



Optimalisasi Produksi Listrik PLTA Sutami Berdasarkan Ketersediaan Energi Primer

Hasyiyati Zakirah Masturah¹, Subairi², Rahman Arifuddin³

^{1,2,3} Universitas Merdeka Malang, Indonesia

Email : hasyyatizm04@gmail.com¹, subairi@unmer.ac.id², rahman.arifuddin@unmer.ac.id³

Abstract: The Sutami Hydroelectric Power Plant managed by PLN Nusantara Power UP Brantas is one of the power plants that relies on air resources to generate electricity. However, the optimization of electricity production can still be improved by considering the availability of primary energy and the interests of related stakeholders. This study aims to create a simulation of operating patterns to optimize the daily electricity production of the Sutami Hydroelectric Power Plant using the MS Excel Solver program. The total electrical energy in March based on the results of the simulation calculation was 56,537,445.55 MWh, 3.09% greater than the actual data of 54,792,800 MWh. The results of the simulation calculation of electricity production in June 2024 were 27,564,315.75 MWh, 3.82% greater than the actual data of 26,511,800 MWh. In FDC 2014-2023, the average mainstay discharge is 32 m³/s available throughout the year to be utilized by water turbines to produce a minimum power of 20 MW. Meanwhile, from the estimated historical data obtained by FDC 2024-2033 with an average mainstay discharge of 40.68 m³/s to produce a minimum power of 30 MW.

Keywords: Water Availability, Mainstay Discharge, Flow Duration Curve (FDC), Solver, Electricity Production.

Abstrak: PLTA Sutami, yang dikelola oleh PLN Nusantara Power UP Brantas, merupakan salah satu pembangkit listrik yang mengandalkan sumber daya air untuk menghasilkan listrik. Namun, optimalisasi produksi listrik masih dapat ditingkatkan dengan mempertimbangkan ketersediaan energi primer dan kepentingan stakeholder terkait. Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi pola operasi untuk mengoptimalkan produksi Listrik harian PLTA Sutami dengan menggunakan program MS Excel Solver. Total energi listrik pada bulan Maret berdasarkan hasil simulasi perhitungan adalah 56.537.445,55 MWh, lebih besar 3.09 % dibandingkan dengan data aktual sebesar 54.792.800 MWh. Hasil simulasi perhitungan produksi listrik pada bulan Juni 2024 sebesar 27.564.315,75 MWh, lebih besar 3.82 % dibandingkan dengan data aktual sebesar 26.511.800 MWh. Pada FDC tahun 2014-2023 menunjukkan debit andalan rata-rata sebesar 32 m³/s yang tersedia sepanjang tahun untuk dimanfaatkan turbin air menghasilkan daya minimum 20 MW. Sedangkan dari hasil forecast data historis di dapatkan FDC tahun 2024-2033 dengan rata-rata debit andalan 40.68 m³/s untuk menghasilkan daya minimum 30 MW.

Kata Kunci : Ketersediaan Air, Debit Andalan, Flow Duration Curve (FDC), Solver, Produksi Listrik.

1. LATAR BELAKANG

PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Brantas (PLN NP UP Brantas) memiliki 13 pembangkit Listrik tenaga air yang tersebar di lima kabupaten di provinsi Jawa Timur yaitu Malang, Blitar, Tulungagung, Ponorogo, dan Madiun. Total kapasitas terpasang 291 MW dengan produksi energi Listrik yang dibangkitkan rata-rata per tahun sekitar 1100 GWh. Dalam satu tahun operasi, sekitar 45% rata-rata produksi UP Brantas diperoleh dari PLTA Sutami yang merupakan PLTA terbesar yang dimiliki PLN NP UP Brantas.

Pemanfaatan air untuk pembangkit Listrik tidak gratis. Sejumlah biaya harus dikeluarkan atas pengelolaan sumber daya air atau lebih dikenal dengan Biaya Jasa Pengelolaan Sumber Daya Air (BJPSDA) yang dipungut oleh PJT I. selain itu juga dikenakan biaya Pajak Permukaan Air (PAP) yang dipungut oleh pemda setempat sesuai dengan perda masing-masing kabupaten. BJPSDA dan PAP dipungut berdasarkan jumlah kWh yang dibangkitkan.

Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya *head* dan debit air. Dalam hubungan dengan *reservoir* air maka *head* adalah beda ketinggian antara muka air pada *reservoir* dengan muka air keluar dari kincir air /turbin air. Total energi yang tersedia dari suatu *reservoir* air adalah merupakan energi potensial air (A. Primadi, 2017).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Potensi Tenaga Air

Dalam pembangkit Listrik tenaga air, potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga listrik. Potensi tenaga air dikonversikan menjadi tenaga mekanik di turbin air, turbin air memutar poros generator hingga generator membangkitkan energi Listrik. Sumber tenaga air perlu disurvei potensinya, sebelum dimanfaatkan untuk membuat instalasi turbin air. Data sumber air yang perlu diketahui adalah beda ketinggian permukaan air atau kontur ketinggian dan kapasitas aliran. Umumnya suatu sumber tenaga air misalkan Sungai, kapasitas alirannya berubah-ubah tergantung dari besar kecilnya curah hujan di daerah tangkapan air serta beberapa factor lain.

Flow Duration Curve

Untuk mendapatkan gambaran debit selama beberapa tahun misalkan periode tertentu, dapat digunakan lengkung debit. Debit air tidak dapat diharapkan konstan, selalu berubah setiap waktu. Perubahan ini disebabkan karena perubahan musim, perubahan bentuk penampang saluran/Sungai akibat pengikisan atau erosi, penggunaan air yang bervariasi (untuk pengairan, industri, perikanan, atau keperluan lain) serta sebab lain yang sukar diramalkan seperti sifat-sifat geografis setempat. Untuk mendapatkan gambaran dari debit suatu sumber energi air, perlu dibuat kurva, seperti kurva laju aliran, kurva hydrograph dan lengkung debit (*flow duration curve*).

Debit Andalan

Debit andalan dapat diartikan sebagai debit yang tersedia sepanjang tahun dengan faktor kegagalan tertentu. Berdasarkan buku limantara (Lily Montarcih Limantara, 2018), besarnya debit andalan untuk berbagai keperluan adalah sebagai berikut :

Tabel 1 Debit Andalan

Keperluan	Prosentase	Keterangan
Air Minum	99%	Seringkali mendekati 100%
Industri	95-98%	
Irigasi	70-85%	Setengah lembap
	80-95%	Kering
PLTA	85-90%	

Waduk PLTA Sutami

Waduk menurut pengertian umum adalah tempat pada permukaan tanah yang digunakan untuk menampung air saat terjadi kelebihan air / musim penghujan sehingga air itu dapat dimanfaatkan pada musim kering. Sumber air waduk terutama berasal dari aliran permukaan ditambah dengan air hujan langsung.

Pola Operasi Waduk

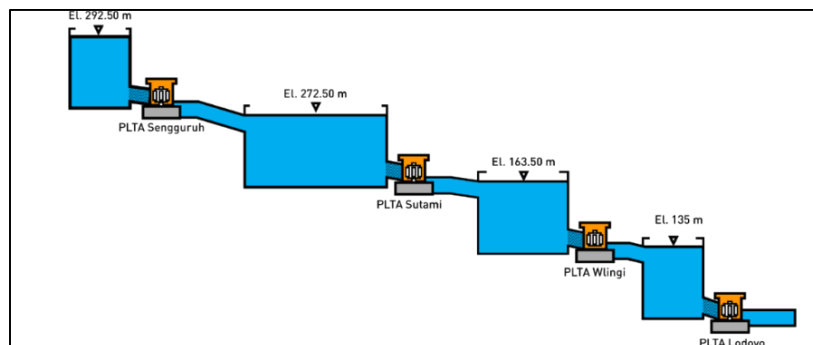
Operasi waduk (*reservoir operation*) adalah penampungan aliran air Sungai ke dalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan air yang telah ditampung tersebut untuk berbagai tujuan tertentu. Sedangkan pola operasi adalah patokan operasional periode suatu waduk Dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk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

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Di dalam survey pendahuluan ini, yang utama adalah mengetahui situasi dan kondisi daerah studi. Dalam kegiatan ini dapat diketahui masalah-masalah yang ada secara umum. Gambaran mengenai kondisi daerah yang akan di survey adalah dasar perencanaan dalam menentukan pola operasi PLTA Sutami. Hal tersebut disebabkan karena setiap daerah atau setiap lokasi mempunyai suatu karakteristik yang tidak sama dengan daerah lainnya. Studi literatur meliputi kegiatan mempelajari bagaimana pengoperasian suatu waduk dan PLTA, baik itu dari buku-buku maupun dari pihak yang terkait.

PLTA Sutami merupakan pembangkit Listrik di bawah pengelolaan PLN NP UP Brantas. PLTA ini merupakan salah satu pembangkit yang memanfaatkan potensi air sungai Brantas yang terletak sekitar 35 kilometer di sebelah Selatan Kota Malang dengan ketinggian 272 meter di atas permukaan di atas permukaan laut dengan kapasitas daya yang dihasilkan 3 X 35 MW, yang ditransmisikan ke SUTT 154 kV.



Gambar 1 Cascade PLTA Sutami

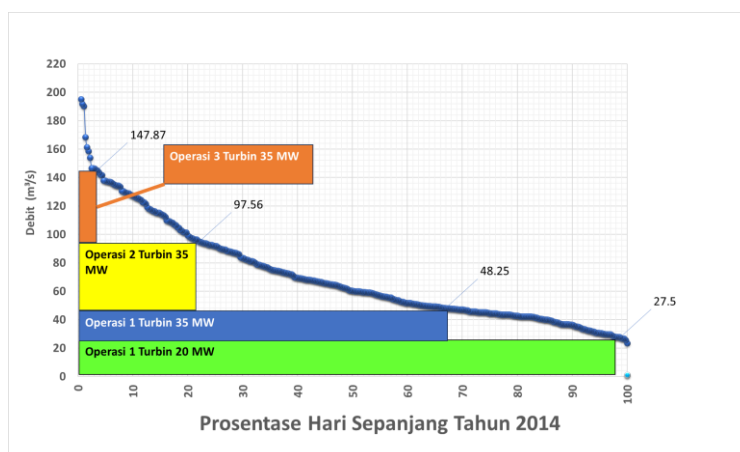
Pada Gambar 1 terlihat bahwa PLTA Sutami beroperasi untuk dimanfaatkan kembali energi primernya oleh PLTA yang ada di bawah cascadenya agar terpenuhi kebutuhan air di hilir. Produksi energi Listrik PLTA Sutami dibangkitkan dari energi potensial waduk sebagai energi primer yang ketersediaannya tergantung dengan kondisi musim. Pada musim hujan air melimpah dan mampu untuk menggerakkan seluruh mesin PLTA dengan beban maksimum, namun pada musim kering daya yang dibangkitkan tergantung ketersediaan air serta pola operasi yang ditentukan oleh PJT I sebagai pengelola waduk. Biaya Jasa Pengelolaan Sumber Daya Air (BJPSDA) dibebankan kepada UP Brantas untuk setiap kWh yang dibangkitkan dengan tarif sesuai Keputusan Menteri PUPR Nomor : 274/KTPS/M/2018.

Pola Operasi Waduk dan Alokasi Air (POWAA) dibuat untuk digunakan sebagai pedoman pengaturan air pada kondisi normal (bukan kondisi banjir) selama 6 bulan. Untuk operasional di lapangan dibuat program yang lebih rinci dan disesuaikan terhadap perkembangan kondisi actual. POWAA dibuat 2 kali dalam setahun yaitu untuk musim hujan, berlaku mulai awal bulan Desember s/d akhir bulan Mei. Untuk musim kemarau, berlaku mulai awal bulan Juni s/d akhir bulan Nopember.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Flow Duration Curve

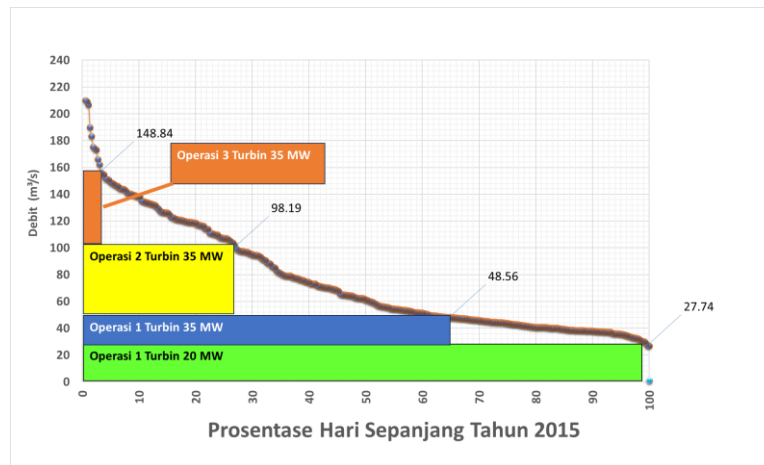
Data historis tahun 2014-2023 menghasilkan Flow Duration Curve (FDC) yang dapat menunjukkan hubungan antara nilai debit untuk pembangkitan dengan durasi waktu tiap tahun. Informasi yang dapat diperoleh dari FDC yakni berupa debit andalan dan potensi energi untuk membangkitkan energi listrik.



Gambar 2 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2014

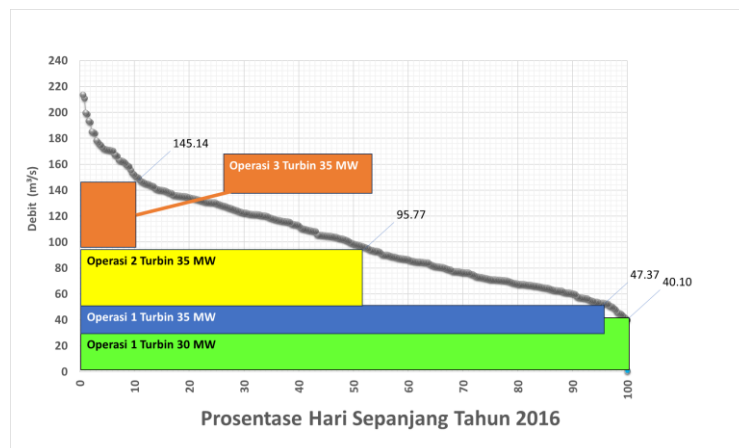
Gambar 2 diatas menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2014 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2014 sebesar 27.5

m³/s dan potensi daya dapat dibangkitkan minimal 20 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 244 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 75 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 9 hari.



Gambar 3 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2015

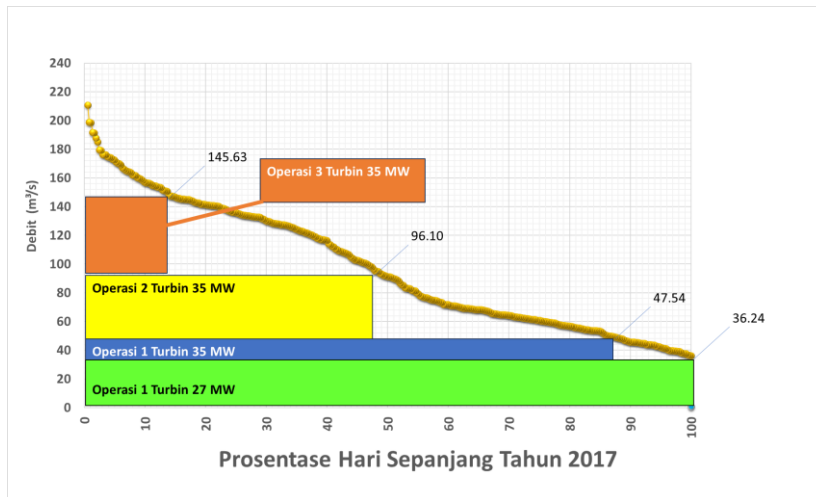
Gambar 3 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2015 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2015 sebesar 27.74 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 20 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 234 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 101 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 19 hari.



Gambar 4 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2016

Gambar 4 enunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2016 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2016 sebesar 40.10 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 30 MW. Satu tubin dapat dioperasikan 30 MW sepanjang tahun, Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 357 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 191 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan

sebesar 35 MW tiap unitnya selama 42 hari.



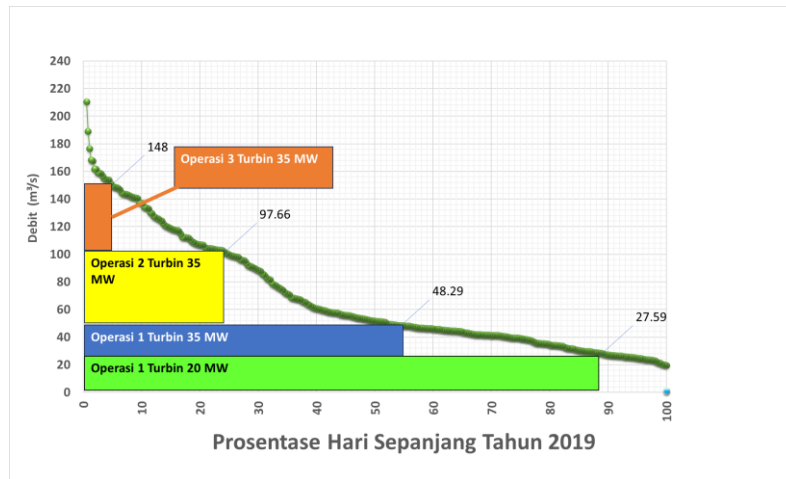
Gambar 5 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2017

Gambar 5 enunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2017 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2017 sebesar 36.24 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 27 MW. Satu turbin dapat dioperasikan dengan 27 MW sepanjang tahun, satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 324 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 174 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 58 hari.



Gambar 6 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2018

Gambar 6 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2018 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2018 sebesar 27.36 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 20 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 259 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 117 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 41 hari.



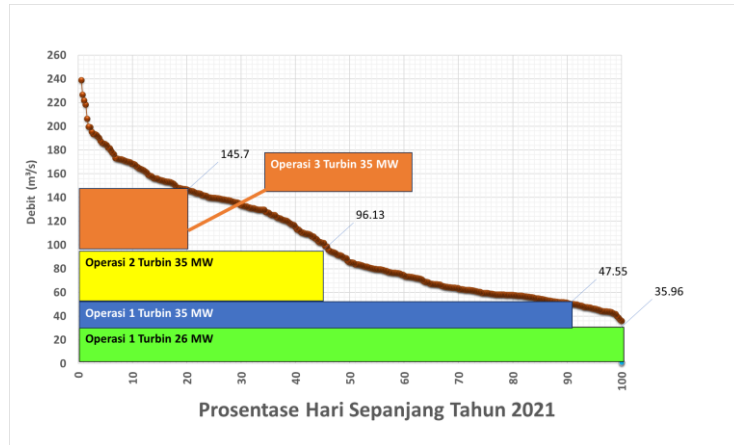
Gambar 7 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2019

Gambar 7 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2019 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2019 sebesar 27.59 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 20 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 201 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 98 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 21 hari.



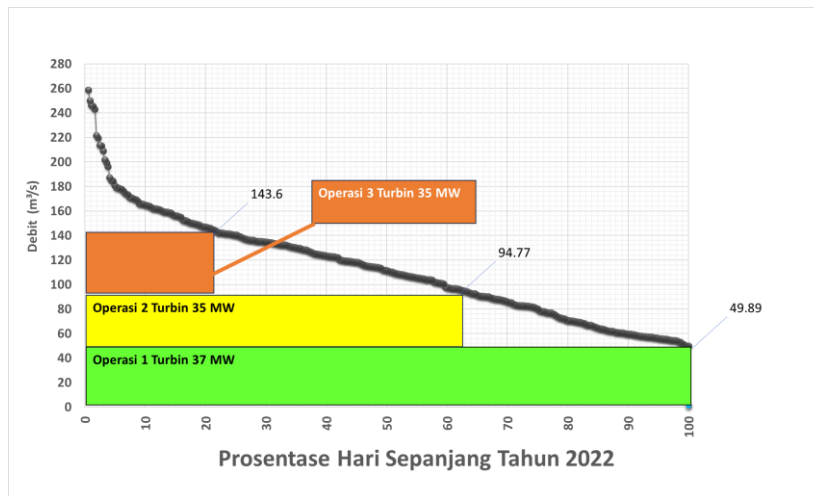
Gambar 8 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2020

Gambar 8 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2020 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2020 sebesar 31.83 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 23 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 23 MW sepanjang tahun, dapat dioperasikan 35 MW selama 280 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 85 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 15 hari.



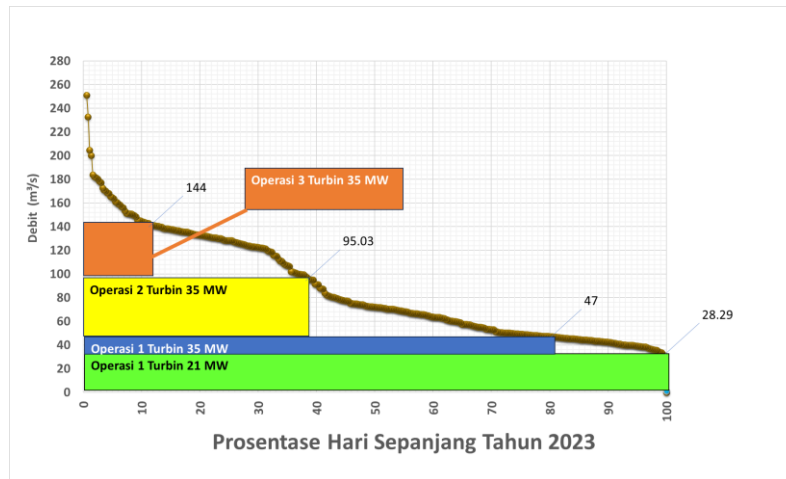
Gambar 9 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2021

Gambar 9 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2021 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2021 sebesar 35.96 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 26 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 26 MW sepanjang tahun, satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 341 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 168 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 75 hari.



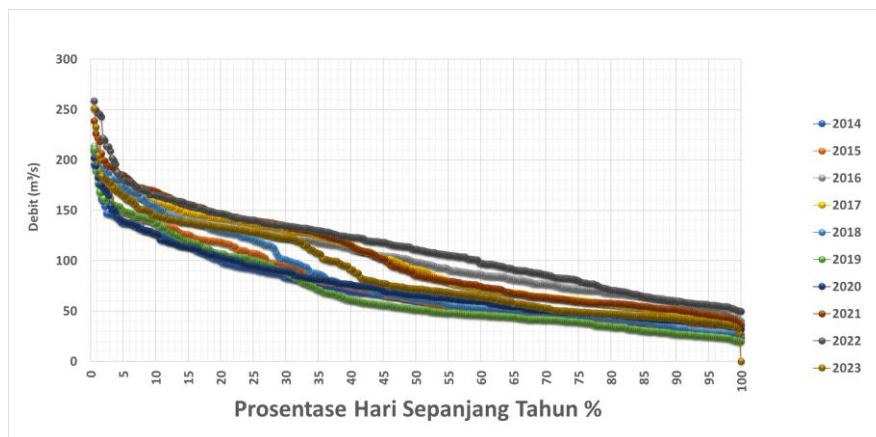
Gambar 10 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2022

Gambar 10 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2022 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2022 sebesar 49.89 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 37 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 37 MW sepanjang tahun dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 229 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 79 hari.



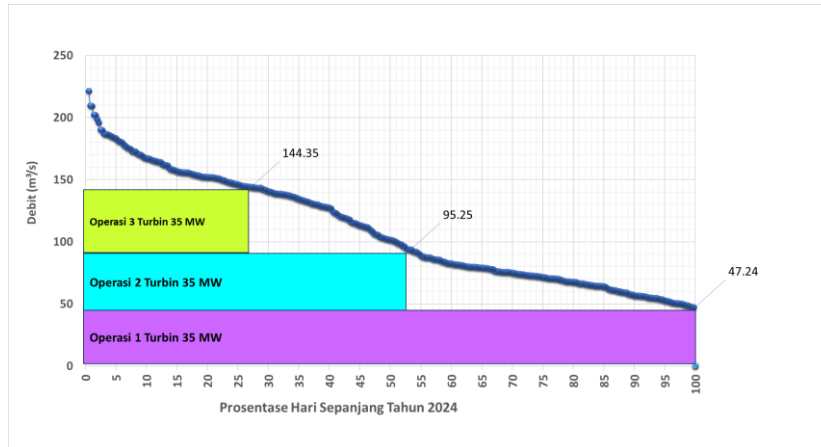
Gambar 11 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2023

Gambar 11 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2023 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2023 sebesar 28.29 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan minimal 21 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 294 hari dan dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 143 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 38 hari.



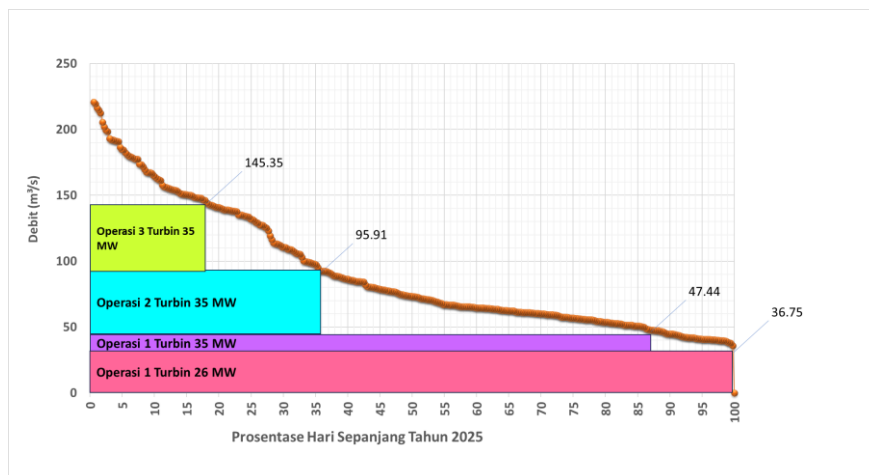
Gambar 12 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2014-2023

Gambar 12 menunjukkan pola FDC dari tahun 2014-2023 yang dapat digunakan untuk melakukan forecasting kondisi FDC beberapa tahun ke depan menggunakan fasilitas *forecast sheet* pada *Microsoft excel*. Hasil forecasting dapat menunjukkan FDC di tahun 2024-2033 seperti pada gambar di bawah ini.



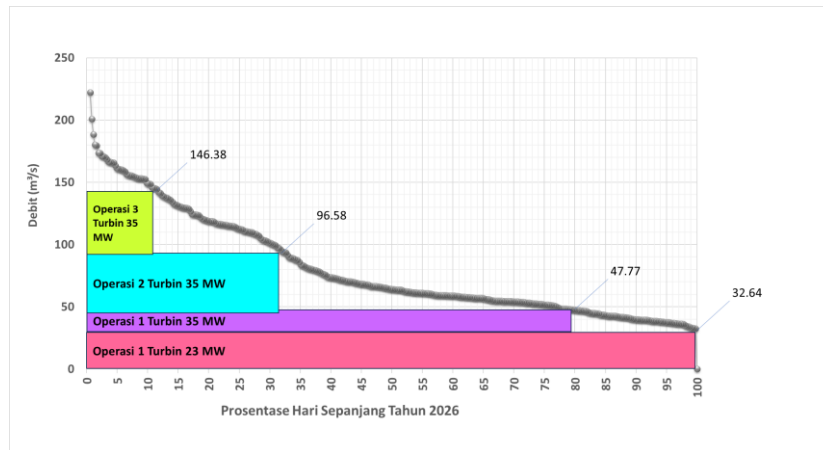
Gambar 13 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2024

Gambar 13 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2024 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2024 sebesar 47.24 m³/s dan potensi daya yang dibangkitkan 35 MW sepanjang tahun untuk 1 turbin, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 192 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 98 hari.



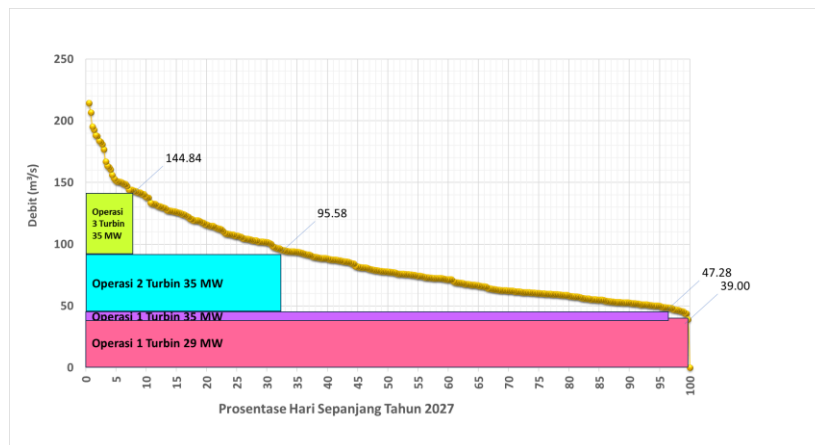
Gambar 14 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2025

Gambar 14 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2025 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2025 sebesar 36.75 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 26 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 320 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 129 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 66 hari.



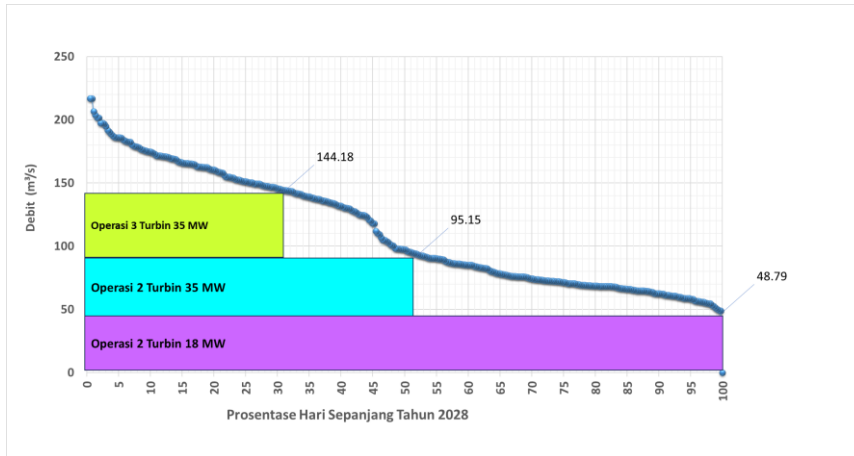
Gambar 15 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2026

Gambar 15 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2026 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2026 sebesar 32.64 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 23 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 291 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 115 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 39 hari.



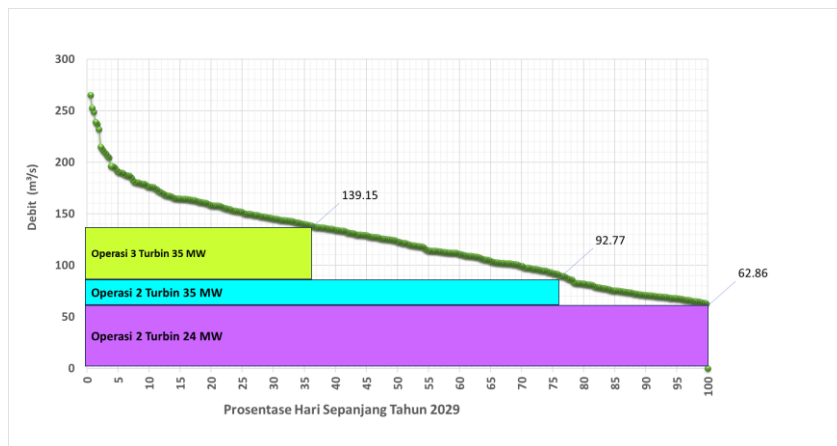
Gambar 16 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2027

Gambar 16 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2027 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2027 sebesar 39.00 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 29 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 355 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 118 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 26 hari.



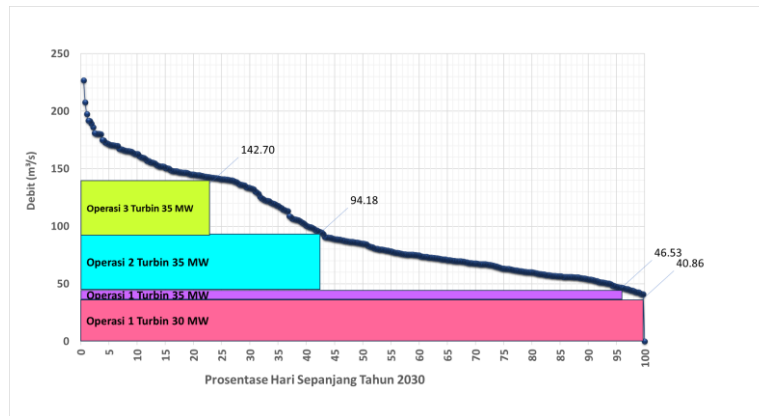
Gambar 17 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2028

Gambar 17 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2028 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2028 sebesar 48.79 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 2 X 18 MW. Dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 187 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 114 hari.



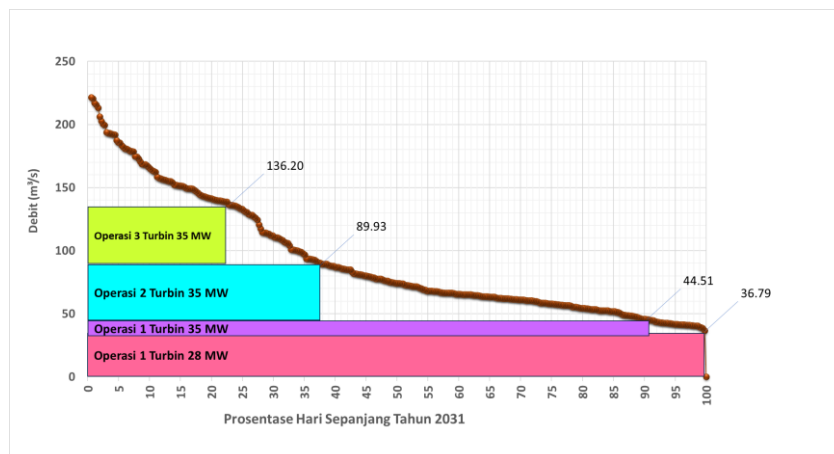
Gambar 18 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2029

Gambar 18 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2029 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2029 sebesar 62.86 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 2 X 24 MW. Dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 273 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 130 hari.



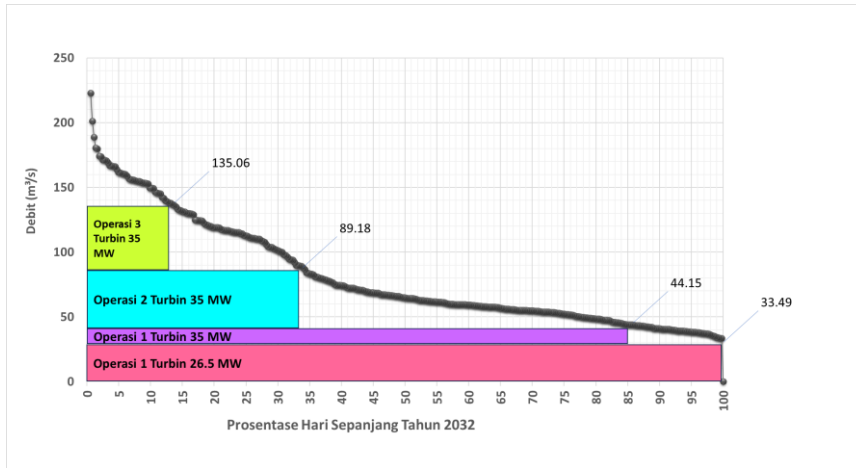
Gambar 19 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2030

Gambar 19 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2030 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2030 sebesar 40.86 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 30 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 350 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 156 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 83 hari.



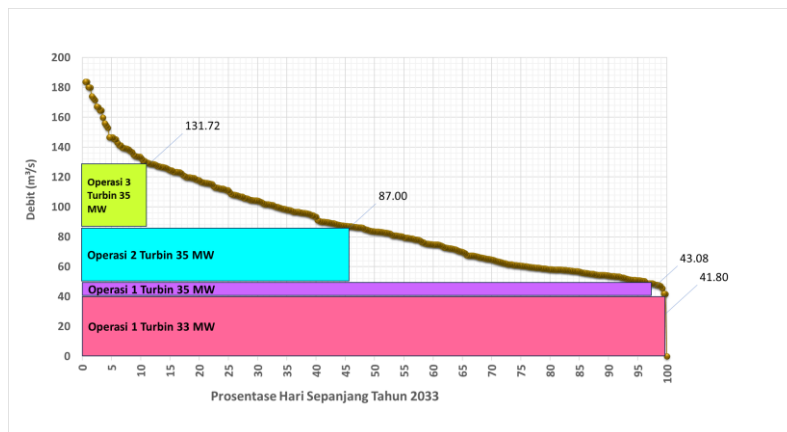
Gambar 20 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2031

Gambar 20 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2031 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2031 sebesar 36.79 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 28 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 334 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 137 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 85 hari.



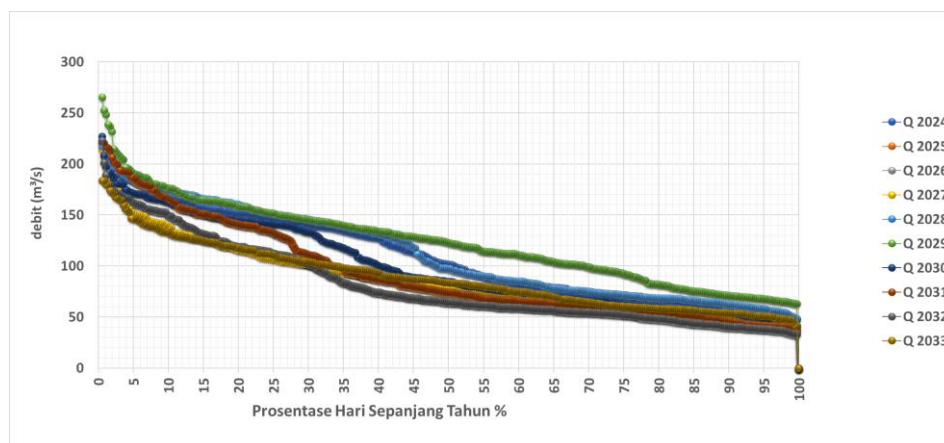
Gambar 21 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2032

Gambar 21 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2032 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2032 sebesar 33.49 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 26.5MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 310 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 123 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 51 hari.



Gambar 22 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2033

Gambar 22 menunjukkan pola operasi turbin sepanjang tahun 2033 dengan memperhatikan ketersediaan air yang masuk ke waduk. Debit andalan tahun 2033 sebesar 41.80 m³/s dan potensi daya minimal yang dibangkitkan 33 MW. Satu turbin dapat dioperasikan 35 MW selama 363 hari, dua turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 168 hari. Tiga turbin dapat dioperasikan sebesar 35 MW tiap unitnya selama 38 hari.



Gambar 23 Hubungan antara debit dan durasi waktu di tahun 2024-2033

Gambar 23 menunjukkan pola FDC dari tahun 2024-2033 yang di dapatkan dari hasil *forecast seasonality* dari data historis 10 tahunan dengan debit andalan rata-rata 40.68 m³/s untuk membangkitkan minimal 1 turbin dengan daya rata-rata 30 MW.

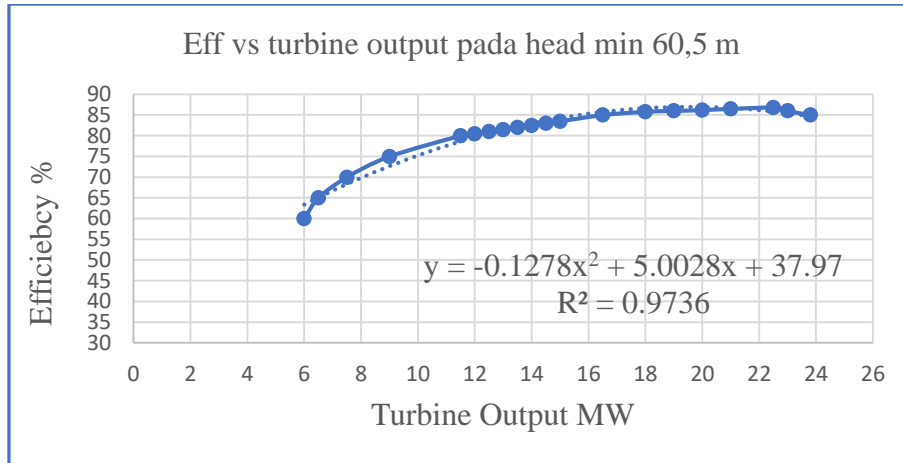
Simulasi Operasi PLTA Sutami

Simulasi operasi yang digunakan pada penelitian ini yakni menggunakan program *solver* pada *Ms.Excel*. konsep yang digunakan pada program tersebut meliputi *objective function*, *variable design* dan *constraint*. Perhitungan energi menggunakan persamaan grafik *polynomial* orde dua pada karakteristik turbin. Formula untuk *Turbine Discharge* terhadap variasi *head* dan efisiensi terhadap variasi *head* menggunakan persamaan *polynomial* orde 2 pada grafik karakteristik dengan kombinasi prinsip logika *IF* dan *AND*.

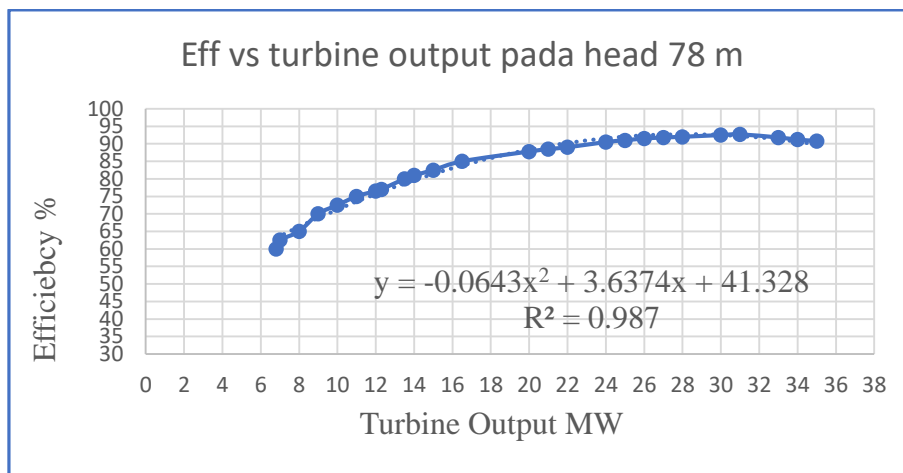
A. Grafik Karakteristik Turbin

Karakteristik turbin francis yang dimiliki PLTA Sutami berdasarkan pada hasil pengujian pemodelan di *Hydraulik Research Laboratoty of Tokyo Shibaura Electric Co.Ltd*, Tokyo, Japan. Pengujian prototype turbin tersebut menghasilkan grafik yang menghubungkan beberapa parameter antara lain efisiensi, *discharge turbin*, *head*, dan *power output*. Unjuk kerja dari turbin ini dilakukan pada 4 head konstan yaitu pada head 60.5 m, 78 m, 85.4 m dan 89.7 m.

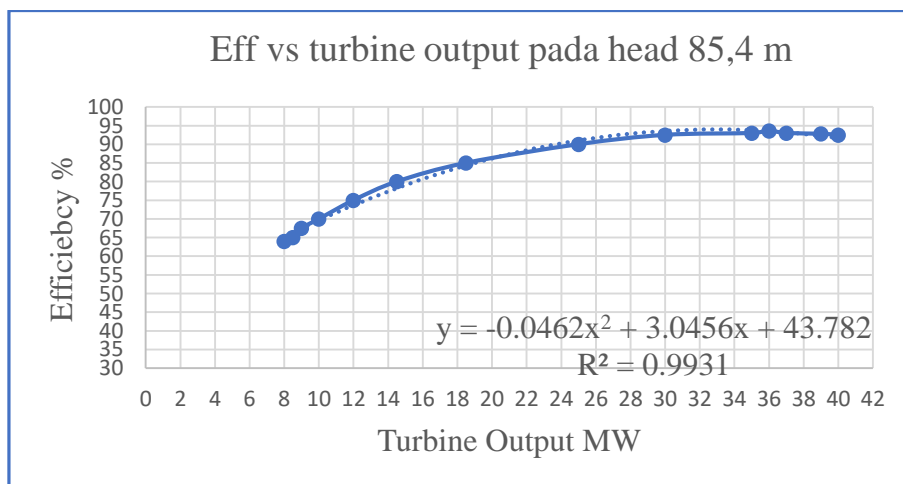
a. Grafik Hubungan Antara Efisiensi dengan Turbin Output



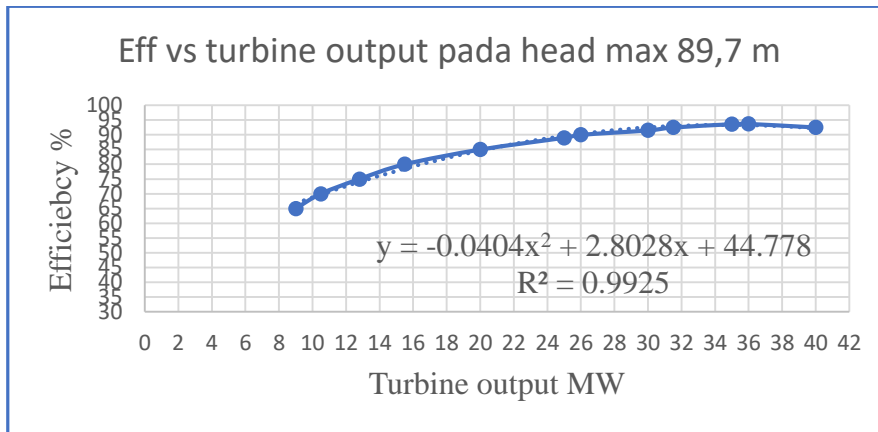
Gambar 24 Hubungan antara Efisiensi dan Turbine Output pada Head 60,5 m



Gambar 25 Hubungan antara Efisiensi dan Turbine Output pada Head 78 m

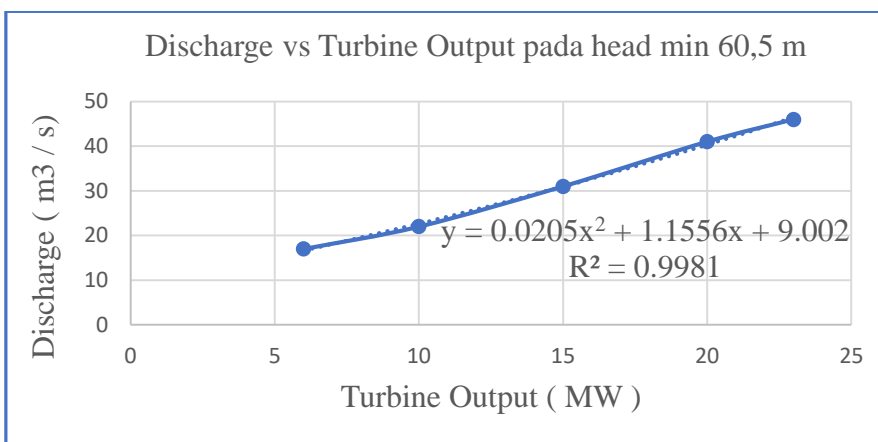


Gambar 26 Hubungan antara Efisiensi dan Turbine Output pada Head 85,4 m

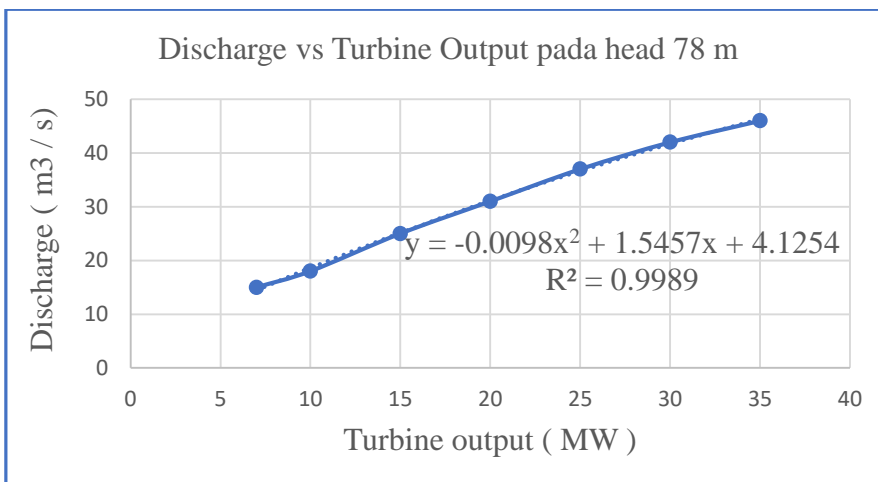


Gambar 27 Hubungan antara Efisiensi dan Turbin Output pada Head 89,7 m

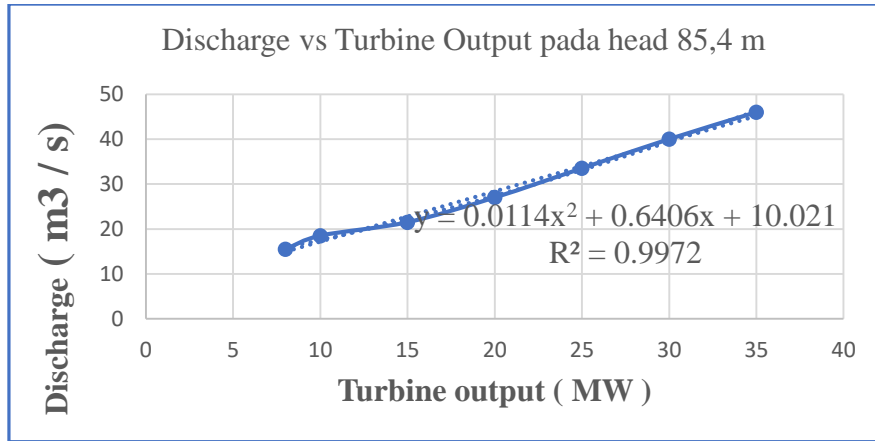
b. Grafik Discharge Turbin Vs Power Output



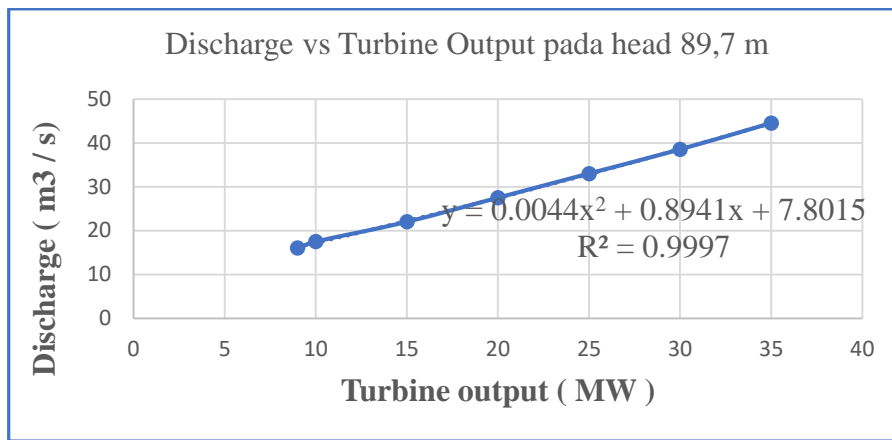
Gambar 28 Hubungan antara Discharge vs Turbine Output pada Head 60,5 m



Gambar 29 Hubungan antara Discharge vs Turbine Output pada Head 78 m



Gambar 30 Hubungan antara Discharge vs Turbine Output pada Head 85,4 m



Gambar 31 Hubungan antara Discharge vs Turbine Output pada Head 89,7 m

B. Rumus Solver

a. Objective Function

$$\text{Total Energi Maksimum (MWh)} = \text{Energi Unit 1} + \text{Energi Unit 2} + \text{Energi Unit 3}$$

$$\text{Energi } (h_1, h_2, h_3)$$

$$= (\rho \times g \times [Q(H, P)] \times H \times [\eta(H, P)]_1 \times h_1$$

$$+ (\rho \times g \times [Q(H, P)] \times H \times [\eta(H, P)]_2 \times h_2$$

$$+ (\rho \times g \times [Q(H, P)] \times H \times [\eta(H, P)]_3 \times h_3$$

b. Changing Variable Design

Durasi operasi unit pembangkit (jam) :

- Durasi Unit 1 = h1
- Durasi Unit 2 = h2
- Durasi Unit 3 = h3

Daya Turbin (MW) :

- Daya Turbin 1 = P1
- Daya turbin 2 = P2
- Daya Turbin 3 = P3

c. Constraint

- Elevasi akhir waduk = elevasi target sesuai permintaan PJT 1
- Elevasi waduk limit bawah \leq Elevasi target \leq Elevasi waduk limit atas

- Elevasi akhir waduk = Elevasi awal waduk + $\left(\frac{+ (\text{Inflow} \times 24 - \text{outflow unit 1} \times h1 - \text{outflow unit 2} \times h2 - \text{outflow unit 3} \times h3)}{19.8 \times 0.01} \right)$
- $20 \text{ MW} \leq \text{daya per unit} \leq 24 \text{ Jam}$
- $0 \leq \text{jam operasi} \leq 24 \text{ Jam}$

d. Formula untuk *Turbine Discharge* terhadap variasi *Head*

Formula untuk *Turbine Discharge* terhadap variasi *Head* menggunakan persamaan *Polynomial* orde 2 pada grafik karakteristik turbin dengan kombinasi prinsip logika *IF* dan *AND* yaitu :

IF (AND(60.5 m < Head < 78 m)) :

$$Q \text{ Discharge} = \frac{\text{head}-60.5}{78-60.5} \times (Q \text{ Discharge pada head } 78 - Q \text{ Discharge pada head } 60.5) +$$

Q Discharge pada head 60.5

IF (AND(78 m < Head < 85.4 m)) :

$$Q \text{ Discharge} = \frac{\text{head}-78}{85.4-78} \times (Q \text{ Discharge pada head } 85.4 - Q \text{ Discharge pada head } 78) +$$

Q Discharge pada head 78

IF (AND(85.4 m < Head < 89.7 m)) :

$$Q \text{ Discharge} = \frac{\text{head}-85.4}{89.7-85.4} \times (Q \text{ Discharge pada head } 89.7 - Q \text{ Discharge pada head } 85.4) +$$

Q Discharge pada head 85.4"OUT OF RANGE"

e. Formula untuk Efisiensi terhadap variasi *Head*

Formula untuk efisiensi terhadap variasi head menggunakan persamaan *polynomial* orde 2 pada grafik karakteristik turbin dengan kombinasi logika *IF* dan *AND* yaitu :

IF (AND(60.5 m < Head < 78 m)) :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{head}-60.5}{78-60.5} \times (\text{Efisiensi pada head } 78 - \text{Efisiensi pada head } 60.5) + \text{Efisiensi pada head } 60.5$$

IF (AND(78 m < Head < 85.4 m)) :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{head}-78}{85.4-78} \times (\text{Efisiensi pada head } 85.4 - \text{Efisiensi pada head } 78) + \text{Efisiensi pada head } 78$$

IF (AND(85.4 m < Head < 89.7 m)) :

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{head}-85.4}{89.7-85.4} \times (\text{Efisiensi pada head } 89.7 - \text{Efisiensi pada head } 85.4) +$$

Efisiensi pada head 85.4"OUT OF RANGE"

Hasil Simulasi Produksi Energi

Simulasi untuk mendapatkan energi dilakukan pada bulan Maret dan Juni 2024 karena pada bulan tersebut merupakan kategori bulan basah dan bulan kering berdasarkan Pola Operasi Waduk dan Alokasi Air. Hasil yang didapatkan ditunjukkan pada table 2 dan table 3.

Tabel 2 Hasil Simulasi Perhitungan Pola Operasi Harian Maret 2024

Tanggal	Hasil Simulasi						Produksi Energi (MWh)	
	Daya (MW)			Durasi Operasi (Jam)			Eksisting	Simulasi
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	h1	h2	h3		
01/03/2024	35.00	33.00	35.00	13.50	23.50	20.00	1,735,600.00	1,806,705.39
02/03/2024	35.00	33.00	35.00	20.00	24.00	20.00	1,981,600.00	2,033,735.37
03/03/2024	35.00	30.00	35.00	15.70	24.00	20.00	1,781,600.00	1,831,659.74
04/03/2024	35.00	30.00	35.00	20.00	24.00	20.00	1,878,200.00	1,969,952.67
05/03/2024	35.00	30.00	30.00	24.00	24.00	21.50	1,939,000.00	2,058,003.68
06/03/2024	35.00	30.00	35.00	24.00	24.00	21.50	2,076,000.00	2,152,205.41
07/03/2024	35.00	30.00	35.00	24.00	24.00	13.00	1,815,500.00	1,877,515.85
08/03/2024	35.00	30.00	35.00	24.00	24.00	16.50	1,903,100.00	1,990,255.12
09/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	24.00	2,251,600.00	2,337,243.72
10/03/2024	35.00	33.00	35.00	15.00	24.00	24.00	1,927,900.00	2,006,885.58
11/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	24.00	2,318,200.00	2,345,554.31
12/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	24.00	2,327,600.00	2,343,691.86
13/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	24.00	2,318,600.00	2,341,043.47
14/03/2024	35.00	35.00	35.00	20.00	22.00	20.50	1,982,500.00	2,028,388.65
15/03/2024	35.00	35.00	35.00	23.50	24.00	22.00	2,187,400.00	2,253,377.67
16/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	23.50	2,255,300.00	2,318,272.25
17/03/2024	35.00	35.00	35.00	24.00	24.00	24.00	2,327,600.00	2,334,681.95
18/03/2024	35.00	33.00	33.00	22.00	21.00	16.00	1,819,100.00	1,851,094.99
19/03/2024	35.00	33.00	35.00	15.00	20.00	16.30	1,598,100.00	1,628,112.50
20/03/2024	35.00	30.00	30.00	11.00	20.00	8.00	1,098,100.00	1,143,668.50
21/03/2024	35.00	30.00	30.00	12.00	17.50	12.00	1,129,500.00	1,217,967.17
22/03/2024	35.00	30.00	30.00	13.00	22.00	12.00	1,286,100.00	1,378,328.72
23/03/2024	35.00	30.50	31.00	24.00	24.00	24.00	2,126,300.00	2,164,616.34
24/03/2024	30.00	30.00	30.00	11.50	22.00	12.00	1,233,400.00	1,282,202.32
25/03/2024	30.00	30.00	30.00	9.00	22.00	10.00	1,110,200.00	1,155,790.16
26/03/2024	30.00	30.00	30.00	8.00	22.00	8.00	1,027,900.00	1,071,419.48
27/03/2024	30.00	30.00	30.00	8.00	22.00	9.50	1,079,100.00	1,114,250.73
28/03/2024	33.00	30.00	30.00	16.00	24.00	11.50	1,433,500.00	1,494,833.00
29/03/2024	35.00	33.00	35.00	20.00	24.00	24.00	2,105,300.00	2,170,077.03
30/03/2024	35.00	35.00	35.00	13.50	24.00	13.50	1,612,600.00	1,656,068.06
31/03/2024	35.00	30.00	33.00	12.00	16.00	12.00	1,126,300.00	1,179,843.85
JUMLAH							54,792,800.00	56,537,445.55

Table 2 menunjukkan rencana jam operasi serta daya yang dibangkitkan PLTA Sutami berdasarkan hasil simulasi perhitungan pada bulan Maret 2024 dimana pada bulan tersebut tergolong pada musim basah. Pola operasi PLTA Sutami mengharuskan minimal 1 unit beroperasi, dan hasil perhitungan diatas dapat memenuhi syarat pola operasi PLTA Sutami. Total energi Listrik pada bulan Maret 2024 yang dihasilkan melalui simulasi perhitungan lebih besar 3.09% dibandingkan dengan data aktual pembangkitan energi PLTA Sutami pada bulan tersebut.

Tabel 3 Hasil Simulasi Perhitungan Pola Operasi Harian Juni 2024

Tanggal	Hasil Simulasi						Produksi Energi (MWh)		
	Daya (MW)			Durasi Operasi (Jam)			Eksisting	Simulasi	
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	h1	h2	h3			
01/06/2024	25.00	25.00	0.00	13.50	24.00	0.00	903,900.00	982,842.67	
02/06/2024	30.00	30.00	30.00	16.00	24.00	15.00	1,503,300.00	1,732,697.47	
03/06/2024	30.00	30.00	30.00	8.00	24.00	5.50	854,300.00	1,062,326.66	
04/06/2024	30.00	30.00	0.00	6.50	24.00	0.00	851,700.00	864,136.63	
05/06/2024	35.00	25.00	0.00	16.00	10.00	0.00	750,400.00	758,536.01	
06/06/2024	35.00	25.00	0.00	16.00	9.50	0.00	721,200.00	746,831.44	
07/06/2024	35.00	25.00	0.00	16.00	10.00	0.00	746,500.00	758,761.15	
08/06/2024	30.00	30.00	30.00	12.00	24.00	5.00	1,125,300.00	1,162,321.26	
09/06/2024	30.00	30.00	30.00	20.00	24.00	6.50	1,380,000.00	1,431,693.83	
10/06/2024	35.00	27.00	0.00	16.00	10.00	0.00	765,600.00	777,624.25	
11/06/2024	27.00	27.00	27.00	12.00	12.00	6.50	738,800.00	778,248.79	
12/06/2024	25.00	25.00	0.00	8.50	24.00	0.00	751,200.00	766,444.85	
13/06/2024	35.00	25.00	30.00	12.00	7.50	6.00	726,100.00	738,933.77	
14/06/2024	35.00	25.00	30.00	12.00	16.00	11.50	1,082,500.00	1,095,398.56	
15/06/2024	30.00	30.00	30.00	10.00	20.00	8.50	1,059,800.00	1,091,379.03	
16/06/2024	30.00	30.00	30.00	10.00	20.00	5.00	969,100.00	992,037.05	
17/06/2024	30.00	30.00	30.00	8.00	19.50	4.00	877,700.00	892,776.65	
18/06/2024	30.00	30.00	30.00	8.00	20.00	4.00	886,300.00	906,913.10	
19/06/2024	30.00	30.00	30.00	7.00	20.00	4.00	853,400.00	878,583.25	
20/06/2024	30.00	30.00	30.00	7.50	24.00	4.00	953,600.00	1,006,170.68	
21/06/2024	30.00	30.00	30.00	4.00	20.50	4.00	791,500.00	807,554.65	
22/06/2024	30.00	30.00	30.00	4.00	22.50	4.00	849,400.00	864,247.25	
23/06/2024	30.00	30.00	30.00	12.00	24.00	12.00	1,314,600.00	1,360,369.66	
24/06/2024	30.00	30.00	30.00	8.50	12.00	8.00	792,300.00	807,076.30	
25/06/2024	35.00	25.00	0.00	13.00	12.00	0.00	701,900.00	707,183.46	
26/06/2024	35.00	25.00	0.00	13.00	12.00	0.00	701,400.00	707,228.10	
27/06/2024	35.00	25.00	35.00	6.50	12.00	6.50	694,500.00	707,272.70	
28/06/2024	35.00	25.00	35.00	6.00	12.00	8.00	733,200.00	739,976.24	
29/06/2024	30.00	25.00	30.00	4.00	20.00	4.50	709,700.00	712,270.60	
30/06/2024	30.00	25.00	30.00	5.00	20.00	4.00	722,600.00	726,479.67	
	JUMLAH							26,511,800.00	27,564,315.75

Table 3 menunjukkan rencana jam operasi serta daya yang dibangkitkan PLTA Sutami berdasarkan hasil simulasi perhitungan pada bulan Juni 2024 dimana pada bulan tersebut tergolong pada kondisi musim kering. Pola operasi PLTA Sutami mengharuskan minimal 1 unit beroperasi, dan hasil perhitungan diatas dapat memenuhi syarat pola operasi PLTA Sutami. Total energi Listrik pada bulan Juni 2024 yang dihasilkan melalui simulasi perhitungan lebih besar 3.82% dibandingkan dengan data aktual pembangkitan energi PLTA Sutami pada bulan tersebut.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan simulasi pola operasi harian PLTA Sutami dapat ditarik Kesimpulan dan saran sebagai berikut :

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini antara lain :

- Pada FDC tahun 2014-2023 menunjukkan debit andalan rata-rata sebesar 32 m³/s yang tersedia sepanjang tahun untuk dimanfaatkan turbin air menghasilkan daya minimum 20 MW. Sedangkan dari hasil forecast data historis di dapatkan FDC tahun 2024-2033 dengan rata-rata debit andalan 40.68 m³/s untuk menghasilkan daya minimum 30 MW.
- Total energi listrik pada bulan Maret berdasarkan hasil simulasi perhitungan adalah 56.537.445,55 MWh, lebih besar 3.09 % dibandingkan dengan data aktual sebesar 54.792.800 MWh. Hasil simulasi perhitungan produksi listrik pada bulan Juni 2024 sebesar 27.564.315,75 MWh, lebih besar 3.82 % dibandingkan dengan data aktual sebesar

26.511.800 MWh. Hasil simulasi perhitungan dapat menunjukkan jam operasi harian dan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit listrik.

Saran

Penelitian ini dapat dilanjutkan untuk 25 turbin / 12 PLTA lainnya di PLN Nusantara Power UP Brantas.

6. DAFTAR REFERENSI

Adatika, L., Suripin, S., & Darsono, S. (2021). Optimasi operasi waduk Dolok dengan program dinamik. *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, 6(1), 205. <https://doi.org/10.28926/briliant.v6i1.595>

Compro UP Brantas. (2024, August).

da Silva, D. D., Pereira, S. B., & de O. Vieira, E. (2020). Integrated water resources management in Brazil. *Integrative Water Resources Management*, 13–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16565-9_2

Djamaris, A. (2018). Pemanfaatan Excel-Solver untuk pengambilan keputusan. *Univ. Bakrie*, 91. Available at: <https://repository.bakrie.ac.id/1519/1/Pemanfaatan%20Excel-Solver%20Untuk%20Pengambilan%20Keputusan.pdf>

Elektro, J. T., & Teknik, F. (2017). Pengaruh ketidakstabilan debit air dan curah hujan pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Pejengkolan terhadap produktifitas energi listrik yang.

Jian Chen, H. Y. (n.d.). A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines. *ResearchGate*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/257177069_A_novel_vertical_axis_water_turbine_for_power_generation_from_water_pipelines

Kepmen 12 tahun 2019 ttg harga dasar air permukaan - PAP.pdf.

Kuliah, M., & Harsanto, P. (2023). Program studi teknik sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. *Repository.umy.ac.id*. Available at: http://repository.umy.ac.id/bitstream/handle/123456789/32919/SPADA%20Hidrologi%20Terapan%20UMY%202018_Puji%20Harsanto.pdf?sequence=1

Laymans Guide. (1998). Run off river.

Limantara, L. M. (2018). Rekayasa hidrologi. *In Rekayasa Hidrologi*, 139–149.

Lukman, A., Harahap, R., & Hardianto, A. T. (2023). Analisa debit air untuk kapasitas pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Peusangan I Takengon Kabupaten Aceh Tengah. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 64–67. Available at: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/JTSIP>

Paryatmo, W. (2007). Turbin air. *In Turbin Air*, 28.

Pemerintah Republik Indonesia. (2019). *Undang-undang nomor 17 tahun 2019 tentang sumber daya air*. Jdih Bpk RI Database Peraturan, 011594. Available at: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/122742/uu-no-17-tahun-2019>

Primadi, A. (2017). Teknik tenaga listrik. [Online]. Available at: https://id.m.wikipedia.org/wiki/Teknik_listrik

Sari, N. K., Fauziah, S., Irawan, P., & Kurnia, A. (2022). Berbasis nilai manfaat, 369–381.

Setia, G. A., Mahdy, R. S., Winasis, W., & Prasetijo, H. (2021). Optimalisasi pembangkitan energi listrik PLTA Jatiluhur menggunakan pemrograman linier. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 6(2), 313–320. <https://doi.org/10.31544/jtera.v6.i2.2021.313-320>

skep_tarif_2018 Kepmen PUPR Pajak BJPSDA.pdf.

Utama, P. T. C. (2022). No title. *Laporan akhir kajian kapasitas tampungan waduk dalam rangka pengelolaan sedimentasi di wilayah sungai Brantas*, 8–15.