

Studi Optimasi Operasional Waduk Koto Panjang Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air

Study of Koto Panjang Reservoir Operational Optimization for Hydroelectric Power Plant

Diana Hanafi^{1,*}, Harmiyati¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jl.Kaharuddin Nasution 113, Pekanbaru, Indonesia

* Penulis korespondensi : dianahanafi@student.uir.ac.id

Tel.: +62-852-6536-8266; fax: -

Diterima: 21 Januari 2021; Direvisi: 29 April 2021; Disetujui: 29 April 2021.

DOI: 10.25299/saintis.2021.vol21(01).6249

Abstrak

Pada musim kemarau PLTA Koto Panjang pernah mengoperasikan satu unit turbin dan generator sehingga daya yang dihasilkan tidak maksimal. Pada musim yang sama PLTA ini juga pernah mengoperasikan tiga unit turbin dan generator namun hanya menghasilkan daya listrik ≤ 35 MW dengan prosentase $< 50\%$ yaitu $\leq 30,702\%$ dari daya maksimal pengoperasian tiga unit turbin dan generator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui debit andalan PLTA Koto Panjang, optimalisasi yang dilakukan dalam mengoptimasi PLTA Koto Panjang, daya listrik yang dihasilkan dari hasil optimalisasi tersebut dan perbandingannya. Metode yang digunakan adalah metode empiris Penman untuk menghitung nilai evaporasi. Debit andalan untuk debit *outflow* PLTA saat ini dan setelah dioptimalisasi dihitung menggunakan rumus daya listrik dan metode *mass curve*. Selanjutnya debit *outflow* PLTA yang telah didapatkan dianalisis di dalam tabel *water balance* menggunakan metode *sequent peak analysis*. Hasil yang didapatkan adalah debit andalan PLTA saat ini dan setelah dioptimalisasi yaitu $305,319 \text{ m}^3/\text{det}$ dan $384,465 \text{ m}^3/\text{det}$ dengan prosentase $51,995\%$ dan $39,235\%$. Optimalisasi dilakukan dengan menyesuaikan debit *outflow* dengan volume air yang ada pada *storage* saat itu. Daya listrik setelah dioptimalisasi adalah sebesar $13.302,315 \text{ kWatt}$ pada musim kering dan $143.551,645 \text{ kWatt}$ pada musim hujan. Daya listrik yang dihasilkan PLTA saat ini adalah sebesar $13.302,315 \text{ kWatt}$ pada musim kering dan 114.000 kWatt pada musim hujan. Sehingga daya listrik yang dihasilkan PLTA setelah dioptimalisasi mengalami kenaikan dari daya listrik sebelum dioptimalisasi sebesar $29.551,645 \text{ kWatt}$. Karena kenaikan daya melebihi kapasitas generator PLTA saat ini, maka terjadi penambahan 1 generator 30.000 kWatt atau 30 MW .

Kata Kunci: Daya Listrik, Debit Andalan, Optimasi, PLTA, Waduk

Abstract

In the dry season, Koto Panjang Hydroelectric Power Plant has operated one turbine and generator unit so the power produced is not optimal. In the same season, this hydropower plant has also operated three turbines and generators but only produces ≤ 35 MW of electricity by percentage $< 50\%$ which is $\leq 30,702\%$ of the maximum power from operating three turbine and generator units. The purpose of this research is to determine the mainstay discharge of Koto Panjang Hydroelectric Power Plant, optimization will be used for Koto Panjang hydroelectric power plant, power can produce from its optimization and its comparison. The method used in this research is the Penman empirical method to calculate the evaporation value. The mainstay discharge for hydropower plant *outflow* discharge at this time and after being optimized is calculated using the electrical power formula and the mass curve method. Furthermore, the hydroelectric power plant *outflow* discharge has obtained is analyzed in the water balance table using the sequent peak analysis method. The results obtained are the current mainstay discharge of hydroelectric power plant and after optimization, which are $305,319 \text{ m}^3/\text{s}$ and $384,465 \text{ m}^3/\text{s}$ with a percentage of $51,995\%$ and $39,235\%$. Optimization is done by adjusting the *outflow* discharge to the volume of water in the storage at that time. The electric power after optimization is $13.302,315 \text{ kWatt}$ in the dry season and $143.551,645 \text{ kWatt}$ in the rainy season. The current electricity generated by hydroelectric power plant is $13.302,315 \text{ kWatt}$ in the dry season and 114.000 kWatt in the rainy season. Therefore the electric power generated by hydroelectric power plant after optimization has increased from the electric power before it is optimized which is $29.551,645 \text{ kWatt}$. Because the increasing of the electric power exceeds the capacity of the current hydroelectric power plant generator, there is an addition 1 generator which is 30.000 kWatt or 30 MW .

Keywords: Electrical Power, Hydroelectric Power Plant, Mainstay Discharge, Optimization, Reservoir

PENDAHULUAN

Waduk adalah wadah buatan yang terbentuk sebagai akibat dibangunnya bendungan. Bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, dan beton, yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk [1].

Waduk Koto Panjang merupakan salah satu waduk di Riau yang berlokasi di Desa Rantau Berangin (Merangin), Kecamatan Bangkinang Barat, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau. Waduk ini merupakan waduk serbaguna (*multipurpose reservoir*) yang memiliki fungsi sebagai pembangkit listrik (PLTA), pengendali banjir, perikanan dan tempat rekreasi. Bendungan Koto Panjang yang berlokasi $\pm 20 \text{ km}$ dari Bangkinang atau 87 km dari

Pekanbaru ini merupakan bendungan tipe *concrete gravity* atau bendungan gravitas.

PLTA Koto Panjang mengoperasikan tiga unit turbin dan generator. Namun berdasarkan hasil wawancara dengan Supervisor II Shift C PLTA Koto Panjang menyatakan pada musim kemarau PLTA ini pernah mengoperasikan satu unit turbin dan generator sehingga daya yang dihasilkan tidak maksimal. Pada musim yang sama PLTA Koto Panjang juga pernah mengoperasikan tiga unit turbin dan generator namun hanya menghasilkan daya listrik ≤ 35 MW dengan prosentase < 50 % yaitu $\leq 30,702$ % dari daya maksimal pengoperasian tiga unit turbin dan generator.

Berdasarkan permasalahan tersebut, perlu dilakukan penelitian agar operasional waduk terpenuhi untuk PLTA. Penelitian dapat dilakukan dengan mengoptimalkan volume air yang masuk ke dalam waduk Koto Panjang dan pelepasan dari pada air yang telah ditampung tersebut untuk membangkitkan energi listrik. Penelitian ini menggunakan metode *mass curve* dan metode *sequent peak analysis* pada tabel *water balance* (neraca air) dengan debit andalan sebagai debit *outflow* untuk membangkitkan energi listrik. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu studi mengenai optimasi operasional Waduk Koto Panjang untuk pembangkit listrik tenaga air.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menentukan debit andalan yang digunakan untuk keperluan PLTA Koto Panjang, menentukan optimalisasi yang akan dilakukan dalam mengoptimasi PLTA Koto Panjang, menentukan besar daya listrik yang dihasilkan PLTA Koto Panjang setelah dioptimasi, menentukan perbandingan besar daya listrik yang dihasilkan PLTA Koto Panjang saat sebelum dan sesudah dioptimalisasi.

Dalam hal ini, untuk memperjelas suatu penelitian agar dapat dibahas dengan baik dan tidak meluas, maka perlu direncanakan batasan masalah yaitu studi ini hanya mencakup fungsi Bendungan Koto panjang sebagai PLTA, tidak memperhitungkan keuntungan secara ekonomi (rupiah) yang didapat PLTA Koto Panjang, tidak memperhitungkan resapan air waduk yang meresap ke dalam tanah, tanah pada dasar waduk diasumsikan jenuh akan air, tidak memperhitungkan desain sedimen, tidak membahas faktor pengaruh berkurangnya air waduk dan hanya meninjau eksisting.

METODOLOGI

Pada penelitian ini digunakan metode studi literatur. Metode studi literatur adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan kejelasan konsep dalam penelitian yaitu dengan mendapatkan buku-buku, jurnal maupun penelitian terdahulu yang berisikan dasar-dasar teori serta rumus-rumus perhitungan dan mendapatkan data yang mendukung dalam menyelesaikan penelitian ini.

Data tersebut yaitu data sekunder yang diperoleh langsung dari pihak yang terkait dengan penelitian ini. Data sekunder adalah sumber data penelitian yang diperoleh melalui media perantara atau secara tidak langsung yang berupa buku, catatan, bukti yang telah ada, atau arsip baik yang dipublikasi maupun tidak dipublikasikan secara umum. Adapun tahap-tahap dalam penelitian ini yaitu, menghitung debit andalan dan evaporasi, menghitung kapasitas daya tampung waduk, menghitung debit PLTA, menghitung *water balance*, menghitung daya listrik dan simulasi pola operasi PLTA.

Tahap 1. Menghitung debit andalan dan evaporasi.

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Analisis debit andalan bertujuan untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai. Umumnya debit andalan diperhitungkan karena diperlukan pada perencanaan pengembangan air irigasi, air baku dan pembangkit listrik tenaga air, yaitu untuk menentukan persediaan air pada bangunan pengambilan (*intake*). Debit tersebut digunakan sebagai patokan ketersediaan debit yang masuk ke waduk pada saat pengoperasiannya [2].

Dalam menganalisa debit andalan, data dibuat berkelompok dengan menentukan kelas dan interval tiap kelas. Dalam menentukan kelas dan interval menggunakan cara statistik pengolahan data. Dari data debit dilihat jumlah kejadian dari suatu debit yang masuk interval, kemudian prosentase kumulatif dari kejadiannya disusun sehingga dapat diperoleh gambaran *duration curve* dari data tersebut [3]. Cara perhitungannya adalah menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$R = a \max - a \min \quad (1)$$

$$k = 1 + 3,3322 \text{ Log } (n) \quad (2)$$

$$\text{Interval} = \frac{R}{k} \quad (3)$$

Keterangan:

a min = nilai data terkecil

a max = nilai data terbesar

n = jumlah data yang diolah

k = banyaknya kelas interval

interval = interval data untuk memasukkan data yang nantinya dihitung banyaknya dengan frekuensi

Interval dimulai dari nilai data $\leq a \min$

$$T = \frac{n}{m} \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{T} = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

T = masa ulang

P = besarnya probabilitas (%)

m = nomor urut data

n = jumlah data yang diolah

Setelah diperoleh gambaran *duration curve*, maka debit andalan untuk PLTA saat ini (eksis) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut [4]:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Keterangan:

- Q = Debit (m³/det)
- V = Volume air (m³)
- t = waktu (detik)
- Volume_{PLTA} = Volume_{waduk}

Daya adalah kemampuan melakukan sesuatu atau kemampuan bertindak [5]. Daya listrik adalah kemampuan suatu peralatan listrik untuk melakukan usaha akibat adanya perubahan kerja dan perubahan muatan listrik tiap satuan waktu [6]. Untuk daerah tertentu pada daerah aliran sungai terdapat perbedaan tinggi pada sungai sebesar H meter, daya yang dapat dibangkitkan karena perbedaan tinggi ini [7] adalah sebesar:

$$P = Q \rho g H \text{ (Watt)} = 9,8 Q H \text{ (kW)} \quad (7)$$

Keterangan:

- Q = debit air (m³/detik)
- ρ = masa jenis air = 1000 (kg/m³)
- g = percepatan gaya berat = 9,8 (m/detik)
- H = perbedaan muka air (m) atau tinggi jatuh efektif (m)

Evaporasi adalah proses penguapan air yang berada di permukaan bumi, baik itu air laut, air danau, air sungai, air pada permukaan tanah dan juga air yang ada pada permukaan tumbuhan akibat sinar matahari (evapotranspirasi) [8]. Hasil perhitungan evaporasi akan dimasukkan ke dalam tabel perhitungan *water balance*. Untuk analisa evaporasi dibutuhkan data temperatur, kelembaban relatif dan kecepatan angin. Yang mana data-data tersebut akan dikelompokkan berdasarkan rata-rata bulanan lalu ditentukan nilai evaporasi bulannya menggunakan rumus empiris Penman [9] pada persamaan:

$$H = \frac{e}{E} \times 100 \quad (8)$$

Keterangan:

- H = kelembaban relatif (%)
- e = tekanan uap pada waktu pengukuran (mb atau mmHg)
- E = tekanan uap jenuh (mb atau mmHg)

Untuk mempermudah perhitungan, nilai tekanan uap jenuh (E) sebagai fungsi temperatur (°C) ditunjukkan pada Tabel 1.

$$E = 0,35 (e_a - e_d) \left(1 + \frac{V}{100}\right) \quad (9)$$

Keterangan:

- E = evaporasi (mm/hari)
- e_a = tekanan uap jenuh pada suhu rata-rata harian (mmHg)
- e_d = tekanan uap sebenarnya (mmHg)
- V = kecepatan angin pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah (mile/hari)
- 1 mile = 1600 m

Tabel 1. Nilai Tekanan Uap Jenuh

0°	p (mmHg)
-60	0,0008
-40	0,096
-20	0,783
-10	1,964
-1	4,22
0 (air + es + uap)	4,58
10	9,21
20	17,55
30	31,86
40	55,4
50	93,6
60	149,6
80	355,4
100	760,0 (1 atm)
110	1074
125	1740
200	11650
250	29770
300	64300
350	123710

Sumber: Kiyotoka Mori dkk, 2006

Tahap 2. Menghitung kapasitas daya tampung waduk.

Berhubung fungsi utama dari waduk adalah untuk menyediakan tampungan, maka ciri fisiknya yang paling penting adalah kapasitas tampungan. Kapasitas waduk yang bentuknya beraturan dapat dihitung dengan rumus-rumus untuk menghitung volume benda padat [10]. Kapasitas tampungan waduk atau volume dari waduk dapat dihitung melalui kondisi topografinya. Penentuan volume dapat diketahui dengan melihat grafik hubungan antara luas genangan, elevasi, dan volume airnya. Tinggi (elevasi) dasar yang diambil adalah dasar sungai di tempat rencana as bendungan [11].

Adapun perhitungan kapasitas daya tampung waduk menggunakan metode *mass curve* dilakukan untuk menyesuaikan besar debit *outflow* PLTA dengan besar volume aktif waduk yang telah tersedia (eksis), sehingga besar volume debit *outflow* PLTA tidak melebihi volume aktif waduk [12]. Hasil dari perhitungan ini akan diplot kedalam suatu grafik *mass curve*.

Tahap 3. Menghitung debit PLTA.

Adapun perhitungan debit PLTA dilakukan untuk menentukan besar debit yang akan dikeluarkan waduk untuk memutar turbin agar dapat membangkitkan listrik pada generator PLTA [4]. Adapun debit yang dihasilkan akan dimasukkan ke dalam tabel perhitungan *water balance*.

Tahap 4. Menghitung *water balance*.

Dalam perhitungan *water balance* digunakan metode *sequent peak analysis* menggunakan rumus pada persamaan sebagai berikut [12]:

$$K_t = QF_{ta} + K_{t-1} - R_t, \text{ jika positif} \quad (10)$$

$$K_t = 0, \text{ jika negatif} \quad (11)$$

Keterangan:

- K_t = tampungan yang dapat disimpan dimana pada periode t = 0, nilai K_t = 0
- R_t = *outflow*
- K_{t-1} = tampungan yang dapat disimpan sebelum periode t

QF_{ta} = inflow dari tampungan

Untuk menghitung QF_{ta} digunakan persamaan [12]:

$$QF_{ta} = QF_t + PP_t - EV_t \tag{12}$$

Keterangan:

QF_t = debit dari sungai yang masuk tampungan

PP_t = presipitasi (hujan) yang jatuh di atas tampungan

EV_t = evaporasi (penguapan) yang terjadi di tampungan

Pada tabel *water balance* nilai K_t yang merupakan volume tampungan tidak boleh bernilai negatif sehingga bila terjadi nilai negatif maka debit PLTA yang selanjutnya disebut debit *outflow* harus dirubah dengan cara coba-coba sehingga nilai $K_t \geq 0$. Apabila telah dicoba-coba nilai K_t adalah nol maka untuk mendapatkan nilai debit *outflow* yang sesuai dapat menggunakan persamaan (10), persamaan (11) dan persamaan (12).

Tahap 5. Menghitung daya listrik.

Diketuainya nilai debit *outflow* maka dapat dihitung besar daya listrik yang dihasilkan PLTA. Dalam perhitungannya digunakan rumus daya yang berhubungan dengan debit yang tunjukkan pada persamaan (7). Nilai daya yang didapatkan akan dihitung nilai harian, bulanan dan tahunannya pada tabel *water balance*.

Tahap 6. Simulasi pola operasi PLTA.

Operasi waduk (*reservoir operation*) adalah penampungan aliran air sungai ke dalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan dari pada air yang telah ditampung tersebut untuk berbagai tujuan. Metode pengoperasian waduk untuk mendapatkan hasil yang optimal salah satunya dengan menerapkan simulasi pola operasi waduk [13]. Optimasi adalah operasi pemanfaatan sumber daya air yang optimal dengan aspek yang sangat penting dalam pendayagunaan sumber daya air khususnya pada perencanaan operasi waduk [14]. Dalam kasus lain optimal yaitu berbiaya terendah namun berfungsi maksimal [15].

Dalam permasalahan pendayagunaan sumber daya air, simulasi merupakan suatu teknik permodelan untuk menirukan perilaku suatu sistem ke dalam suatu model. Model simulasi digunakan untuk mengevaluasi apa yang akan terjadi di dalam sistem jika diberikan masukan-masukan tertentu. Dengan demikian pola pengelolaan sistem dapat dievaluasi dengan mempelajari perilaku sistem terhadap masukan berbagai skenario pada sistem [16].

Perhitungan optimasi dilakukan dengan model simulasi. Simulasi pengoperasian PLTA bertujuan untuk menghitung operasi waduk / PLTA pada periode tertentu dengan memperhatikan debit sungai sebagai *input* dari waduk dan debit PLTA sebagai debit *output* [12]. Dalam menentukan besar daya listrik yang dihasilkan ditentukan oleh besar debit andalan PLTA. Dalam menentukan besar debit

tersebut digunakan cara coba-coba yaitu dengan mencari besar debit dari *water balance* debit andalan. Kemudian dihitung besar daya listrik dari debit tersebut. Dari hasil perhitungan dibuat grafik persen debit andalan (%) vs daya yang dihasilkan (kW) sehingga dapat diketahui pola debit andalan terhadap daya listrik yang dihasilkan. Selanjutnya, dilakukan perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan setelah dioptimalisasikan dengan daya listrik yang eksis sekarang. Pada tahap ini akan direncanakan daya maksimum generator sehingga dapat diketahui jumlah generator yang bekerja.

HASIL DAN DISKUSI

Analisa Debit Andalan dan Evaporasi

Debit andalan digunakan sebagai debit *outflow* pada tabel *water balance*. Dalam menganalisa debit andalan dibutuhkan data pengamatan debit selama periode tertentu. Semakin lama data pengamatan maka semakin bagus gambaran yang dihasilkan pada *duration curve*. *Duration curve* dapat digambarkan dari data debit *inflow* harian maupun dari data debit *inflow* bulanan.

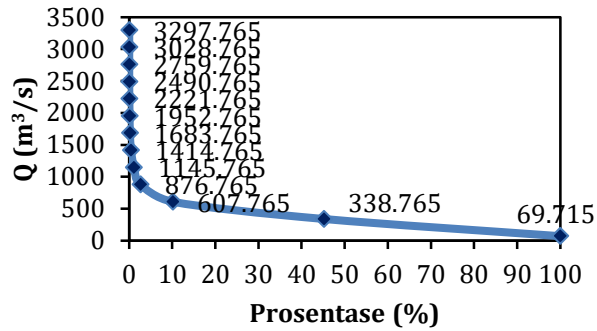
Tabel 2. Prosentase Frekuensi Kumulatif Debit *Inflow* Harian

Kelas	Interval (m ³ /det)	Titik Tengah (m ³ /det)	Frekuensi	Frekuensi Kumulatif	Prosentase (%)
1	64.78 - 204.21	69.71	2002	3652	100.00
2	204.31 - 473.21	338.76	1278	1650	45.18
3	473.315 - 742.21	607.76	275	372	10.18
4	742.315 - 1011.21	876.76	56	97	2.65
5	1011.31 - 1280.21	1145.76	25	41	1.12
6	1280.31 - 1549.21	1414.76	9	16	0.43
7	1549.31 - 1818.21	1683.76	3	7	0.19
8	1818.31 - 2087.21	1952.76	2	4	0.11
9	2087.31 - 2356.21	2221.76	1	2	0.05
10	2356.31 - 2625.21	2490.76	0	1	0.02
11	2625.31 - 2894.21	2759.76	0	1	0.02
12	2894.31 - 3163.21	3028.76	0	1	0.02
13	3163.31 - 3432.21	3297.76	1	1	0.02

Berdasarkan data debit *inflow* tersebut dapat ditentukan prosentase frekuensi kumulatif debit *inflow*. Hasil dari prosentase tersebut akan diplot ke dalam sebuah *duration curve*. Adapun prosentase frekuensi kumulatif debit *inflow* harian selama periode 10 tahun yang didapatkan dari perhitungan debit andalan dapat dilihat pada tabel 2.

Berdasarkan tabel tersebut terlihat frekuensi pada kolom 4 yang merupakan jumlah data yang berada dalam interval setiap kelas. Pada interval data antara (-64,785) m³/det hingga 204,215 m³/det memiliki jumlah data sebanyak 2002 data.

Nilai frekuensi kumulatif pada kelas 1 yaitu 3652 yang merupakan jumlah keseluruhan data debit *inflow* harian selama 10 tahun. Sedangkan nilai frekuensi kumulatif pada kelas 2 yaitu 1650 didapatkan dari pengurangan 3652 dengan 2002 yang merupakan nilai frekuensi pada kolom 4. Nilai prosentase kelas 1 adalah 100 % artinya debit 69,715 m³/det memiliki prosentase kejadian 100 % dalam 1 tahun. Adapun *duration curve* yang dihasilkan dari data debit *inflow* harian selama periode 10 tahun yang didapatkan dari Tabel 1 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. *Duration Curve* dari Data Harian

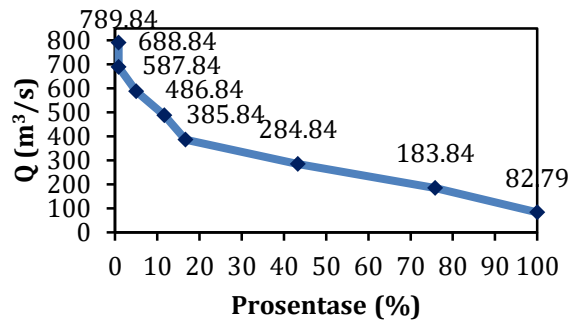
Dari Gambar 2 terlihat grafik hubungan prosentase (%) dan Q (m³/s). Prosentase yang dimaksud pada grafik adalah frekuensi kejadian dari suatu besaran debit yang digambarkan dalam suatu periode pengamatan. Sedangkan Q merupakan debit sungai. Prosentase 100 % artinya debit sungai terjadi selama 365 hari dalam 1 tahun. Gambar 2 menunjukkan semakin besar prosentase kejadian suatu debit dalam satu tahun maka semakin kecil debit yang tersedia begitu sebaliknya. Hal ini ditunjukkan pada prosentase 45 % hingga 100 % nilai debit turun tidak terlalu signifikan sedangkan pada prosentase 10 % hingga 100 % turunnya cukup signifikan.

Debit andalan juga bisa dianalisa menggunakan data debit bulanan yang didapat dari hasil rata-rata debit harian perbulannya selama periode 10 tahun. Adapun prosentase frekuensi kumulatif debit *inflow* bulanan selama periode 10 tahun dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Prosentase Frekuensi Kumulatif Debit

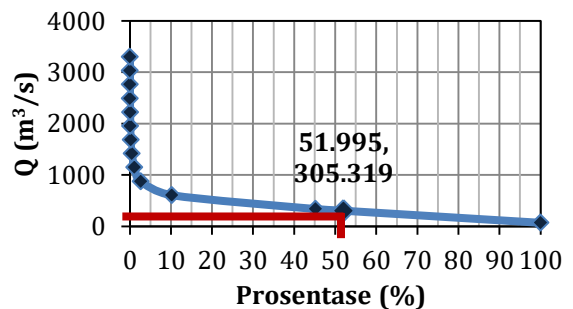
Kelas	Interval		Titik Tengah (m ³ /det)	Frekuensi	Frekuensi Kumulatif	Prosentase (%)
	(m ³ /det)	(m ³ /det)				
1	32.2 - 133.9	133.9 - 292	82.79	29	120	100.000
2	133.9 - 234.392	234.392 - 292	183.84	39	91	75.833
3	234.392 - 335.392	335.392 - 292	284.84	32	52	43.333
4	335.392 - 436.392	436.392 - 292	385.84	6	20	16.667
5	436.392 - 537.392	537.392 - 292	486.84	8	14	11.667
6	537.392 - 638.392	638.392 - 292	587.84	5	6	5.000
7	638.392 - 739.392	739.392 - 292	688.84	0	1	0.833
8	739.392 - 840.392	840.392 - 292	789.84	1	1	0.833

Berdasarkan Tabel 3 terlihat titik tengah 82,79 m³/det yang merupakan nilai debit *inflow* pada interval data antara 32,29 m³/det hingga 133,292 m³/det. Frekuensi pada kolom 4 adalah jumlah data yang berada dalam interval setiap kelas. Pada interval data antara 32,29 m³/det hingga 133,292 m³/det memiliki jumlah data sebanyak 29 data. Nilai frekuensi kumulatif pada kelas 1 yaitu 120 yang merupakan jumlah keseluruhan data debit *inflow* bulanan selama 10 tahun. Sedangkan nilai frekuensi kumulatif pada kelas 2 yaitu 91 didapatkan dari pengurangan 120 dengan 29 yang merupakan nilai frekuensi pada kolom 4. Nilai prosentase kelas 1 adalah 100 % artinya debit 82,79 m³/det memiliki prosentase kejadian 100 % dalam 1 tahun. *Duration curve* yang dihasilkan dari data bulanan debit *inflow* selama periode 10 tahun dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. *Duration Curve* dari Data Bulanan

Gambar 3 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan prosentase (%) dan Q (m³/s) sama dengan Gambar 3. Gambaran grafik yang dihasilkan dari Gambar 3 sama dengan Gambar 2 yaitu semakin besar prosentase kejadian suatu debit dalam satu tahun maka semakin kecil debit yang tersedia begitu sebaliknya. Terlihat pada prosentase 75 % hingga 100 % nilai debit turun tidak terlalu signifikan sedangkan pada prosentase 40 % hingga 100 % turunnya cukup signifikan. *Duration curve* dari data harian mendapatkan hasil yang lebih detail dibandingkan dengan *duration curve* dari data bulanan.



Gambar 4. *Duration Curve* dari Debit Andalan PLTA Eksis

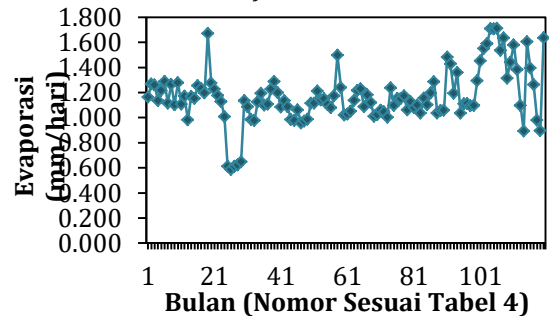
Berdasarkan analisa debit andalan PLTA Koto Panjang saat ini (eksis) didapatkan debit

andalan sebesar 305,319 m³/det. Debit 305,319 m³/det dengan intervolasi didapatkan prosentasenya pada *duration curve* adalah sebesar 51,995 % dapat dilihat pada gambar 4 berikut ini.

Pada Gambar 4 terlihat *duration curve* dari data harian dan garis merah pada grafik yang menunjukkan nilai prosentase dan debit andalan PLTA Koto Panjang saat ini. Debit andalan yang didapatkan adalah sebesar 305,319 m³/det yang memiliki prosentase 51,995 %. Artinya debit 305,319 m³/det terjadi selama $\frac{51,995}{100} \times 365$ hari yaitu 189,782 hari dalam 1 tahun.

Adapun dalam menganalisa evaporasi dibutuhkan data klimatologi seperti data suhu, kelembaban, kecepatan angin dan tekanan atmosfer. Pada Tabel 4 dapat dilihat nilai evaporasi pada tahun 2010 hingga 2019. Dari Tabel 4 dapat dilihat hasil analisa evaporasi dari tahun 2010 hingga

tahun 2019. Nilai evaporasi dihitung perbulannya menggunakan rumus empiris Penman pada persamaan (8) dan (9) dari bulan januari hingga bulan desember selama 10 tahun mengikuti jumlah tahun dari data debit *inflow* harian.



Gambar 5. Hasil Analisa Evaporasi

Tabel 4. Hasil Analisa Evaporasi

Ta hu n	No mo r	Bu la n	Evap orasi (E) (mm/ hari)	Ta hu n	No mo r	Bu la n	Evap orasi (E) (mm/ hari)	Ta hu n	No mo r	Bu la n	Evap orasi (E) (mm/ hari)	Ta hu n	No mo r	Bu la n	Evap orasi (E) (mm/ hari)	Ta hu n	No mo r	Bu la n	Evap orasi (E) (mm/ hari)
	1	1	1.162		25	1	0.612		49	1	0.987		73	1	1.002		97	1	1.112
	2	2	1.268		26	2	0.586		50	2	1.114		74	2	1.237		98	2	1.094
	3	3	1.26		27	3	0.613		51	3	1.115		75	3	1.096		99	3	1.097
	4	4	1.136		28	4	0.622		52	4	1.211		76	4	1.154		100	4	1.294
	5	5	1.216		29	5	0.647		53	5	1.141		77	5	1.151		101	5	1.452
20	6	6	1.287	20	30	6	1.134	20	54	6	1.151	20	78	6	1.174	20	102	6	1.551
10	7	7	1.114	12	31	7	1.087	14	55	7	1.105	16	79	7	1.061	18	103	7	1.59
	8	8	1.266		32	8	0.986		56	8	1.08		80	8	1.127		104	8	1.709
	9	9	1.103		33	9	0.977		57	9	1.173		81	9	1.079		105	9	1.706
	10	10	1.279		34	10	1.125		58	10	1.498		82	10	1.1		106	10	1.712
	11	11	1.107		35	11	1.193		59	11	1.24		83	11	1.036		107	11	1.536
	12	12	1.17		36	12	1.098		60	12	1.02		84	12	1.155		108	12	1.634
	13	1	0.981		37	1	1.107		61	1	1.027		85	1	1.101		109	1	1.314
	14	2	1.168		38	2	1.228		62	2	1.051		86	2	1.196		110	2	1.441
	15	3	1.152		39	3	1.289		63	3	1.138		87	3	1.286		111	3	1.58
	16	4	1.255		40	4	1.199		64	4	1.215		88	4	1.037		112	4	1.381
	17	5	1.231		41	5	1.084		65	5	1.229		89	5	1.055		113	5	1.097
20	18	6	1.196	20	42	6	1.134	20	66	6	1.086	20	90	6	1.059	20	114	6	0.892
11	19	7	1.67	13	43	7	1.087	15	67	7	1.181	17	91	7	1.483	19	115	7	1.604
	20	8	1.275		44	8	0.986		68	8	1.12		92	8	1.428		116	8	1.396
	21	9	1.226		45	9	0.977		69	9	1.01		93	9	1.194		117	9	1.263
	22	10	1.175		46	10	1.06		70	10	1.023		94	10	1.36		118	10	0.979
	23	11	1.128		47	11	0.957		71	11	1.057		95	11	1.035		119	11	0.896
	24	12	1.007		48	12	0.971		72	12	1.046		96	12	1.11		120	12	1.634

Nilai evaporasi ini berbeda-beda tiap bulannya tergantung dari nilai suhu, kelembaban,

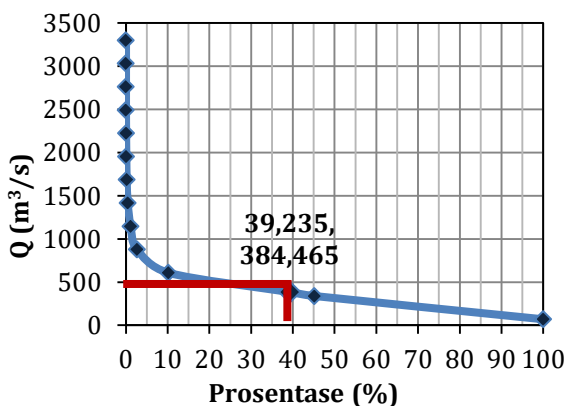
kecepatan angin dan tekanan atmosfer. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.

Gambar 5 merupakan grafik hasil analisa evaporasi berdasarkan Tabel 3. Pada gambar terlihat perbedaan nilai evaporasi setiap bulannya selama 10 tahun. Rata-rata nilai evaporasi dalam 10 tahun yaitu lebih besar dari 0,8 mm/hari dan kurang dari 1,4 mm/hari. Nilai evaporasi bulan 90 hingga bulan 120 menunjukkan perbedaan turun naik yang cukup signifikan dibandingkan dengan bulan-bulan yang lain. Terlihat nilai evaporasi tertinggi yaitu 1,712 mm/hari pada bulan 106 yaitu bulan oktober tahun 2018. Sedangkan nilai evaporasi terendah yaitu 0,586 mm/hari pada bulan 26 yaitu bulan february tahun 2012.

Analisa Kapasitas Daya Tampung Waduk

Dalam pengoperasiannya, PLTA Koto Panjang bekerja selama 24 jam. Dalam melakukan analisa kapasitas daya tampung waduk metode yang digunakan adalah metode *mass curve*. Adapun pada jam ke 24 besar volume kumulatif pada analisa *mass curve* ini harus sama nilainya dengan volume efektif waduk agar volume *outflow* PLTA yang dihasilkan tidak melebihi volume efektif waduk. Dalam perhitungannya volume efektif yang diambil adalah volume dari elevasi 80,5 hingga 80,8 mdpl yaitu sebesar 33.217.800 m³. Didapatkan debit sebesar 384,465 m³/det sebagaimana terlihat pada Tabel 5.

Pada Tabel 5 terlihat Q yang merupakan debit yang akan digunakan sebagai debit *outflow* pada tabel *water balance* setelah dioptimalisasikan. Volume pada tabel merupakan volume yang dihasilkan oleh Q dalam satu jam selama 24 jam karena PLTA Koto Panjang bekerja selama 24 jam. Volume kumulatif yang dihasilkan pada jam ke 24 adalah volume efektif Waduk PLTA Koto Panjang. Dari penyesuaian nilai volume kumulatif pada jam ke 24 dengan volume efektif Waduk PLTA Koto Panjang maka didapatkan nilai Q yaitu 384,465 m³/det. Dalam *duration curve* debit 384,465 m³/det merupakan debit 39,235 %. Prosentase tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.



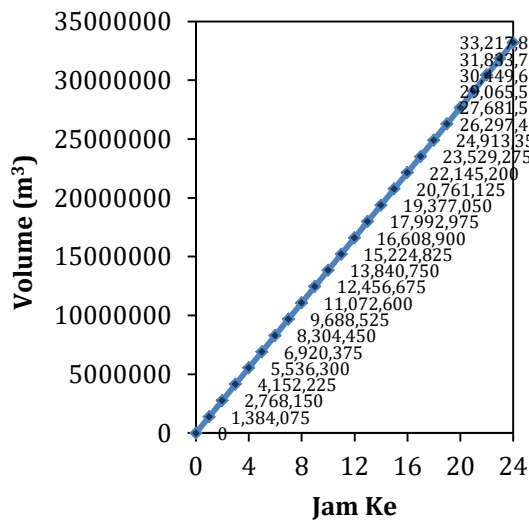
Gambar 6. *Duration Curve* dari Debit Hasil Analisa *Mass Curve*

Pada Gambar 6 terlihat *duration curve* dari data harian dan garis merah pada grafik menunjukkan nilai prosentase dan debit yang didapat dari perhitungan *mass curve*. Debit yang dihasilkan dari analisa *mass curve* adalah 384,465 m³/s. Debit tersebut didapatkan prosentasenya pada *duration curve* sebesar 39,235 %. Artinya debit 384,465 m³/s terjadi selama $\frac{39,235}{100} \times 365$ hari yaitu 143,208 hari dalam 1 tahun. Adapun *mass curve* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.

Tabel 5. Perhitungan *Mass Curve*

Jam Ke	Q m ³ /det	Volume m ³	Volume Kumulatif m ³
1	2	3	4
0	384.465	0	0
1	384.465	1.384.075.00	1.384.075.00
2	384.465	1.384.075.00	2.768.150.00
3	384.465	1.384.075.00	4.152.225.00
4	384.465	1.384.075.00	5.536.300.00
5	384.465	1.384.075.00	6.920.375.00
6	384.465	1.384.075.00	8.304.450.00
7	384.465	1.384.075.00	9.688.525.00
8	384.465	1.384.075.00	11.072.600.00
9	384.465	1.384.075.00	12.456.675.00
10	384.465	1.384.075.00	13.840.750.00
11	384.465	1.384.075.00	15.224.825.00
12	384.465	1.384.075.00	16.608.900.00
13	384.465	1.384.075.00	17.992.975.00
14	384.465	1.384.075.00	19.377.050.00
15	384.465	1.384.075.00	20.761.125.00
16	384.465	1.384.075.00	22.145.200.00
17	384.465	1.384.075.00	23.529.275.00
18	384.465	1.384.075.00	24.913.350.00
19	384.465	1.384.075.00	26.297.425.00
20	384.465	1.384.075.00	27.681.500.00
21	384.465	1.384.075.00	29.065.575.00
22	384.465	1.384.075.00	30.449.650.00
23	384.465	1.384.075.00	31.833.725.00
24	384.465	1.384.075.00	33.217.800

Dari Gambar 7 terlihat jam dan volume berbanding lurus artinya semakin lama durasi waktunya maka volumenya akan semakin bertambah. Pada gambar *Mass Curve* diatas terlihat juga grafiknya berbentuk linier artinya terjadi penambahan volume setiap jamnya. Adapun yang dimaksud dengan volume ini adalah volume yang dihasilkan dari debit yang akan digunakan untuk debit PLTA.



Gambar 7. Mass Curve

Debit PLTA

Debit PLTA merupakan debit *outflow* dari waduk yang digunakan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan listrik dengan bantuan generator. Debit yang digunakan sebagai debit PLTA adalah debit yang dihasilkan dari analisa *Mass Curve*. Hal ini dikarenakan PLTA beroperasi selama 24 jam sehingga turbin yang diputar oleh debit *outflow* PLTA juga beroperasi selama 24 jam. Maka

berdasarkan hasil analisa *Mass Curve* didapatkan debit PLTA adalah sebesar 384,465 m³/det.

Analisa Water Balance, Daya Listrik dan Simulasi PLTA

Simulasi pengoperasian PLTA bertujuan untuk menghitung operasi waduk / PLTA pada periode tertentu dengan memperhatikan debit sungai sebagai *input* dari waduk dan debit PLTA sebagai debit *output*. Dari perhitungan *water balance* sebelum dan setelah dioptimalisasi dapat diketahui bahwa daya yang dihasilkan PLTA sebelum dioptimalisasikan adalah 13.302,315 kWatt pada musim kering dan 114.000 kWatt pada musim hujan. Sedangkan daya setelah dioptimalisasikan adalah 13.302,315 kWatt pada musim kering dan 143.551,645 kWatt pada musim hujan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 6 yaitu tabel *water balance* untuk tahun 2010 setelah dioptimalisasikan dan Tabel 7 yaitu tabel *water balance* untuk tahun 2010 sebelum dioptimalisasikan.

Pada Tabel 6 terlihat K_t yang merupakan tampungan yang dapat disimpan dimana pada periode $t = 0$ nilai $K_t = 0$ atau dapat dikatakan sebagai volume tampungan atau volume berlebih dalam sehari akibat volume *inflow* lebih besar dari volume *outflow* dan P adalah daya yang dapat dibangkitkan.

Tabel 6. Water Balance Setelah Dioptimalisasi

T h n	Bu la n	J m h H a r i	De bit Infl ow m ³ / det	Inflow			Evap orasi mm/ hari	Outflow			K _t m ³	P _{hari} kWatt	P _{bulan} kWatt	P _{tahun} kWatt		
				Volum e Infl ow m ³	Presi pitasi mm/ hari	Volum e Presip itasi m ³		Vol. Kum Infl ow m ³	Volu me Evap orasi m ³	De bit out flo w m ³ / det					Volum e Outflo w m ³	Vol.Ku m Outflo w m ³
	1	31	336 .48	29.072. 282.66	12.45	1.544. 000.00	30.616. 282.66	1.16	144.0 86.63	352 .68	30.472. 196.02	30.616. 282.66	-	131.6 86.44	4.082. 279.68	
	2	28	334 .40	28.892. 357.16	10.39	1.288. 714.28	30.181. 071.44	1.26	157.2 38.94	347 .49	30.023. 832.50	30.181. 071.44	-	129.7 48.82	3.632. 967.13	
	3	31	289 .63	25.024. 252.54	8.54	1.060. 000.00	26.084. 252.54	1.26	156.2 77.19	300 .09	25.927. 975.35	26.084. 252.54	-	112.0 48.46	3.473. 502.43	
	4	30	512 .90	44.315. 341.34	13.13	1.628. 533.33	45.943. 874.67	1.13	140.8 20.99	384 .46	33.217. 800.00	33.358. 620.99	12.585. 253.683	143.5 51.64	4.306. 549.36	
20 10	5	31	251 .78	21.754. 088.66	6.03	748.00 0.00	22.502. 088.66	1.21	150.8 04.09	258 .69	22.351. 284.57	22.502. 088.66	-	96.59 1.69	2.994. 342.61	36.037. 725.073
	6	30	212 .68	18.375. 921.70	6.40	793.60 0.00	19.169. 521.70	1.28	159.6 31.85	220 .02	19.009. 889.85	19.169. 521.70	-	82.15 1.76	2.464. 553.01	
	7	31	233 .79	20.199. 712.92	5.19	644.00 0.00	20.843. 712.92	1.11	138.1 21.40	239 .64	20.705. 591.52	20.843. 712.92	-	89.47 9.78	2.773. 873.45	
	8	31	246 .06	21.260. 281.19	9.29	1.152. 000.00	22.412. 281.19	1.26	156.9 60.71	257 .58	22.255. 320.47	22.412. 281.19	-	96.17 6.98	2.981. 486.55	
	9	30	274 .22	23.692. 775.24	9.30	1.153. 200.00	24.845. 975.24	1.10	136.7 15.73	285 .98	24.709. 259.50	24.845. 975.24	-	106.7 81.75	3.203. 452.54	
	10	31	147 .10	12.710. 193.61	4.54	564.00 0.00	13.274. 193.61	1.27	158.5 45.66	151 .80	13.115. 647.95	13.274. 193.61	-	56.67 9.63	1.757. 068.74	
	11	30	201 .94	17.448. 245.93	10.76	1.335. 066.66	18.783. 312.60	1.10	137.2 55.85	215 .81	18.646. 056.75	18.783. 312.60	-	80.57 9.45	2.417. 383.56	
	12	31	157 .69	13.624. 442.16	8.69	1.078. 400.00	14.702. 842.16	1.17	145.0 72.61	168 .49	14.557. 769.55	14.702. 842.16	-	62.91 1.80	1.950. 265.97	

Berdasarkan Tabel 6 pada bulan Januari 2010 didapatkan nilai debit *outflow* sebesar 352,687 m³/det yang merupakan hasil penyesuaian agar $Kt \geq 0$. Begitu juga dengan bulan-bulan seterusnya, jika debit andalan hasil analisa *mass curve* yang digunakan sebagai debit *outflow* dan menyebabkan nilai volume total *outflow* lebih besar dari nilai volume total *inflow* yang mana Kt akan bernilai negatif. Sedangkan dalam metode *sequent peak analysis* nilai Kt tidak boleh bernilai negatif. Maka debit *outflow* harus diperkecil agar nilai $Kt \geq 0$ dengan cara optimalisasi yaitu menyesuaikan debit *outflow* dengan volume air yang ada pada *storage* saat itu yaitu volume total *inflow* yang dikurangi volume evaporasi.

Kt ada yang tidak bernilai nol pada Tabel 6 yaitu pada bulan April 2010. Hal ini dikarenakan volume *inflow* lebih besar dibandingkan dengan volume *outflow*. Sehingga debit *outflow* yang digunakan adalah debit andalan hasil analisa *mass curve* yaitu 384,465 m³/det. Adapun tabel *water balance* untuk tahun 2010 sebelum dioptimalisasikan dapat dilihat pada Tabel 7.

Terdapat perbedaan tabel *water balance* setelah dioptimalisasi dengan tabel *water balance* sebelum dioptimalisasi yaitu debit *outflow* yang digunakan. Debit *outflow* didapatkan dari hasil perhitungan debit andalan.

Tabel 7. *Water Balance* Sebelum Dioptimalisasi

T h n	Bu la n	J m h H a r i	De bit <i>Inflow</i> m ³ / det	<i>Inflow</i>				<i>Outflow</i>					K _t	P _{hari}	P _{bulan}	P _{tahun}
				Volum e <i>Inflow</i> m ³	Cur ah an mm /ha ri	Volum e Presipi tasi m ³	Vol. Kum Inflow m ³	Eva pora si mm /har i	Volu me Eva pora si m ³	Deb it <i>Outflow</i> m ³ / det	Volume <i>Outflow</i> m ³	Vol.Ku m <i>Outflow</i> m ³				
2 0 1 0	1	3 1	336 .48	29.072. 282.66 2	12.4 52	1.544.0 00.000	30.616. 282.66 2	1.16 2	144.0 86.63 8	305. 319	26.379. 559.698	26.523. 646.33 6	4.092.6 36.326	114.0 00.00 0	3.534.0 00.000	
	2	2 8	334 .40	28.892. 357.16 1	10.3 93	1.288.7 14.286	30.181. 071.44 7	1.26 8	157.2 38.94 3	305. 319	26.379. 559.698	26.536. 798.64 1	3.644.2 72.806	114.0 00.00 0	3.192.0 00.000	
	3	31	289 .63	25.024. 252.547	8.54 8	1.060.0 00.000	26.084. 252.547	1.26 0	156.27 7.197	300. 092	25.927.9 75.350	26.084. 252.547	-	112.04 8.466	3.473.5 02.437	
	4	30	512 .90	44.315. 341.340	13.1 33	1.628.5 33.333	45.943. 874.673	1.13 6	140.82 0.990	305. 319	26.379.5 59.698	26.520. 380.688	19.423. 493.985	114.00 0.000	3.420.0 00.000	
	5	31	251 .78	21.754. 088.668	6.03 2	748.000 .000	22.502. 088.668	1.21 6	150.80 4.096	258. 695	22.351.2 84.573	22.502. 088.668	-	96.591 .697	2.994.3 42.612	
	6	30	212 .68	18.375. 921.701	6.40 0	793.600 .000	19.169. 521.701	1.28 7	159.63 1.854	220. 022	19.009.8 89.847	19.169. 521.701	-	82.151 .767	2.464.5 53.011	34.161. 928.88 9
	7	31	233 .79	20.199. 712.926	5.19 4	644.000 .000	20.843. 712.926	1.11 4	138.12 1.406	239. 648	20.705.5 91.520	20.843. 712.926	-	89.479 .789	2.773.8 73.456	
	8	31	246 .06	21.260. 281.190	9.29 0	1.152.0 00.000	22.412. 281.190	1.26 6	156.96 0.719	257. 585	22.255.3 20.471	22.412. 281.190	-	96.176 .986	2.981.4 86.554	
	9	30	274 .22	23.692. 775.242	9.30 0	1.153.2 00.000	24.845. 975.242	1.10 3	136.71 5.737	285. 987	24.709.2 59.505	24.845. 975.242	-	106.78 1.751	3.203.4 52.540	
	10	31	147 .10	12.710. 193.616	4.54 8	564.000 .000	13.274. 193.616	1.27 9	158.54 5.669	151. 801	13.115.6 47.947	13.274. 193.616	-	56.679 .637	1.757.0 68.745	
	11	30	201 .94	17.448. 245.937	10.7 67	1.335.0 66.667	18.783. 312.604	1.10 7	137.25 5.855	215. 811	18.646.0 56.748	18.783. 312.604	-	80.579 .452	2.417.3 83.565	
	12	31	157 .69	13.624. 442.160	8.69 7	1.078.4 00.000	14.702. 842.160	1.17 0	145.07 2.612	168. 493	14.557.7 69.547	14.702. 842.160	-	62.911 .805	1.950.2 65.970	

Sebelum dioptimalisasikan, debit andalan PLTA Koto Panjang adalah 305,319 m³/det yang didapatkan dari hasil perhitungan debit andalan PLTA eksis. Sedangkan setelah dioptimalisasikan, debit andalan yang digunakan adalah debit hasil analisa *mass curve*. Analisa *mass curve* menggunakan volume waduk aktif PLTA Koto panjang dalam perhitungannya.

Akibat perbedaan debit *outflow* tersebut maka volume *outflow*, volume total *outflow* dan daya yang dihasilkan setelah dioptimalisasi dengan

sebelum dioptimalisasi juga akan berbeda. Kt ada yang bernilai nol karena volume total *outflow* lebih besar dari volume total *inflow*. Maka perlu dilakukan penyesuaian debit *outflow* agar $Kt \geq 0$. Pada bulan Maret 2010 terlihat debit *outflow* sebesar 300,092 m³/det yang merupakan hasil penyesuaian debit *outflow* dengan volume air yang ada pada *storage* saat itu yaitu volume total *inflow* dikurangi dengan volume evaporasi.

Pada Tabel 7 diatas terlihat pada bulan Januari 2010 Kt tidak bernilai nol. Hal ini

dikarenakan volume *inflow* lebih besar dibandingkan dengan volume *outflow*. Sehingga debit *outflow* yang digunakan adalah debit andalan PLTA eksis yaitu 305,319 m³/det.

Berdasarkan tabel *water balance* dapat diketahui besar debit *outflow* PLTA yang didapat

dari debit andalan yang mana debit tersebut digunakan untuk menghasilkan daya listrik. Adapun hubungan prosentase debit andalan dengan daya listrik dapat dilihat pada Tabel 8 dan Gambar 8.

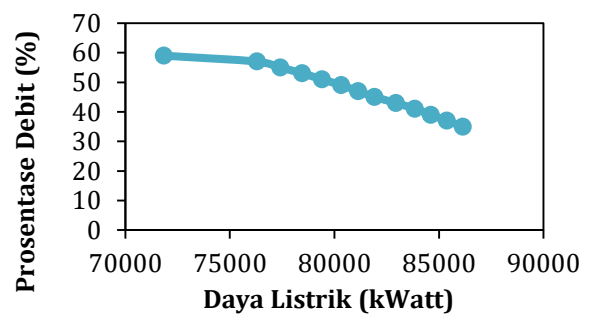
Tabel 8. Persen Debit Andalan (%) Vs Daya Listrik (kWatt)

Tahun	Daya Rata-Rata yang Dihasilkan per Hari Sesuai % Debit <i>Duration Curve</i> (K Watt)												
	Debit 35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59
2010	100.045 .394	99.567 038	99.088 681	98.610 324	98.131 967	97.035 122	96.071 977	95.155 713	94.239 449	93.323 185	92.110 706	90.726 278	89.199 171
2011	96.358 095	95.401 382	94.444 668	93.487 954	92.176 133	90.741 063	89.777 919	88.842 238	87.330 933	85.803 826	84.276 719	82.506 950	80.369 000
2012	82.856 303	81.899 590	80.942 876	79.986 162	79.029 449	78.072 735	77.430 639	76.819 796	76.168 752	75.252 488	74.336 224	73.419 960	40.316 889
2013	86.553 768	86.075 411	85.597 054	85.118 697	84.200 692	83.243 978	82.397 062	81.480 798	80.564 534	79.648 269	78.510 898	77.289 212	76.067 527
2014	77.433 310	76.954 953	76.476 596	75.998 239	74.903 449	73.946 736	73.304 640	72.669 841	71.753 577	70.837 312	69.921 048	69.004 784	68.088 520
2015	86.429 737	85.473 024	84.516 310	83.559 596	82.602 883	81.646 169	80.780 567	79.864 303	78.948 039	78.031 774	77.115 510	76.199 246	75.080 067
2016	65.793 869	64.837 155	63.880 442	62.923 728	61.967 014	61.010 301	60.368 204	59.757 362	59.146 519	58.535 676	57.924 833	57.313 990	56.703 147
2017	84.325 947	83.847 590	83.369 233	82.890 876	82.412 519	81.753 835	81.111 739	80.500 896	79.890 053	79.279 210	78.309 391	77.087 706	75.866 020
2018	93.659 250	92.702 536	91.745 823	90.789 109	89.832 395	88.574 866	87.611 722	86.560 618	85.338 932	84.117 247	82.895 561	81.673 875	80.164 272
2019	88.002 584	87.045 870	86.089 156	85.132 443	84.175 729	83.219 015	82.499 783	81.583 783	80.667 255	79.750 991	78.834 726	77.749 834	76.528 148
Rata-Rata	86.145 826	85.380 455	84.615 084	83.849 713	82.943 223	81.924 382	81.135 425	80.323 508	79.404 804	78.457 998	77.423 562	76.297 184	71.838 276

Tabel 8 merupakan tabel hasil perhitungan *water balance* debit andalan 35 %, 37 %, 39 %, 41%, 43%, 45%, 47%, 49%, 51%, 53%, 55%, 57% dan 59%. Pada Tabel 7 terlihat bahwa pada tahun 2010 daya rata-rata per hari dengan prosentase debit andalan 35 % adalah 100.045,394 kWatt dan daya rata-rata yang dihasilkan dengan prosentase tersebut selama 10 tahun dari tahun 2010 hingga tahun 2019 adalah 86.145,826 kWatt.

Berdasarkan hasil perhitungan debit andalan PLTA saat ini didapatkan prosentase debit andalan sebelum dioptimalisasi sebesar 51,995 % pada *duration curve* dan berdasarkan hasil perhitungan *mass curve* didapatkan prosentase debit andalan setelah dioptimalisasi adalah 39,235 %. Dari Tabel 7 di atas dengan menggunakan intervalasi dapat diketahui bahwa debit 39,235 % rata-rata daya yang mampu dihasilkan selama 10 tahun adalah sebesar 84.525,153 kWatt sedangkan debit 51,995 % yang merupakan debit andalan PLTA saat ini rata-rata daya yang mampu dihasilkan selama 10 tahun adalah sebesar 78.933,768 kWatt. Adapun grafik yang dapat dihasilkan dari tabel tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan hubungan daya listrik dengan prosentase debit andalan pada *duration curve*. Daya listrik 71.838,276 kWatt memiliki prosentase debit 59 % pada *duration curve*. Artinya daya 71.838,276 kWatt dapat terjadi selama $\frac{59}{100} \times 365$ hari yaitu 215,35 hari dalam 1 tahun. Sedangkan daya listrik 76.297,184 kWatt memiliki prosentase debit 57 % artinya daya tersebut dapat terjadi selama $\frac{57}{100} \times 365$ hari yaitu 208,05 hari dalam 1 tahun.



Gambar 8. Persen Debit Andalan (%) Vs Daya Listrik (kWatt)

Terlihat bahwa semakin besar prosentase debit andalan maka semakin kecil daya listrik yang dihasilkan. Artinya semakin besar prosentase debit andalan maka semakin kecil debit *outflow* yang dihasilkan untuk membangkitkan daya listrik yang mengakibatkan daya yang dihasilkan juga semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada hasil analisa debit andalan setelah dan sebelum dioptimalisasikan pada sub bab sebelumnya. Debit andalan sebelum dioptimalisasi memiliki prosentase 51,995 % dengan debit *outflow* yang dihasilkan yaitu 305,319 m³/det dan daya listrik rata-rata yang dihasilkan oleh debit *outflow* tersebut selama 10 tahun adalah sebesar 78.933,768 kWatt. Sedangkan Debit andalan setelah dioptimalisasi memiliki prosentase lebih rendah yaitu 39,235 % dengan debit *outflow* lebih besar dari debit *outflow* yang dihasilkan sebelum dioptimalisasi yaitu 384,465 m³/det dan daya listrik rata-rata yang mampu dihasilkan selama 10 tahun juga lebih besar yaitu 84.525,153 kWatt. Daya setelah dan sebelum dioptimalisasikan

selama 10 tahun tersebut memiliki selisih sebesar 5.591,385 kWatt.

Perbandingan Daya Setelah dan Sebelum Dioptimalisasikan

Pada Tabel 6 dan Tabel 7 dihasilkan besar daya listrik sebelum dan setelah dioptimalisasikan. Daya listrik yang dihasilkan dari tabel *water balance* setelah dan sebelum dioptimalisasikan tersebut dibuat perbandingannya. Perbandingan daya setelah dan sebelum dioptimalisasikan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9 merupakan tabel perbandingan daya yang dapat dibangkitkan PLTA Koto Panjang setelah dan sebelum dioptimalisasikan. Pada tabel terlihat perbandingan daya listrik selama 10 bulan pertama tahun 2010. Nilai debit *outflow* PLTA dan P_{hari} pada Tabel 9 sama dengan nilai debit *outflow* dan P_{hari} yang terdapat pada Tabel 6 yaitu tabel *water balance* untuk tahun 2010 setelah dioptimalisasikan dan Tabel 7 yaitu tabel *water balance* untuk tahun 2010 sebelum dioptimalisasikan.

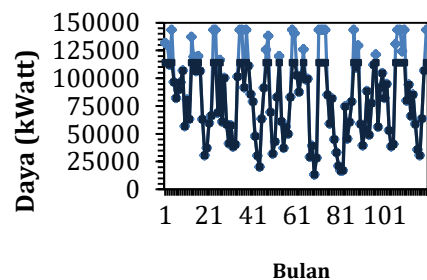
Tabel 9. Perbandingan Daya Setelah dan Sebelum Dioptimalisasikan

No	Bulan	Setelah Dioptimalisasikan				Sebelum Dioptimalisasikan			
		Debit <i>Outflow</i> PLTA	P_{hari}	Prosentase dari Daya Maks Generator	Jumlah Generator yang Bekerja	Debit <i>Outflow</i> PLTA	P_{hari}	Prosentase dari Daya Maks Generator	Jumlah Generator yang Bekerja
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Jan-10	352.687	131.686.442	91.449	4	305.319	114000.000	100.000	3
2	Feb-10	347.498	129.748.826	90.103	4	305.319	114000.000	100.000	3
3	Mar-10	300.092	112.048.466	77.811	3	300.092	112048.466	98.288	3
4	Apr-10	384.465	143.551.645	99.689	4	305.319	114000.000	100.000	3
5	May-10	258.695	96.591.697	67.078	3	258.695	96591.697	84.730	3
6	Jun-10	220.022	82.151.767	57.050	3	220.022	82151.767	72.063	3
7	Jul-10	239.648	89.479.789	62.139	3	239.648	89479.789	78.491	3
8	Aug-10	257.585	96.176.986	66.790	3	257.585	96176.986	84.366	3
9	Sep-10	285.987	106.781.751	74.154	3	285.987	106781.751	93.668	3
10	Oct-10	151.801	56.679.637	39.361	2	151.801	56679.637	49.719	2

Pada bulan April 2010 terlihat nilai P_{hari} setelah dioptimalisasikan yaitu 143.551,645 kWatt. Nilai daya tersebut melebihi kemampuan generator PLTA Koto Panjang yang hanya dapat menghasilkan daya maksimal 114 MW atau 114.000 kWatt. Sehingga dibutuhkan tambahan 1 generator 30 MW agar dapat membangkitkan daya sebesar 143.551,645 kWatt atau 143,552 MW. Generator 30 MW dibutuhkan karena dengan penambahan daya generator sebesar 30 MW maka daya maksimal yang dapat dibangkitkan oleh PLTA menjadi 144 MW atau 144.000 kWatt. Daya maksimal yang dihasilkan generator tambahan tersebut melebihi dan cukup untuk membangkitkan daya hasil optimalisasi yaitu sebesar 143.551,645 kWatt atau 143,552 MW.

Pada bulan Januari 2010 dapat diketahui nilai prosentase dari daya maksimum generator setelah dioptimalisasikan adalah 91,449 % dengan jumlah generator yang bekerja adalah 4 generator. Sedangkan nilai prosentase dari daya maksimum generator sebelum dioptimalisasikan adalah 100 % dengan jumlah generator yang bekerja adalah 3

generator. Pada bulan Oktober 2010 terlihat nilai prosentase dari daya maksimum generator setelah dioptimalisasikan adalah 39,361 % dengan jumlah generator yang bekerja adalah 2 generator. Jumlah generator tersebut sama dengan jumlah generator yang bekerja pada kondisi sebelum dioptimalisasikan namun nilai prosentase dari daya maksimum generator berbeda yaitu 49,719 %. Adapun grafik perbandingan daya sebelum dan setelah dioptimalisasikan dapat dilihat pada Gambar 9.



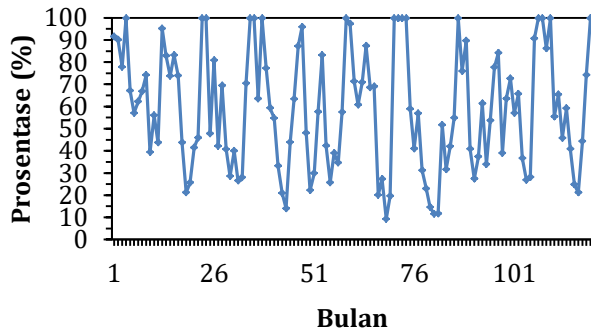
Gambar 9. Grafik Perbandingan Daya Setelah dan Sebelum Dioptimalisasikan

Keterangan :

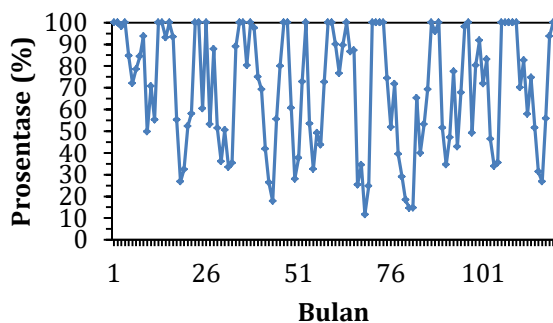
- Daya PLTA sebelum dioptimalisasikan
- Daya PLTA setelah dioptimalisasikan

Pada Gambar 9 pada bulan ke-1 yaitu bulan Januari 2010 besar daya yang dihasilkan adalah 131.686,442 kWatt setelah dioptimalisasi dan 114.000 kWatt sebelum dioptimalisasi. Pada gambar terlihat bahwa daya listrik setelah dioptimalisasikan mengalami peningkatan dibandingkan dengan daya listrik sebelum dioptimalisasikan. Namun pola garis daya yang dihasilkan setelah dioptimalisasi umumnya memiliki kecenderungan yang sama dengan pola garis daya yang dihasilkan sebelum dioptimalisasi. Daya listrik sebelum dan sesudah dioptimalisasikan juga dilakukan perbandingan prosentasenya terhadap daya listrik maksimal yang dihasilkan. Hasil dari tabel diplot kedalam grafik yang dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Gambar 10 merupakan grafik prosentase daya yang dihasilkan terhadap daya maksimal yaitu 144 MW yang bekerja dengan 3 generator 38.000 kWatt dan 1 generator 30.000 kWatt. Sedangkan Gambar 11 merupakan grafik prosentase daya yang dihasilkan terhadap daya maksimal yaitu 114 MW yang bekerja dengan 3 generator 38.000 kWatt. Pada Gambar 10 dan Gambar 11 di atas terlihat bahwa pola garis prosentase yang dihasilkan setelah dioptimalisasi dan sebelum dioptimalisasi umumnya memiliki kecenderungan yang sama.



Gambar 10. Grafik Prosentase Daya Terhadap Daya Maksimal (144 MWatt) Setelah Dioptimalisasi (Bekerja dengan 4 Generator)



Gambar 11. Grafik Prosentase Daya Terhadap Daya Maksimal (114 MWatt) Sebelum Dioptimalisasi (Bekerja dengan 3 Generator)

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan debit andalan dan *mass curve* didapatkan 305,319 m³/det dengan prosentase 51,995 % pada *duration curve* untuk debit andalan PLTA saat ini dan 384,465 m³/det dengan prosentase 39,235 % pada *duration curve* untuk debit andalan PLTA setelah dioptimalisasi. Optimalisasi yang dilakukan pada PLTA Koto Panjang yaitu dengan cara menyesuaikan debit *outflow* dengan volume air yang ada pada *storage* saat itu yaitu volume total *inflow* yang dikurangi volume evaporasi. Debit *outflow* yang digunakan adalah debit andalan hasil analisa *mass curve* sebesar 384,465 m³/det yang dalam perhitungannya menggunakan volume waduk aktif PLTA Koto Panjang. Hasil dari penyesuaian ini terlihat pada kolom K_t (volume tampungan atau volume berlebih dalam sehari) yang bernilai nol pada tabel *water balance*. Daya listrik setelah dioptimalisasi adalah sebesar 13.302,315 kWatt pada musim kering dan 143.551,645 kWatt pada musim hujan. Daya listrik di kedua musim tersebut memiliki selisih sebesar 130.249,33 kWatt. Daya listrik yang dihasilkan PLTA saat ini adalah sebesar 13.302,315 kWatt pada musim kering dan 114.000 kWatt pada musim hujan. Sehingga daya listrik yang dihasilkan PLTA setelah dioptimalisasi mengalami kenaikan dari daya listrik sebelum dioptimalisasi. Karena kenaikan daya melebihi kapasitas generator PLTA saat ini, maka terjadi penambahan 1 generator 30.000 kWatt atau 30 MW.

REFERENSI

- [1] Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*. Jakarta, Indonesia: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/144525/permen-pupr-no-27prtm2015-tahun-2015>, 2015.
- [2] T. M. Nuramini, "Studi Optimasi Pola Pengoperasian Waduk Bajulmati," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [3] D. D. Adhistana, "Rencana Pengoperasian Yang Optimum Pada Potensi Air Waduk Selorejo Untuk Pembangkit Listrik dan Irigasi," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [4] D. A. Arismunandar and D. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik Jilid 1 Pembangkitan Dengan Tenaga Air*. Jakarta: PT Pradnya Paramita, 2000.
- [5] Tim Penyusun Kamus Pembinaan dan Pengembangan Bahasa, *Kamus Besar Bahasa Indonesia*, Kedua. Jakarta: Balai Pustaka, 1999.
- [6] N. Safitri and Suryati, *Analisa Rangkaian Listrik (Teori Dasar, Penyelesaian Soal dan*

- Soal-Soal Latihan). Politeknik Negeri Lhokseumawe, 2017.
- [7] O. F. Patty, *Tenaga Air*, Pertama. Jakarta: Erlangga, 1995.
- [8] Suripin, *Sistem Drainase Perkotaan Yang Berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi Offset, 2004.
- [9] K. Mori and Dkk, *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta: PT Pradnya Paramita, 2006.
- [10] R. K. Linsley and J. B. Franzini, *Teknik Sumber Daya Air Jilid 1*, Ketiga. Jakarta: Erlangga, 1985.
- [11] S. Sosrodarsono and T. Kensaku, *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: PT Pradnya Paramita, 1981.
- [12] L. W. Mays and Y.-K. Tung, *Hydrosystems Engineering and Management*. McGraw-Hill, Inc, 1992.
- [13] C. S. Samosir, W. Soetopo, and E. Yuliani, "Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)," *Tek. Pengair.*, vol. 06, no. 1, pp. 108-115, 2015.
- [14] D. permukiman dan P. Wilayah, *Pengoperasian Waduk Tunggal Pd T-25-2004-A*. Indonesia, 2004.
- [15] M. Kurniawan, "Optimasi Struktur Rangka Batang Menggunakan Metode Algoritma Genetika Dengan Kendala Tegangan Dan Probabilitas Kegagalan," *J. Sainstis*, vol. 19, no. 1, pp. 15-23, 2019, doi: 10.25299/sainstis.2019.vol19(1).3043.
- [16] D. P. Loucks and Dkk, *Water Resource Systems Planning And Analysis*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1981.
- R = Range
- T = Masa ulang
- T = Temperatur ($^{\circ}C$)
- V = Volume air (m^3)
- V = Kecepatan angin pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah (mile/hari)
- a_{max} = Nilai data terbesar
- a_{min} = Nilai data terkecil
- e = Tekanan uap pada waktu pengukuran (mb atau mmHg)
- g = Percepatan gaya berat = 9,8 (m/detik)
- k = Banyaknya kelas interval
- m = Nomor urut data
- n = Jumlah data yang diolah
- p = Tekanan uap jenuh (mmHg)
- t = Waktu (detik)
- ρ = Masa jenis air = 1000 (kg/m^3)

NOMENKLATUR

- EV_t = Evaporasi (penguapan) yang terjadi di tampungan (m^3)
- K_t = Tampungan yang dapat disimpan dimana pada periode $t = 0$, nilai $K_t = 0$ (m^3)
- K_{t-1} = Tampungan yang dapat disimpan sebelum periode t (m^3)
- PP_t = Presipitasi (hujan) yang jatuh di atas tampungan (m^3)
- QF_t = Debit dari sungai yang masuk tampungan (m^3)
- QF_{ta} = Inflow dari tampungan (m^3)
- R_t = Outflow (m^3)
- e_a = Tekanan uap jenuh pada suhu rata-rata harian (mmHg)
- e_d = Tekanan uap sebenarnya (mmHg)
- E = Tekanan uap jenuh (mb atau mmHg)
- E = Evaporasi (mm/hari)
- H = Perbedaan muka air (m) atau tinggi jatuh air efektif (m)
- H = Kelembaban relatif (%)
- P = Besarnya probabilitas (%)
- P = Daya (kWatt atau MWatt)
- Q = Debit air (m^3/det)

This page is intentionally blank