Orerata	Out Opt	E. Opt	
138.27	358.40	25.00	62.64	56.00	671.00	273	260	1	65	2033	386.32	
$S_n = S_{n-1} + I_n - O_n$			$SO = S_n - S_{max}$				Grav.	10				Batas
	I	S _n	I - O	SO			TWL	179	HL	3	Atas	
	m ³ /det	m ³ /det	m ³ /det	m ³ /det	10 ⁶ m ³	m	m ³ /det	m	m ³ /det	10 ⁶ Kwh	10 ⁶ Kwh	
Bulan	Inflow	Sn	ΔS	SO	S. Wdk	Elev.	Qbutuh	H	O Opt	H. Opt	E. Opt	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	
Okt		25										
Nop	48	25	0	0	65	263.54	66	82	48	82	22	
Des	77	77	52	0	199	263.54	86	82	25	82	11	
Jan	97	138	62	0	358	266.84	77	85	36	85	17	
Peb	109	138	0	0	358	271.03	72	89	109	89	54	
Mar	103	138	0	0	358	272.12	71	90	103	90	52	
Apr	73	73	-65	0	190	272.50	74	91	138	91	70	
Mei	66	25	-48	0	65	272.50	71	91	114	91	58	
Jun	51	25	0	0	65	272.03	71	90	51	90	26	
Jul	44	25	0	0	65	270.73	57	89	44	89	22	
Agt	38	25	0	0	65	268.99	49	87	38	87	19	
Sept	37	25	0	0	65	266.83	45	85	37	85	17	
Okt	42	25	0	0	65	263.54	53	82	42	82	19	
Jlh	784		0.00	0.00			792		784	1042	386.32	
Rerata	2033						2052		2033			

Sumber : Perhitungan

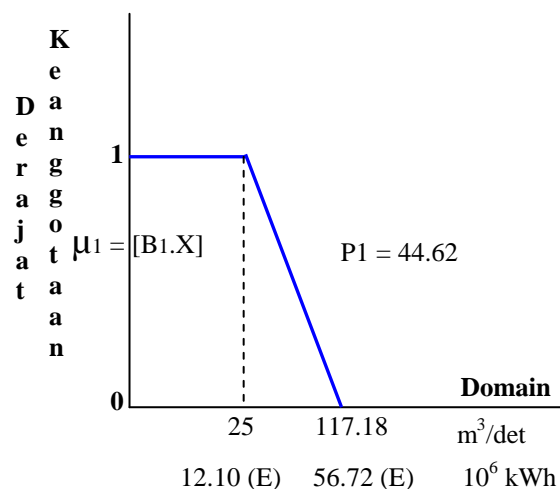
Hasil optimasi dengan menggunakan program linier menghasilkan energi listrik sebesar 385.65 Gwh pertahun merupakan batas bawah. Batas bawah merupakan program linier karena tunduk pada aturan program linier. Optimasi lanjutan menghasilkan energi listrik sebesar 386.32 Gwh pertahun merupakan batas atas. Batas atas diasumsi bukan program linier karena melanggar aturan atau dilenturkan (*latitude*) batasannya dari aturan program linier tersebut.

Dari hasil optimasi program linier batas bawah dimana $t=0$ ($\lambda = 1$), dan lanjutan optimasi batas atas dimana $t=1$ ($\lambda = 0$) maka digambarkan fungsi-fungsi keanggotaan dari persamaan program linier kabur (plk) seperti gambar 10 sampai dengan gambar 12 dibawah ini.



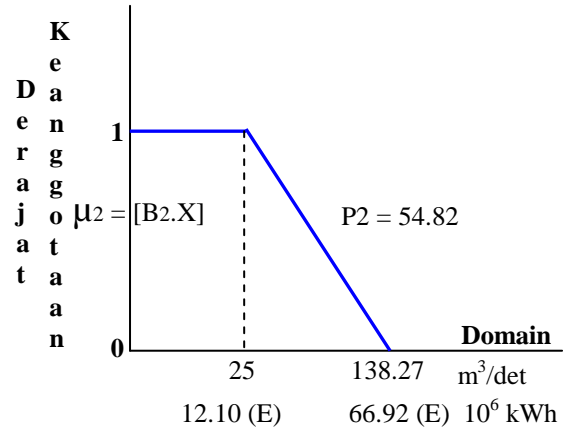
Gambar 10. Fungsi Tujuan PLK

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 11. Fungsi Batasan Bawah

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 12. Fungsi Batasan Atas

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari gambar 11 dan gambar 12 dapat dilihat bahwa, semakin besar nilai domain, akan memiliki nilai derajat keanggotaan yang cenderung semakin kecil. Sehingga untuk mencari nilai λ cut dapat dihitung sebagai $\lambda = 1 - t$, dengan :

$$b_i + p_i = \text{ruas kanan batasan ke } - i$$

Dengan demikian akan diperoleh bentuk persamaan linier baru atau persamaan linier kabur sebagai berikut (Kusumadewi, 2002: 222).

Maksimumkan : λ

dengan batasan :

$$-\lambda (Z_U - Z_L) - c.x \leq - Z_L$$

$$-\lambda p_i + \sum a_{ij}.X_j \leq b_i + p_i \quad (i \in N_m)$$

$$-\lambda, X_j \geq 0$$

Perumusan :

$$\# \lambda (386.32 - 385.65) - \sum E_t \leq - 385.65$$

$$\# \lambda (56.72 - 12.10) + E \leq 56.72$$

$$\# \lambda (66.92 - 12.10) + E \leq 66.92$$

$$\# \lambda, E \geq 0$$

Disederhanakan :

$$\# 0.67 \lambda - 12E \leq - 385.65$$

$$\# 44.62 \lambda + E \leq 56.72$$

$$\# 54.82 \lambda + E \leq 66.92$$

$$\# \lambda, E \geq 0$$

Kalikan -1 pers. (1) agar nilainya positif

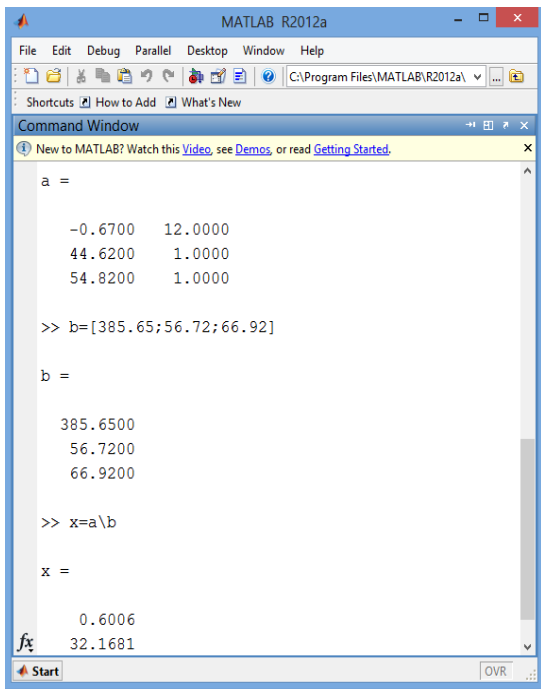
$$\# -0.67 \lambda + 12E = 385.65$$

$$\# 44.62 \lambda + E = 56.72$$

$$\# 54.82 \lambda + E = 66.92$$

$$\# \lambda, E \geq 0$$

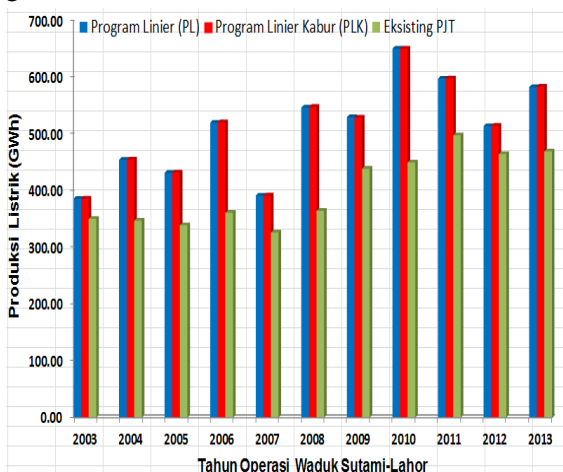
Persamaan – persamaan diatas diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak Matrix Laboratory (Matlab) R2012a yang merupakan *software* yang berbasiskan fungsi – fungsi matriks berikut ini.



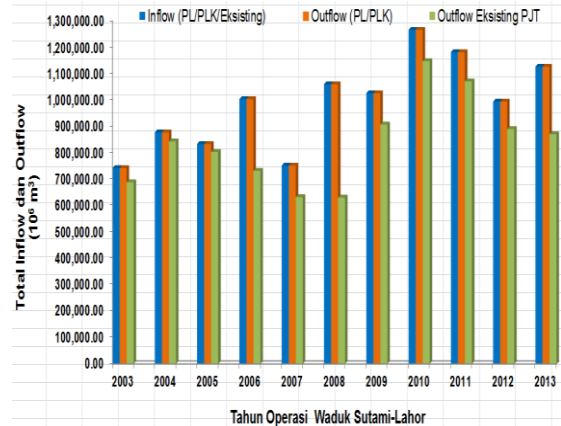
Gambar 13. Optimasi Matlab R2012a
 Sumber : Implementasi program

Hasil dari penyelesaian Matlab adalah nilai λ (derajat kepuasan) sebesar **0.6006** dan Z sebesar **32.1681 GWh** (rerata energi perbulan program linier kabur). Nilai Z dikalikan 12 bulan diperoleh total energi setahun optimasi program linier kabur sebesar **386.02 GWh**. Untuk mendapatkan energi realistis tiap – tiap bulan, total nilai Z setahun dimasukan sebagai nilai *constraint* di optimasi solver.

Hasil rekapitulasi optimasi selama 11 tahun dibandingkan eksisting disajikan dalam gambar 14 dan 15 berikut ini :



Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 15. Perbandingan Produksi Rilis
 Sumber : Hasil Perhitungan

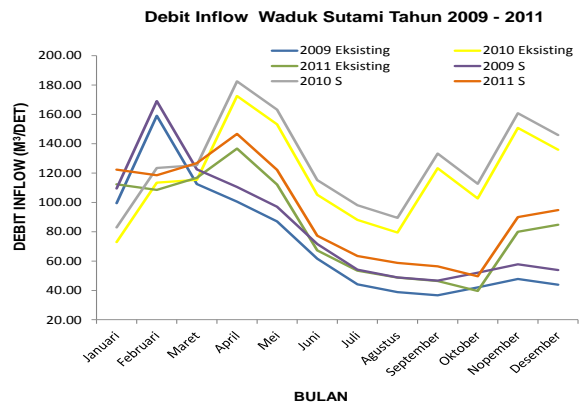
Dari hasil optimasi diperoleh total produksi energi listrik dan rilis model program linier kabur lebih baik dari eksisting.

3. Simulasi Pola Operasi Waduk

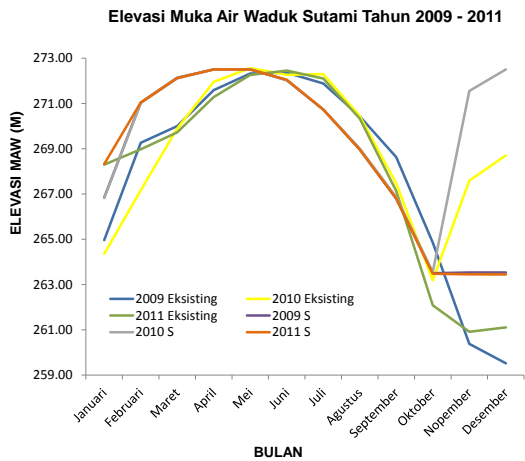
Simulasi dilakukan berdasarkan *Rule Curve* hasil optimasi Model Ris, dicoba-coba lepasan yang maksimal dengan memperhatikan pola yang dipergunakan. Simulasi menggunakan data yang lengkap yaitu tahun 2009 s/d 2011.

Dilakukan perbandingan antara pola operasi eksisting dengan pola operasi studi berupa grafik yaitu :

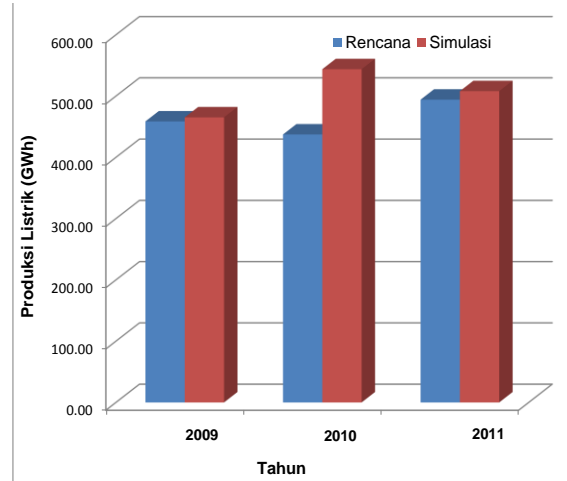
1. Perbandingan debit inflow
2. Perbandingan elevasi muka air
3. Perbandingan volume tampungan
4. Perbandingan debit outflow
5. Perbandingan hasil operasi waduk dengan pola operasi rencana



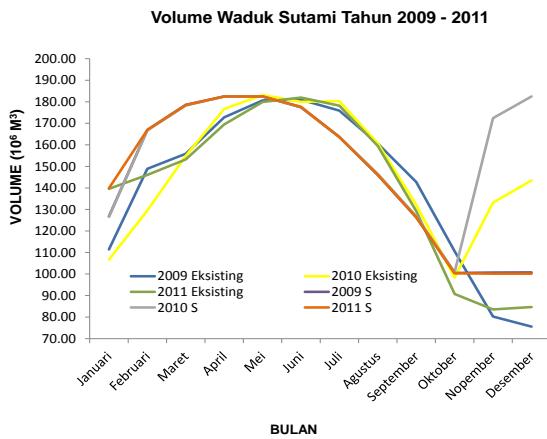
Gambar 16. Perbandingan Debit Inflow
 Sumber : Hasil Perhitungan



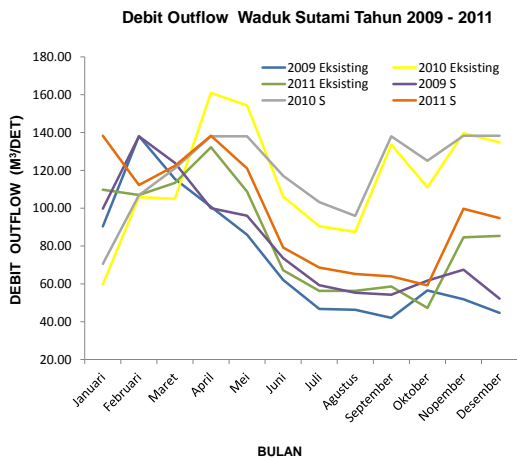
Gambar 17. Perbandingan Elevasi MAW
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 20. Perbandingan Hasil Operasi Waduk dengan Pola Operasi Rencana
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 18. Perbandingan Volume Waduk
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 19. Perbandingan Debit Outflow
Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 3. Batas Atas Rule Curve Baru

No	Bulan	Elevasi (m)	Volume (juta m ³)
1	Januari	266.84	126.72
2	Pebruari	271.03	166.85
3	Maret	272.12	178.45
4	April	272.50	182.49
5	Mei	272.50	182.49
6	Juni	272.03	177.49
7	Juli	270.73	163.66
8	Agustus	268.99	146.22
9	September	266.83	126.64
10	Oktober	263.54	100.80
11	Nopember	263.54	100.80
12	Desember	263.54	100.80

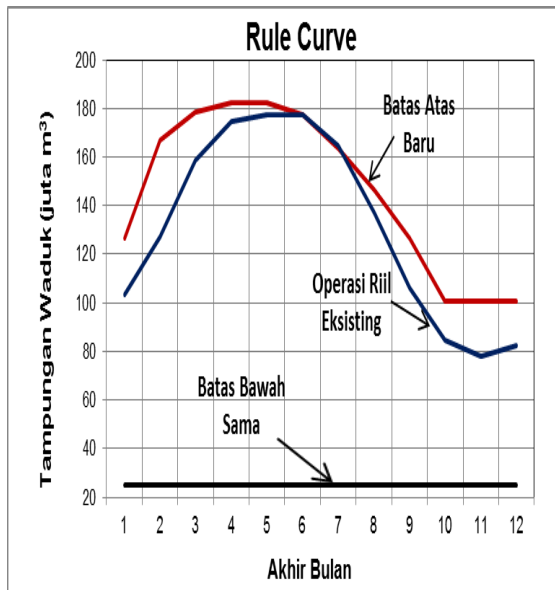
Sumber : Perhitungan

Tabel 4. Batas Bawah Rule Curve

No	Bulan	Elevasi (m)	Volume (juta m ³)
1	Januari	246.00	25.18
2	Pebruari	246.00	25.18
3	Maret	246.00	25.18
4	April	246.00	25.18
5	Mei	246.00	25.18
6	Juni	246.00	25.18
7	Juli	246.00	25.18
8	Agustus	246.00	25.20
9	September	246.00	25.18
10	Oktober	246.00	25.28
11	Nopember	246.00	25.18

12	Desember	246.00	25.18
----	----------	--------	-------

Sumber : Perhitungan



Gambar 21. Perbandingan Rule Curve Baru dan Eksisting

Sumber : Hasil Perhitungan

D. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Total produksi energi maksimal hasil optimasi Program Linier Kabur adalah 5,606.66 juta kwh atau naik 27.19 % dari produksi eksisting sebesar 4,407.95 juta kwh dan lebih tinggi 0.09% dari produksi program linier sebesar 5,601.59 juta kwh.
2. Program linier kabur mempunyai total lepasan yang sama dengan program linier berarti lebih efisien karena menghasilkan energi yang lebih besar. Efisiensi PLK 1936.94 m³/kwh, PL 1938.69 m³/kwh dan Eksisting 2090.13 m³/kwh
3. Hasil simulasi selama 3 tahun menggunakan *rule curve* baru memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan kondisi eksisting karena menghasilkan energi yang lebih besar yaitu 1,517.14 juta kwh atau naik 9.14 % dari produksi eksisting sebesar 1,390.09 juta kwh dengan keandalan yang sama yaitu 100%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kurva pengatur tinggi muka air yang baru dapat digunakan.

2. Saran

1. Program Linier Kabur (PLK) yang digunakan merupakan gabungan Program Linier dengan Logika Kabur (*Fuzzy Logic*) khusus menangani kekaburan (*fuzzy*) pada sumber daya dengan tujuan tertentu (*crisp*) atau sisi sebelah kanan persamaan (*Right Hand Side/RHS*) dengan hasil yang cukup memuaskan. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk variasi – variasi program linier kabur seperti : sumberdaya kabur dan fungsi tujuan kabur, koefisien sumber daya kabur, koefisien fungsi tujuan kabur maupun kombinasi keempatnya.
2. Model Program Linier Kabur dapat diterapkan untuk Pola Operasi Waduk. Namun pengguna harus memahami program linier dan logika kabur sehingga kurang praktis dibandingkan model-model tunggal.
3. Pola Operasi Waduk yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I dapat ditingkatkan lagi. Peningkatan berupa, meningkatkan keakuratan peramalan data, perlunya penggunaan teknik pemodelan yang secara eksplisit mampu merepresentasikan keadaan pengoperasian sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Haryadi, 2000. Studi Analisa Penerapan Logika Fuzzy (*fuzzy logic*) Dalam Perencanaan Pola Operasi Waduk Sutami. Skripsi Tidak Dipublikasikan. Malang : Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Kusumadewi, Sri. 2002. Analisa dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab. Yogyakarta : Graha Ilmu.
3. Loucks, D.P., and Beek, E.V. 2005. *Water Resources Systems Planning and Management*. Turin : Ages Arti Grafiche.
4. Mays, L.W. 1996. *Water Resources Handbook*. USA : McGraw-Hill, Inc.
5. Rispiningtati. 2010. Optimasi Energi PLTA dengan Pengaturan Waduk. Makalah pada Seminar Nasional Program Magister dan Doktor Fakultas Teknik UB (SN-PMD FTUB) Ke-1. Malang : Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

6. Sen, Z. 2010. *Fuzzy Logic and Hydrological Modeling*. USA : Taylor and Francis Group, LLC.
7. Soetopo, W. 1984. Pengaruh Sedimentasi Waduk Karangates Terhadap Produksi Listriknya. Skripsi Tidak Dipublikasikan. Malang : Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Soewarno. 1995. Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk analisa Data Jilid 1 dan 2, Bandung : NOVA.
9. <http://www.SciRP.org/journal/jwarp>, Tanggal 4 Desember 2013, Pukul 20.15
- 10 http://www.youtube.com/watch?.featur=player_detailpage&v=-Zuf3uk6-UI Tanggal 8 Juni 2014, Pukul 20.00