

**STUDI PENENTUAN BATAS PENGOPERASIAN PLTA SUTAMI  
UNTUK OPERASIONAL YANG NOMINAL**

**PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI  
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**



**Disusun Oleh:  
RIZKI ASHADI  
NIM. 115060300111040**

**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2016**



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Jalan MT Haryono 167 Telp & Fax. 0341 554166 Malang 65145

**KODE  
PJ-01**

**PENGESAHAN  
PUBLIKASI HASIL PENELITIAN SKRIPSI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**NAMA : RIZKI ASHADI**  
**NIM : 115060300111040**  
**PROGRAM STUDI : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**  
**JUDUL SKRIPSI : STUDI PENENTUAN BATAS PENGOPERASIAN PLTA  
SUTAMI UNTUK OPERASIONAL YANG NOMINAL**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Ir. Teguh Utomo, M.T.**  
**NIP. 19650913 199103 1 003**

**Ir. Hery Purnomo, M.T.**  
**NIP. 19550708 198212 1 001**



# STUDI PENENTUAN BATAS PENGOPERASIAN PLTA SUTAMI UNTUK OPERASIONAL YANG NOMINAL

Rizki Ashadi<sup>1</sup>, Ir. Teguh Utomo, M.T.<sup>2</sup>, Ir. Hery Purnomo, M.T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, <sup>2,3</sup>Dosen Teknik Elektro Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: ashadirizki@gmail.com

## Abstrak

PLTA Sutami sebagai fungsi utama dari pembangunan bendungan Sutami dan merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan potensi waduk Sutami. Namun, adanya debit sedimen yang berasal dari sungai Metro pada tahun 2010 sebesar 5,6 kg/dt dan pada tahun 2011 sebesar 1,97 kg/dt dapat mempengaruhi kapasitas tampungan waduk. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan dan analisis menggunakan pola operasi waduk selama 5 tahun, yaitu dari Desember 2010 hingga Nopember 2015 dengan periode bulanan tiap tahunnya. Dari perhitungan ini didapatkan grafik pola operasi waduk Sutami, debit maksimum dan debit minimum sebagai batasan pengoperasian PLTA Sutami, serta energi yang dihasilkan PLTA Sutami tiap tahunnya. Hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa pola operasi waduk menunjukkan waduk Sutami masih dapat memenuhi kebutuhan pembangkitan dan irigasi, volume waduk cenderung stabil dan mengalami penurunan setiap akhir tahun karena pada saat akhir musim kemarau debit yang masuk ke waduk dan volume pada waduk semakin berkurang dikarenakan kebutuhan pembangkitan dan irigasi dipenuhi secara bersamaan. Debit maksimum yang dibutuhkan untuk pembangkitan sebesar 135,65 m<sup>3</sup>/det. Debit minimum yang dibutuhkan untuk pembangkitan sebesar 13,81 m<sup>3</sup>/det. Produksi energi listrik PLTA Sutami rata-rata per tahun mencapai 499.393,96 MWh atau sama dengan 499,39 GWh.

**Kata Kunci:** pola operasi waduk, debit, energi

## Abstract

*The Sutami hydropower is main function from the construction of the Sutami dam and this power plant utilizing potential Sutami reservoirs. However, the presence of sediment discharge originating from the rivers of the Metro in 2010 amounted to 5,6 kg/s and in 2011 of 1,97 kg/s can affect the capacity of the catchment reservoirs. In this research, calculations and analysis using the pattern of reservoir operation for 5 years, from December 2010 to November 2015 with monthly periods each year. From this calculation obtained chart patterns Sutami reservoir operation, maximum flow and minimum flow as operational limits Sutami hydropower, and Sutami hydropower energy produced each year. The results of research that has been done it was concluded that pattern of operation of reservoirs shows Sutami reservoirs can still meet the needs of power generation and irrigation, volume of the reservoirs tend to be stable and experienced decrease the end of each year because at the time of the end of the dry season discharge into reservoirs and reservoir volume on the wane because of the needs of power generation and irrigation are filled simultaneously. Maximum discharge required for the generation of 135,65 m<sup>3</sup>/s. Minimum flow required for the generation of 13,81 m<sup>3</sup>/s. Hydroelectric power energy production Sutami on average per year to reach 499.393,96 MWh or equal to 499,39.*

**Keywords:** reservoir operation pattern, discharge, energy

## I. PENDAHULUAN

Waduk Sutami merupakan salah satu waduk besar yang berada pada Provinsi Jawa Timur. Lokasi waduk ini terletak di Desa Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang. Lokasi waduk berada pada Sungai Brantas, ±14 km di hilir waduk Sengguruh dan ±35 km disebelah selatan kota Malang. Waduk Sutami dilaksanakan mulai tahun 1961 sampai tahun 1972. Pembangunannya dilaksanakan oleh proyek induk pengembangan wilayah sungai Brantas dengan nama proyek Serbaguna Karangates. Adapun fungsi dan tujuan pembangunan Karangates adalah:

1. Unit pembangkit tenaga listrik, yaitu dengan memanfaatkan air sungai yang dijadikan tegangan listrik melalui *intake* dan pipa pesat untuk

menggerakkan turbin, sehingga dapat menghasilkan tenaga listrik melalui generator.

2. Untuk pengendalian banjir.

3. Untuk keperluan irigasi, yaitu dengan cara membendung sungai pada musim hujan dan mengalokasikan kebutuhan air hilir sungai pada musim kemarau, sehingga pengolahan tanah dapat dikerjakan dengan baik sepanjang tahun.

4. Sebagai tempat wisata dan perikanan.

Dengan fungsi utama waduk Karangates atau Sutami adalah sebagai unit pembangkit tenaga listrik, PLTA Sutami dibawah pengelola PT. Pembangkitan Jawa Bali (PT. PJB) Unit Pembangkitan Brantas dengan kapasitas 3x35 MW yang ditransmisikan ke SUTT 154 kV merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan

potensi waduk Sutami, serta untuk mengatur debit air yang keluar dari waduk Sutami agar dapat memenuhi fungsi waduk lainnya.

Menurut hasil penelitian Fidari (2013) pada waduk Sutami, didapatkan bahwa sumber sedimen terbesar berasal dari sungai Metro dengan debit sedimen pada tahun 2010 sebesar 5,6 kg/dt dan pada tahun 2011 sebesar 1,97 kg/dt. Elevasi yang digunakan sebagai acuan adalah elevasi intake PLTA (233.3 m), elevasi irigasi, dan elevasi turbin (246 m). Pada pendekatan volume diperoleh bahwa sedimen yang masuk ke dalam waduk Sutami menyebabkan perubahan volume pada elevasi kontrol. Pada elevasi 233,3 m dengan volume 3,42 juta m<sup>3</sup>. Pada elevasi 246 m dengan volume 23,18 juta m<sup>3</sup>.

Apabila kenaikan elevasi sedimen mencapai titik 233,3 m, PLTA akan mendapat gangguan dengan adanya sedimen yang turut terbawa masuk ke dalam pipa pesat PLTA. Jika ditinjau dari aspek perubahan volume terhadap elevasi intake PLTA, waduk Sutami masih dikategorikan layak namun dalam kondisi yang kritis. Kapasitas tampungan waduk Sutami akan terus mengalami penurunan dan penyusutan dari tahun ke tahun sehingga produksi energi listrik yang dihasilkan PLTA Sutami juga akan mengalami penurunan.

Dengan memperhatikan beberapa hal di atas, perlu adanya kajian terhadap operasional waduk Sutami untuk pengoperasian PLTA sehingga mendapatkan batasan-batasan pengoperasian PLTA untuk operasional yang nominal.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Prinsip Pembangkitan Listrik Tenaga Air

Pembangkitan tenaga air adalah suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator. Daya yang dihasilkan secara teoritis dapat dihitung berdasarkan rumus berikut: [1]

$$P = 9,8 \times Q \times H \quad (1)$$

dengan:

P : daya yang dikeluarkan secara teoritis (kW)

Q : debit air (m<sup>3</sup>/det)

H : tinggi jatuh air efektif (m)

Daya yang keluar dari generator dapat diperoleh dari perkalian efisiensi turbin dan generator dengan daya yang keluar secara teoritis. Daya yang dihasilkan turbin adalah: [1]

$$P_T = 9,81 \times \eta_T \times Q \times H \quad (2)$$

Sedangkan daya yang dihasilkan generator adalah:

$$P_G = 9,81 \times \eta_T \times \eta_G \times Q \times H \quad (3)$$

dengan:

P<sub>T</sub> : daya yang dihasilkan turbin (kW)

P<sub>G</sub> : daya yang dihasilkan generator (kW)

η<sub>T</sub> : efisiensi turbin

η<sub>G</sub> : efisiensi generator

Q : debit air (m<sup>3</sup>/det)

H : tinggi jatuh bersih (m)

Daya yang dihasilkan generator merupakan daya keluaran atau daya yang dihasilkan oleh PLTA. Dari persamaan (3) diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$P_G = 9,81 \times \eta_T \times \eta_G \times Q \times H$$

atau

$$P_G = 9,81 \times \eta \times Q \times H \quad (4)$$

dengan η adalah efisiensi keseluruhan dari pembangkitan.

### 1. Efisiensi Generator

Berdasarkan diagram aliran daya pada Gambar 1, didapatkan efisiensi generator dengan persamaan sebagai berikut: [2]

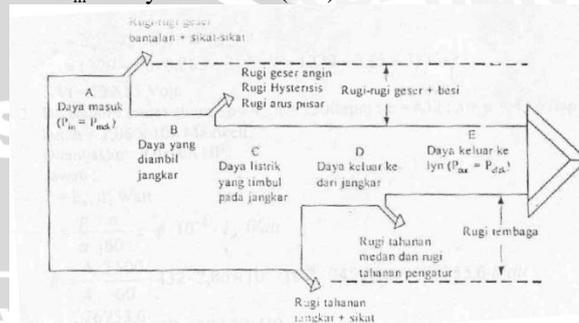
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5)$$

dengan:

η : efisiensi

P<sub>out</sub> : daya keluaran (kW)

P<sub>in</sub> : daya masukan (kW)



Gambar 1. Diagram Aliran Daya  
Sumber: Soemarwanto (2010:102)

### B. Energi

Energi yang dihasilkan berupa produksi energi tahunan. Energi dapat dihitung dengan persamaan berikut: [3]

$$E = 9,8 \times \eta \times Q \times H \times t \times n \quad (6)$$

atau dapat ditulis,

$$E = P \times t \times n \quad (7)$$

dengan:

E : energi tiap satu periode (kWh)

P : daya pembangkitan (kW)

t : waktu operasi (jam)

n : jumlah hari dalam satu periode

### C. Aliran Sungai (Debit)

Yang dimaksud dengan aliran sungai atau debit adalah jumlah air yang mengalir melalui suatu penampang sungai tertentu per satuan waktu. Pengukuran debit sungai sangat penting untuk dapat menentukan tenaga yang dihasilkan oleh pusat listrik tenaga air. Pengetahuan tentang debit pada waktu banjir mutlak diperlukan untuk keamanan dalam perencanaan dan pembangunan PLTA.

Untuk PLTA jenis waduk, waduknya digunakan untuk menyimpan dan melepaskan simpanan air sepanjang tahun, guna memenuhi kebutuhan pada waktu beban puncak. Debit air maksimum ditentukan oleh jumlah air yang dapat diatur selama beban puncak dalam musim kemarau. Hal ini dapat dihitung dari kondisi beban dalam musim kemarau, jumlah air yang tersimpan dalam waduk untuk persediaan pada hari-hari kering dan debit alamiah dari sungai pada waktu musim kemarau.



#### D. Tinggi Jatuh Efektif

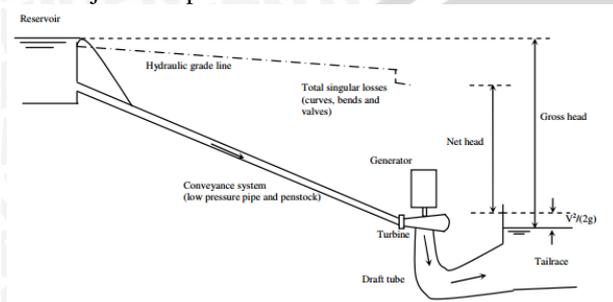
Tinggi jatuh efektif adalah selisih antara elevasi muka air pada bangunan pengambilan atau waduk (EMAW) dengan *Tail Water Level* (TWL) dikurangi dengan total kehilangan tinggi tekan. Persamaan tinggi jatuh efektif adalah: [4]

$$H_{eff} = EMAW - TWL - h_l \quad (8)$$

dengan:

- $H_{eff}$  : tinggi jatuh efektif (m)
- EMAW : elevasi muka air waduk atau hulu bangunan pengambilan (m)
- TWL : *Tail Water Level* (m)
- $h_l$  : total kehilangan tinggi tekan (m)

Hubungan antara tinggi jatuh efektif dengan elevasi muka air waduk, *Tail Water Level*, dan kehilangan tinggi tekan dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sketsa Tinggi Jatuh Efektif  
Sumber: Ramos (2000:61)

Kehilangan tinggi tekan digolongkan menjadi 2 jenis, yaitu kehilangan pada saluran terbuka dan kehilangan pada saluran tertutup.

Kehilangan tinggi tekan pada saluran terbuka biasanya terjadi pada *intake* pengambilan, saluran transisi, dan penyaring. Kehilangan tinggi pada saluran tertutup dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu kehilangan tinggi karena gesekan dan kehilangan tinggi tunggal. [5]

Kehilangan tinggi tunggal dapat dihitung dengan persamaan berikut: [4]

$$h_l = \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

dengan:

- $h_l$  : kehilangan tinggi tekan (m)
- $v$  : kecepatan air masuk (m/det)
- $g$  : percepatan gravitasi (m/det<sup>2</sup>)

#### E. Waduk

Waduk menghimpun air waktu musim hujan atau selama jam beban kurang untuk persediaan dan pemakaian pada musim kemarau atau waktu beban puncak.

##### 1. Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk merupakan suatu kurva yang menggambarkan hubungan antara luas muka air, volume waduk, dengan elevasi muka air waduk. Dari lengkung kapasitas waduk ini akan diketahui berapa besarnya volume tampungan pada elevasi tertentu, sehingga dapat ditentukan besarnya volume pada elevasi tertentu.

#### 2. Pola Operasi Waduk

Pola pengoperasian suatu waduk dimaksudkan sebagai pedoman pengaturan air untuk memenuhi berbagai kebutuhan air dan pengendali banjir. Bertujuan untuk memanfaatkan air secara optimal dengan cara mengalokasikan secara proporsional sedemikian rupa sehingga tidak terjadi konflik antar kepentingan.

Dalam satu tahun dibuat 2 (dua) jenis pola operasi waduk yaitu:

1. Pola operasi waduk musim hujan, berlaku saat pengisian waduk (Desember sampai dengan Mei).
2. Pola operasi waduk musim kemarau, berlaku saat pengosongan waduk (Juni sampai November).

Tergantung dari kebutuhannya, maka lingkup waktu dari simulasi mencakup 1 tahun operasi atau lebih. Satu operasi dibagi menjadi sejumlah periode, misalnya bulanan, 15 harian, 10 harian, mingguan maupun harian. Persamaan umum simulasi operasi waduk adalah persamaan keseimbangan waduk sebagai berikut: [7]

$$S_{t+1} = S_t + I - O \quad (10)$$

dengan:

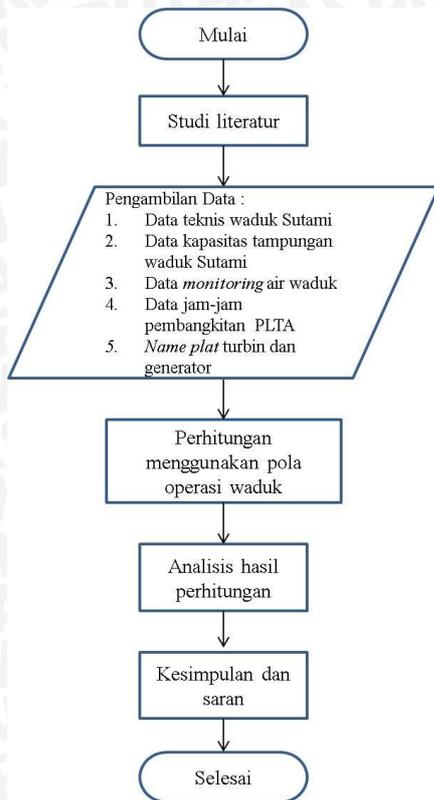
- $S_{t+1}$  : Tampungan pada akhir periode t (juta m<sup>3</sup>)
- $S_t$  : Tampungan pada awal periode t (juta m<sup>3</sup>)
- $I_t$  : Volume *inflow* ke waduk selama periode t (juta m<sup>3</sup>)
- $O_t$  : Volume *outflow* dari waduk selama periode t (juta m<sup>3</sup>)

Operasi waduk yang diterapkan adalah operasi waduk pada PLTA yang dioperasikan untuk keadaan sebagai berikut:

1. Operasi beban dasar, dengan lama waktu operasi standart 19 jam dalam satu hari, mulai jam 22.00 – 17.00.
2. Operasi beban puncak, dengan lama waktu operasi standart 5 jam dalam satu hari, mulai dari 17.00 – 22.00.

### III. METODE PENELITIAN

Pola berpikir dari metode penelitian yang digunakan dalam studi penentuan batas pengoperasian PLTA ini digambarkan pada Gambar 3.

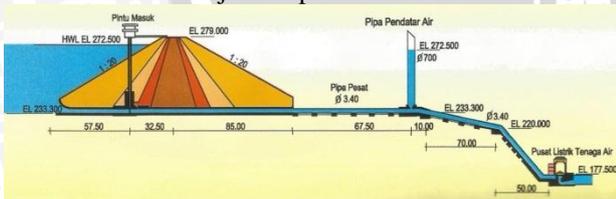


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

#### IV. PERHITUNGAN DAN ANALISIS

##### A. Waduk Sutami

Waduk Sutami merupakan waduk multiguna yang digunakan untuk pengendalian banjir, unit pembangkit tenaga listrik, irigasi, kebutuhan air baku, serta sebagai tempat wisata dan perikanan. Dengan fungsi utama yaitu untuk pembangkit listrik tenaga air, maka *outflow* waduk Sutami digunakan untuk menggerakkan turbin melalui pipa pesat. Air buangan dari turbin ini ditampung di *tailrace* terlebih dahulu yang kemudian dialirkan ke sungai menuju ke hilir. Skema potongan memanjang waduk Sutami ditunjukkan pada Gambar 4..



Gambar 4. Potongan Memanjang Waduk Sutami  
Sumber: PJT 1

Data teknis waduk Sutami sebagai berikut:

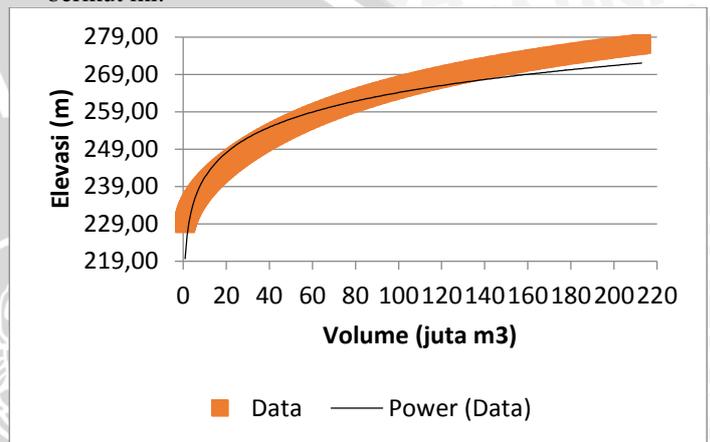
1. Daerah aliran sungai : 2.050 km<sup>2</sup>
2. Daerah terendam : 15 km<sup>2</sup>
3. Elevasi muka air tinggi : 272,50 m
4. Elevasi muka air rendah : 246,00 m (turbin)
5. Volume maksimum : 222,904 juta m<sup>3</sup>
6. Volume minimum : 16,175 juta m<sup>3</sup>
7. Volume efektif :  
volume maksimum – volume minimum  
= 222,904 – 16,175  
= 206,728 juta m<sup>3</sup>
8. Muka air banjir : 277,00 m
9. Debit masuk rata-rata : 55,20 m<sup>3</sup>/det

Pada sisi *tailrace* atau tampungan air buangan turbin memiliki beberapa elevasi sebagai berikut:

1. Elevasi muka air banjir : 187,00 m
2. Elevasi muka air minimum : 179,00 m
3. Tinggi elevasi 1 unit beroperasi : 181,90 m
4. Tinggi elevasi 2 unit beroperasi : 182,00 m
5. Tinggi elevasi 3 unit beroperasi : 182,90 m

##### B. Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk ini digunakan untuk mengetahui berapa besarnya volume tampungan waduk pada elevasi tertentu. Dengan menggunakan data volume waduk Sutami pada berbagai elevasi yang terdapat pada Lampiran 1, maka dapat dibuat kurva lengkung tampungan waduk yang ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Kurva Kapasitas Tampungan Waduk Sutami

Dari kurva pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa semakin tinggi volume tampungan waduk, semakin tinggi pula elevasi muka air waduk. Persamaan dari kurva di atas adalah:

$$y = 220,69x^{0,039}$$

$$R^2 = 0,9502$$

##### C. Unit Pembangkitan

###### 1. Efisiensi Pembangkitan

Dari data spesifikasi turbin, maka nilai efisiensi turbin berdasarkan persamaan (2) adalah sebagai berikut:

$$P_T = 9,8 \cdot \eta_T \cdot Q \cdot H$$

$$36000 = 9,8 \cdot \eta_T \cdot 53,578$$

$$\eta_T = 0,88$$

Berdasarkan persamaan (5) dan data spesifikasi generator dengan daya semu generator sebesar 39000 kVA, faktor daya sebesar 0,9 dan daya keluaran turbin yang merupakan daya masukan ( $P_T = P_{in}$ ) sebesar 36000 kW, maka didapatkan efisiensi generator sebagai berikut:

$$\eta_G = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\eta_G = \frac{39000 \times 0,9}{36000}$$

$$\eta_G = 0,975$$

Efisiensi pembangkitan didapatkan dari hasil perkalian antara efisiensi turbin ( $\eta_T$ ) dengan efisiensi generator ( $\eta_G$ ). Dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\eta = \eta_T \times \eta_G$$

$$\eta = 0,88 \times 0,975$$

$$\eta = 0,86$$

## 2. Penentuan Jumlah Unit

Setiap unit pembangkitan pada PLTA Sutami memiliki jam operasi yang berbeda. Jam operasi tersebut bergantung kepada kebutuhan energi listrik dan ketersediaan air pada waduk. Tabel 1 berikut menunjukkan jam operasi tiap unit pembangkitan PLTA Sutami 2010 hingga 2015.

Tabel 1. Jam – Jam Pembangkitan

Tahun	2010			2011			2012			2013			2014			2015				
	Bulan	I	II	III	I	II	III													
Januari				22	23	20	24	20	21	23	22	24	24	21	23	24	24	23		
Februari				24	21	20	22	24	24	20	22	24	24	21	24	24	22	22		
Maret				23	24	20	24	23	23	20	20	20	23	22	20	24	23	22		
April				23	24	22	22	20	20	22	23	21	20	20	24	24	23	23		
Mei				22	22	20	20	24	21	24	23	20	20	23	19	24	22	24		
Juni				24	23	18	24	17	19	24	20	5	24	23	24	23	24			
Juli				20	23	17	20	20	5	21	20	24	22	24	17	23	22	5		
Agustus				20	24	18	23	5	5	20	23	20	22	19	24	23	23			
September				19	24	18	24	24	5	0	24	19	21	20	5	24	22	5		
Oktober				5	23	24	24	24	5	22	24	5	24	5	5	24	24	0		
Nopember				20	20	22	22	20	5	23	22	18	24	20	19	24	24	5		
Desember	24	24	23	20	20	24	22	20	23	20	24	20	20	22	20	24	24	23		

Sumber : PLTA Sutami

Dari data jam-jam pembangkitan di atas dapat dianalisis jumlah unit yang beroperasi saat beban puncak dan beban dasar. Sesuai dengan fungsi utama pembangkit listrik tenaga air, yaitu membantu memenuhi kebutuhan energi listrik pada saat beban puncak selama 5 jam, maka tiga unit pada PLTA Sutami beroperasi selama 5 jam. Sedangkan saat beban dasar, jam pembangkitan tiap unit dikurangkan dengan jam operasi saat beban puncak (5 jam). Jika hasil pengurangan tersebut lebih besar dari 0 jam, maka unit tersebut beroperasi saat beban dasar. Untuk hasil analisis jumlah unit yang beroperasi saat beban puncak dan beban dasar ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jumlah Unit yang Beroperasi

No	Bulan	Beban Puncak					Beban Dasar						
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Januari		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
2	Februari		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
3	Maret		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
4	April		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
5	Mei		3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
6	Juni		3	3	3	3	3		3	3	3	2	3
7	Juli		3	3	3	3	3		3	2	3	3	2
8	Agustus		3	3	3	3	3		3	1	3	3	3
9	September		3	3	2	3	3		2	2	2	2	2
10	Oktober		3	3	3	3	2		2	2	2	1	2
11	Nopember		3	3	3	3	3		3	2	3	3	2
12	Desember	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

## D. Penentuan Head Loss

Dengan diameter pipa pesat sebesar 3,40 meter, maka didapatkan luas penampang sebagai berikut:

$$A = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2$$

$$A = \frac{1}{4} \times \pi \times 3,40^2$$

$$A = 9,08 \text{ m}^2$$

Dari data spesifikasi turbin diketahui bahwa debit rata-rata sebesar 53,5 m<sup>3</sup>/det dan luas penampang sebesar 9,08 m<sup>2</sup>, maka didapatkan kecepatan air masuk sebesar:

$$Q = v \times A$$

$$53,5 = v \times 9,08$$

$$v = \frac{53,5}{9,08}$$

$$v = 5,892 \text{ m/det}$$

Didapatkan nilai kecepatan air pada pipa pesat sebesar 5,892 m/det, maka dengan persamaan (9) nilai head loss atau kehilangan tinggi tekan adalah:

$$h_l = \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = \frac{5,892^2}{2 \times 9,8}$$

$$h_l = 1,77 \text{ m}$$

## E. Pola Operasi Waduk Sutami

Dalam pola operasi waduk untuk PLTA Sutami menggunakan dua keadaan beban, yaitu saat beban puncak dari pukul 17.00 hingga 22.00 dan saat beban dasar yaitu dari pukul 22.00 hingga 17.00. Perhitungan pola operasi waduk ini dilakukan selama 5 tahun dari tahun 2010 hingga 2015 dengan periode bulanan tiap satu tahun operasi. Satu tahun operasi terdiri dari pola operasi musim hujan yang dimulai dari bulan Desember hingga Mei dan pola operasi musim kemarau yang dimulai dari bulan Juni hingga Nopember.

Hasil perhitungan pola operasi waduk Sutami ditunjukkan pada Tabel 3 hingga Tabel 7.

Tabel 3. Pola Operasi Waduk Tahun 2010 – 2011

No.	Bulan	Jumlah Hari	Inflow		Debit Beban Puncak		Debit Beban Dasar		Outflow Total	Volume Efektif	Spillway	Volume Total	Elevasi	TWL		Net Head		Daya		Energi		Total Energi		
			m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit	m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit						m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	m	m	m	m	Puncak	Dasar		Puncak	Dasar
1	Desember	31	139,02	372,35	3	137,18	76,54	3	137,18	290,87	367,41	119,40	0,00	135,57	267,27	182,90	182,90	82,60	82,60	95,40	95,40	14786,84	56189,98	70976,82
2	Januari	31	115,44	309,19	3	112,89	62,99	3	112,89	239,38	302,37	126,22	0,00	142,40	267,78	182,90	182,90	83,11	83,11	79,00	79,00	12244,74	46530,00	58774,73
3	Februari	28	112,73	272,72	3	111,00	55,94	3	111,00	212,58	268,53	130,41	0,00	146,58	268,08	182,90	182,90	83,41	83,41	77,96	77,96	10913,83	41472,54	52386,36
4	Maret	31	119,72	320,66	3	116,13	64,80	3	116,13	246,24	311,04	140,03	0,00	156,21	268,75	182,90	182,90	84,08	84,08	82,21	82,21	12742,39	48421,08	61163,47
5	April	30	132,64	343,80	3	127,85	69,04	3	127,85	262,36	331,40	152,44	0,00	168,61	269,55	182,90	182,90	84,88	84,88	91,37	91,37	13706,04	52082,95	65788,99
6	Mei	31	113,59	304,24	3	110,14	61,46	3	110,14	233,54	295,00	161,67	0,00	177,85	270,11	182,90	182,90	85,44	85,44	79,24	79,24	12281,53	46669,83	58951,37
7	Juni	30	68,58	177,76	3	68,66	37,08	3	68,66	140,89	177,97	161,46	0,00	177,64	270,10	182,90	182,90	85,43	85,43	49,39	49,39	7408,23	28151,27	35559,49
8	Juli	31	54,51	146,00	3	57,30	31,98	3	57,30	121,51	153,48	153,98	0,00	170,15	269,65	182,90	182,90	84,98	84,98	41,00	41,00	6355,00	24149,01	30504,02
9	Agustus	31	49,84	133,49	3	57,50	32,08	3	57,50	121,91	154,00	133,47	0,00	149,64	268,30	182,90	182,90	83,63	83,63	40,48	40,48	6275,17	23845,66	30120,84
10	September	30	47,52	123,17	3	60,01	32,41	3	60,01	123,15	155,56	101,09	0,00	117,26	265,76	182,90	182,90	81,09	81,09	40,97	40,97	6146,16	23355,42	29501,59
11	Oktober	31	40,10	107,40	3	48,18	26,88	2	32,12	68,10	94,98	113,51	0,00	129,68	266,80	182,90	182,00	82,13	83,03	33,32	22,45	5163,94	13225,33	18389,28
12	Nopember	30	83,18	215,60	3	86,87	46,91	3	86,87	178,26	225,17	103,94	0,00	120,11	266,01	182,90	182,90	81,34	81,34	59,49	59,49	8924,13	33911,69	42835,82
	Jumlah		1076,87	2826,39		1093,71	598,12		1077,65	2238,79	2836,91	1597,60	0,00	1791,71						769,83	758,97	116948,00	438004,76	554952,77
	Rata-rata		89,74	235,53		91,14	49,84		89,80	186,57	236,41	133,13	0,00	149,31	268,18	182,90	182,83	83,51	83,58	64,15	63,25	9745,67	36500,40	46246,06
	Maks		139,02	372,35		137,18	76,54		137,18	290,87	367,41	161,67	0,00	177,85	270,11	182,90	182,90	85,44	85,44	95,40	95,40	14786,84	56189,98	70976,82
	Min		40,10	107,40		48,18	26,88		32,12	68,10	94,98	101,09	0,00	117,26	265,76	182,90	182,00	81,09	81,09	33,32	22,45	5163,94	13225,33	18389,28

Tabel 4. Pola Operasi Waduk Tahun 2011 – 2012

No.	Bulan	Jumlah Hari	Inflow		Debit Beban Puncak		Debit Beban Dasar		Outflow Total	Volume Efektif	Spillway	Volume Total	Elevasi	TWL		Net Head		Daya		Energi		Total Energi			
			m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit	m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit						m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	m	Puncak	Dasar	Puncak		Dasar	Puncak	Dasar
1	Desember	31	90,88	243,41	3	88,15	49,19	3	88,15	186,90	236,09	111,26	0,00	127,44	266,62	182,90	182,90	81,95	81,95	60,82	60,82	9427,56	35824,73	45252,29	
2	Januari	31	124,01	332,16	3	120,82	67,42	3	120,82	256,18	323,60	119,82	0,00	136,00	267,30	182,90	182,90	82,63	82,63	84,06	84,06	13028,62	49508,76	62537,39	
3	Februari	29	109,24	273,72	3	94,56	49,36	3	94,56	187,57	236,93	156,61	0,00	172,78	269,81	182,90	182,90	85,14	85,14	67,78	67,78	9828,82	37349,50	47178,32	
4	Maret	31	141,59	379,23	3	135,65	75,69	3	135,65	287,63	363,32	172,52	0,00	188,70	270,74	182,90	182,90	86,07	86,07	98,30	98,30	15236,35	57898,15	73134,50	
5	April	30	105,32	272,99	3	99,01	53,46	3	99,01	203,16	256,63	188,88	0,00	205,05	271,61	182,90	182,90	86,94	86,94	72,48	72,48	10871,93	41313,35	52185,28	
6	Mei	31	77,92	208,70	3	75,42	42,08	3	75,42	159,92	202,01	195,57	0,00	211,74	271,95	182,90	182,90	87,28	87,28	55,43	55,43	8591,36	32647,17	41238,53	
7	Juni	30	54,59	141,49	3	55,03	29,71	3	55,03	112,91	142,63	194,44	0,00	210,61	271,90	182,90	182,90	87,23	87,23	40,41	40,41	6061,94	23035,36	29907,30	
8	Juli	31	44,44	119,02	3	45,46	25,37	2	30,31	64,26	89,63	206,73	17,10	222,90	272,50	182,90	182,00	88,73	88,73	33,62	22,64	5210,75	13335,83	18546,57	
9	Agustus	31	40,76	109,16	3	47,83	26,69	1	15,94	33,81	60,50	206,73	48,66	222,90	272,50	181,90	181,90	88,83	88,83	35,78	11,93	5545,38	7024,14	12569,52	
10	September	30	42,38	109,84	3	55,22	29,82	2	36,81	75,54	105,35	206,73	4,49	222,90	272,50	182,00	182,00	88,73	88,73	41,25	27,50	6187,89	15675,99	21863,88	
11	Oktober	31	41,54	111,27	3	53,20	29,69	2	35,47	75,21	104,90	206,73	6,37	222,90	272,50	182,00	182,00	88,73	88,73	39,75	26,50	6160,98	15607,82	21768,81	
12	Nopember	30	55,20	143,07	3	48,71	26,30	2	32,47	66,63	92,93	206,73	50,14	222,90	272,50	182,00	182,00	88,73	88,73	36,39	24,26	5458,19	13827,41	19285,60	
	Jumlah		927,86	2444,06		919,05	504,78		819,63	1709,73	2214,51	2172,74	126,76	2366,84							666,07	592,11	101609,77	343048,22	446657,99
	Rata-rata		77,32	203,67		76,59	42,07		68,30	142,48	184,54	181,06	10,56	197,24	271,04	182,59	182,52	86,67	86,75	55,51	49,34	8467,48	28587,35	37054,83	
	Maks		141,59	379,23	3	135,65	75,69	3	135,65	287,63	363,32	206,73	50,14	222,90	272,50	182,90	182,90	88,83	88,83	98,30	98,30	15236,35	57898,15	73134,50	
	Min		40,76	109,16	3	45,46	25,37	1	15,94	33,81	60,50	111,26	0,00	127,44	266,62	181,90	181,90	81,95	81,95	33,62	11,93	5210,75	7024,14	12569,52	

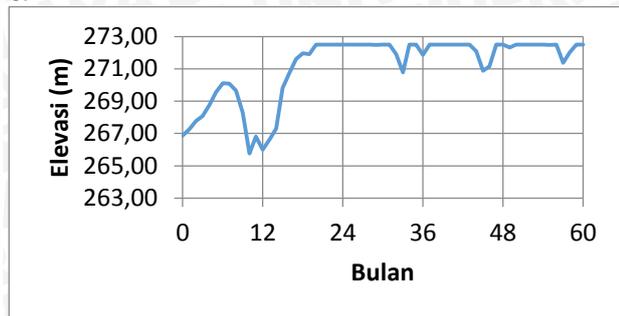
Tabel 5. Pola Operasi Waduk Tahun 2012 – 2013

No.	Bulan	Jumlah Hari	Inflow		Debit Beban Puncak		Debit Beban Dasar		Outflow Total	Volume Efektif	Spillway	Volume Total	Elevasi	TWL		Net Head		Daya		Energi		Total Energi			
			m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit	m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit						m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	m	Puncak	Dasar	Puncak		Dasar	Puncak	Dasar
1	Desember	31	103,57	277,40	3	99,06	55,27	3	99,06	210,04	265,32	206,73	12,09	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	73,26	73,26	11354,57	43147,36	54501,92	
2	Januari	31	111,92	299,75	3	102,93	57,43	3	102,93	218,25	275,68	206,73	24,08	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	76,12	76,12	11797,94	44832,19	56630,13	
3	Februari	28	131,29	317,62	3	125,56	63,28	3	125,56	240,47	303,75	206,73	13,87	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	92,85	92,85	12999,11	49396,61	62395,71	
4	Maret	31	115,42	309,14	3	106,38	59,36	3	106,38	225,56	284,92	206,73	24,22	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	78,67	78,67	12193,41	46334,97	58528,39	
5	April	30	122,21	316,78	3	122,35	66,07	3	122,35	251,06	317,13	206,73	0,00	222,90	272,48	182,90	182,90	87,81	87,81	90,46	90,46	13569,40	51563,73	65133,14	
6	Mei	31	99,72	267,08	3	98,68	55,06	3	98,68	209,24	264,30	206,73	2,43	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	72,97	72,97	11311,04	42981,96	54293,00	
7	Juni	30	112,89	292,62	3	111,81	60,38	3	111,81	229,43	289,80	206,73	2,82	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	82,68	82,68	12402,37	47129,01	59531,38	
8	Juli	31	92,30	247,23	3	96,82	54,03	3	96,82	205,30	259,33	194,63	0,00	210,80	271,91	182,90	182,90	87,81	87,81	87,24	71,12	11023,37	41888,81	52912,18	
9	Agustus	31	59,59	159,60	3	67,51	37,67	3	67,51	143,15	180,82	173,41	0,00	189,59	270,78	182,90	182,90	86,11	86,11	48,95	48,95	7587,27	28831,64	36148,91	
10	September	30	49,01	127,03	2	25,99	14,03	2	25,99	53,32	67,35	206,73	26,36	222,90	272,50	182,00	182,00	88,73	88,73	19,41	19,41	2912,05	11065,80	13977,86	
11	Oktober	31	42,05	112,62	3	46,46	25,93	2	30,97	65,68	91,60	206,73	21,01	222,90	272,50	182,00	182,00	87,83	88,73	34,36	23,14	5325,59	13629,75	18955,35	
12	Nopember	30	69,51	180,16	3	74,50	40,23	3	74,50	152,88	193,11	193,78	0,00	209,95	271,86	182,90	182,90	87,19	87,19	54,70	54,70	8204,52	31177,19	39381,71	
	Jumlah		1109,48	2907,04		1078,04	588,74		1062,55	2204,37	2793,11	2422,02	126,88	2616,12							795,55	784,33	12068,66	451979,01	572659,68
	Rata-rata		92,46	242,25		89,84	49,06		88,55	183,70	232,76	201,83	10,57	218,01	272,25	182,83	182,75	87,66	87,73	66,30	65,36	10056,72	37664,92	47721,64	
	Maks		131,29	317,62	3	125,56	66,07	3	125,56	251,06	317,13	206,73	26,36	222,90	272,50	182,90	182,90	88,73	88,73	92,85	92,85	13569,40	51563,73	65133,14	
	Min		42,05	112,62	2	25,99	14,03	2	25,99	53,32	67,35	173,41	0,00	189,59	270,78	182,00	182,00	86,11	86,11	19,41	19,41	2912,05	11065,80	13977,86	

Tabel 6. Pola Operasi Waduk Tahun 2013 – 2014

No.	Bulan	Jumlah Hari	Inflow		Debit Beban Puncak		Debit Beban Dasar		Outflow Total	Volume Efektif	Spillway	Volume Total	Elevasi	TWL		Net Head		Daya		Energi		Total Energi		
			m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit	m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	Unit						m <sup>3</sup> /s	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	juta m <sup>3</sup>	m	Puncak	Dasar	Puncak		Dasar	Puncak
1	Desember	31	133,17	356,68	3	123,02	68,64	3	123,02	260,85	329,49	206,73	14,24	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	90,97	90,97	14100,84	53583,21	67684,06
2	Januari	31	131,07	351,06	3	128,76	71,85	3	128,76	273,02	344,87	206,73	6,19	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	95,22	95,22	14759,21	56085,01	70844,22
3	Februari	28	90,98	220,11	3	82,99	41,83	3	82,99	158,94	200,76	206,73	19,35	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	61,37	61,37	8591,87	32649,12	41240,99
4	Maret	31	93,17	249,56	3	86,44	48,24	3	86,44	183,30	231,53	206,73	18,02	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	63,93	63,93	9908,63	37652,78	47561,41
5	April	30	95,19	246,73	3	92,17	49,77	3	92,17	189,12	238,89	206,73	7,84	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	68,16	68,16	10223,74	38850,22	49073,96
6	Mei	31	66,78	178,87	3	64,56	36,02	3	64,56	136,89	172,92	206,73	5,95	222,90	272,50	182,90	182,90	87,83	87,83	47,74	47,74	7400,27	28121,04	35521,32
7	Juni	30	56,45	146,32	3	56,70	30,62	2	37,80	77,56	108,18	206,73	38,14	222,90	272,50	182,90	182,00	87,83	88,73	41,24	28,19	6289,17	16095,84	22385,01
8	Juli	31	48,37	129,54	3	51,56	28,77	3	51,56	109,34	138,11	198,16	0,00	214,33	272,08	182,90	182,90	87,41	87,41	37,95	37,95	5882,60	22353,87	28236,47
9	Agustus	31	45,48	121,81	3	54,09	30,18	3	54,09	114,70	144,88	175,09	0,00	191,27	270,88	182,90	182,90	86,21	86,21	39,26	39,26	6085,76	23125,91	29211,67
10	September	30	40,91	106,03	3	52,99	28,62	2	35,33	72,50	101,11	180,01	0,00	196,19	271,15	182,90	182,00	86,48	88,73	38,59	25,99	5787,98	14815,49	20603,47
11	Oktober	31	31,51	84,39	3	41,42	23,11	1	13,81	29,28	52,39	206,73	5,29	222,90	272,50	182,90	181,90	87,83	88,83	30,63	10,33	4747,68	6082,20	10829,88
12																								

Dari perhitungan pola operasi waduk dapat dibuat pola operasi waduk Sutami. Dari pola tersebut dapat diketahui perubahan elevasi muka air waduk tiap bulannya. Pola operasi waduk ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pola Operasi Waduk Sutami

Dari hasil perhitungan pola operasi waduk selama 5 tahun, yaitu dari Desember 2010 hingga Nopember 2015 didapatkan debit maksimum yang dibutuhkan saat musim hujan dan debit minimum yang dibutuhkan saat musim kemarau, serta didapatkan pula produksi energi PLTA Sutami dalam kurun waktu 5 tahun. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 8 dan Tabel 9 berikut.

Tabel 8. Debit Turbin

No.	Tahun	Hujan	Kemarau
		Maksimum m <sup>3</sup> /det	Minimum m <sup>3</sup> /det
1	2010-2011	137,18	32,12
2	2011-2012	135,65	15,94
3	2012-2013	125,56	25,99
4	2013-2014	128,76	13,81
5	2014-2015	131,15	23,47

Tabel 9. Produksi Energi PLTA Sutami

No.	Tahun	Produksi Energi	Produksi Energi
		MWh	GWh
1	2010-2011	554952,77	554,95
2	2011-2012	444657,99	444,66
3	2012-2013	572659,68	572,66
4	2013-2014	448140,71	448,14
5	2014-2015	476558,67	476,56
Rata-rata		499393,96	499,39

Produksi energi listrik PLTA Sutami rata-rata per tahun berdasarkan Tabel 4.6 mencapai 499393,96 MWh atau sama dengan 499,39 GWh.

## V. PENUTUP

### A. Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Pola operasi waduk Sutami menunjukkan bahwa waduk Sutami masih dapat memenuhi kebutuhan pembangkitan dan irigasi. Walaupun pada musim kemarau tahun pertama mengalami penurunan

volume hingga elevasi 265,76 meter namun masih jauh dari batas elevasi rendah untuk pembangkitan dan irigasi. Pada tahun kedua volume waduk mengalami kenaikan hingga mencapai ketinggian elevasi 272,50 meter, namun pada bulan ke-20 hingga bulan ke-24, yaitu saat musim kemarau waduk tidak mengalami penurunan volume dikarenakan tidak semua unit pada PLTA beroperasi pada saat beban dasar. Pada tahun ketiga hingga kelima, volume waduk cenderung stabil dan mengalami penurunan setiap akhir tahun karena pada saat akhir musim kemarau debit yang masuk ke waduk dan volume pada waduk semakin berkurang dikarenakan kebutuhan pembangkitan dan irigasi dipenuhi secara bersamaan.

2. Pada musim hujan didapatkan debit maksimum yang dibutuhkan untuk pembangkitan sebesar 135,65 m<sup>3</sup>/det dengan operasi 3 unit serta daya yang dihasilkan sebesar 98,30 MW. Pada musim kemarau didapatkan debit minimum yang dibutuhkan untuk pembangkitan sebesar 13,81 m<sup>3</sup>/det dengan operasi 1 unit serta daya yang dihasilkan sebesar 10,33 MW.
3. Produksi energi listrik PLTA Sutami rata-rata per tahun mencapai 499393,96 MWh atau sama dengan 499,39 GWh.

### B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ini adalah:

1. Perlu adanya perhitungan efisiensi pembangkitan yang sesuai dengan data serta kondisi turbin dan generator terbaru. Dikarenakan usia penggunaan generator dan turbin pada PLTA Sutami yang sangat lama, maka turbin dan generator mengalami penurunan efisiensi.
2. Perlu adanya perhitungan perencanaan pola operasi waduk untuk mendapatkan batasan pengoperasian PLTA Sutami untuk beberapa tahun ke depan.
3. Melakukan studi perencanaan untuk pembangunan unit baru di PLTA Sutami. Dikarenakan masih adanya kelebihan air pada waduk yang ditunjukkan dengan adanya air yang masih melimpas melalui *spillway*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, A. & Kuwahara, S. 1982. *Teknik Tenaga Listrik*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [2] Soemarwanto. 2010. *Dasar Konversi Energi Elektrik*. Malang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- [3] Mosonyi, Emil. 1963. *Water Power Development Volume Two High Head Power Plant*. Budapest: Akademisi Kiado.
- [4] Ramos, Helena. 2000. *Guidelines For Design Small Hydropower Plants*. Irlandia: WREAN (Western Regional Energy Agency & Network) and DED (Department of Economic Development).

- [5] Bere, Andrianus S. 2014. Studi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Lodoyo pada Bendung Lodoyo di Desa Gogodeso Kecamatan Kanigoro Kabupaten Blitar Jawa Timur. *Jurnal Pengairan UB*.
- [6] Soetopo, Widandi. 2010. *Operasi Waduk Tunggal*. Malang: CV. Asrori.

