

Optimasi Pengaturan Pembangkit Hidro Kaskade Sungai Brantas untuk Meningkatkan *Cascade Effectiveness*

Mochammad Syaiful Bakri, Margianto, Nur Robbi*, Mochammad Basjir

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, Malang, Indonesia

*Koresponden email: nurrobby@unisma.ac.id

Diterima: 5 Juni 2024

Disetujui: 19 Juni 2024

Abstract

Hydropower with a cascade scheme utilises the energy potential of water in a sustainable manner. The Brantas River area is used to generate 4 (four) hydropower plants (HEPP) that are arranged in series from upstream to downstream, namely Sengguruh HEPP, Sutami HEPP, Wlingi HEPP and Lodoyo HEPP. From December 2022 to November 2023, the four hydropower plants can produce 888,629,472 kWh of electricity. However, there is still potential for electricity generation that can be optimised from the unused water potential (spillway water) of 553.61 million m³. The optimisation management system provides a solution for utilising water energy sources by formulating a mathematical model using Solver in the Microsoft Excel application to plan the water level of the Sutami reservoir, hydropower load settings and peak/off-peak times at each hydropower plant. By implementing an optimisation, electrical energy production has the potential to reach 951,796,287 kWh or an increase of 7.11% in the period December 2022 to November 2023 by minimising the occurrence of spillway water by up to 92.40% or 551.61 million m³. As a result, the cascade efficiency of the hydropower plants of the Brantas River cascade was increased by 2.87% or 0.003 kWh/m³.

Keywords: *hydropower plants, optimization management systems, hydropower load and peak/off-peak times settings, electrical energy production, cascade effectiveness*

Abstrak

Pembangkit hidro dengan skema kaskade memanfaatkan energi potensial air secara berkelanjutan. Wilayah Sungai (WS) Brantas dimanfaatkan untuk membangkitkan 4 (empat) Pembangkit hidro (PLTA) yang tersusun secara seri dengan urutan dari hulu ke hilir yaitu PLTA Sengguruh, PLTA Sutami, PLTA Wlingi, dan PLTA Lodoyo. Pada periode Desember 2022 sampai dengan November 2023, keempat PLTA mampu memproduksi energi listrik sebesar 888,629,472 kWh. Namun, masih terdapat potensi kesempatan produksi energi listrik yang dapat dioptimalkan dari potensi air yang tidak termanfaatkan (air limpas) sebesar 553,61 Juta m³. Sistem optimasi pengaturan pembangkit memberikan solusi dalam optimalisasi pemanfaatan sumber energi air melalui formulasi dengan pendekatan model matematis karakteristik turbin dan generator memanfaatkan Solver pada aplikasi Microsoft Excel untuk merencanakan elevasi/Tinggi Muka Air (TMA) Waduk Sutami dan pembebanan serta waktu pembebanan pada saat Peak dan Off-Peak. Melalui optimasi, produksi energi listrik berpotensi tercapai sebesar 951,796,287 kWh atau meningkat 7,11% dari kondisi riil pada periode Desember 2022 sampai dengan November 2023 dengan meminimalisir terjadinya air limpas hingga 92,40% atau 551,61 Juta m³. Sehingga, terjadi kenaikan Cascade Effectiveness pada PLTA Kaskade WS Brantas sebesar 2,87% atau 0,003 kWh/m³.

Kata Kunci: *pembangkit hidro, sistem optimasi, pengaturan pembangkit, produksi energi listrik, cascade effectiveness*

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi umat manusia. Saat ini, mayoritas energi listrik masih dibangkitkan dari sumber-sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas bumi. Isu dampak lingkungan serta keterbatasan cadangan sumber energi memberikan dorongan untuk mencari solusi alternatif energi lainnya yang lebih bersahabat dengan lingkungan dan memastikan penggunaan energi secara berkelanjutan [1], [2]. Melihat kondisi ketersediaan sumber energi fosil yang semakin buruk, fokus penggunaan sumber energi sebagai energi listrik semakin beralih ke energi baru terbarukan (EBT), yang dianggap sebagai pilihan yang lebih berkelanjutan. Salah satu jenis EBT yang dapat diandalkan dengan melihat kondisi demografi Indonesia adalah energi hidro, yang telah dimanfaatkan sebanyak 6,4% atau setara dengan 4.826,7 MW, dengan potensi energi hidro yang belum dimanfaatkan mencapai 75.091 MW menurut Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2021-2030 [3]. Penggunaan

energi hidro tidak lepas dari berbagai permasalahan yang menghambat optimasi operasi pembangkitan energi listrik untuk mencapai energi listrik optimal. Salah satu hambatan terbesarnya yaitu ketergantungan pada kondisi alam yang mempengaruhi pola debit air masukan. Sehingga, perlu dilakukan upaya untuk mengoptimalkan penggunaan sumber energi yang tersedia menjadi energi listrik yang lebih besar [4].

Salah satu bentuk pengoptimalan penggunaan sumber energi hidro untuk energi listrik adalah penerapan pembangkit hidro dengan skema kaskade aliran sungai. Pembangkit hidro skema kaskade memanfaatkan sumber energi air (energi potensial) secara berkelanjutan dimana debit air keluaran dari turbin pembangkit hidro pada sisi hulu dimanfaatkan sebagai debit air masukan untuk penggerak turbin pada pembangkit hidro selanjutnya [5]. Keunggulan skema kaskade ini tidak hanya terletak pada peningkatan efisiensi energi hidro, tetapi juga pada kemampuannya mengatasi fluktuasi debit air dengan menyediakan stabilitas pembangkitan energi listrik [6]. Salah satu aliran sungai di Indonesia yang dimanfaatkan untuk pembangkit hidro sistem kaskade yaitu Wilayah Sungai (WS) Brantas. WS Brantas dimanfaatkan untuk membangkitkan 4 (empat) Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang tersusun secara seri dengan urutan dari hulu ke hilir yaitu PLTA Sengguruh, PLTA Sutami, PLTA Wlingi, dan PLTA Lodoyo.

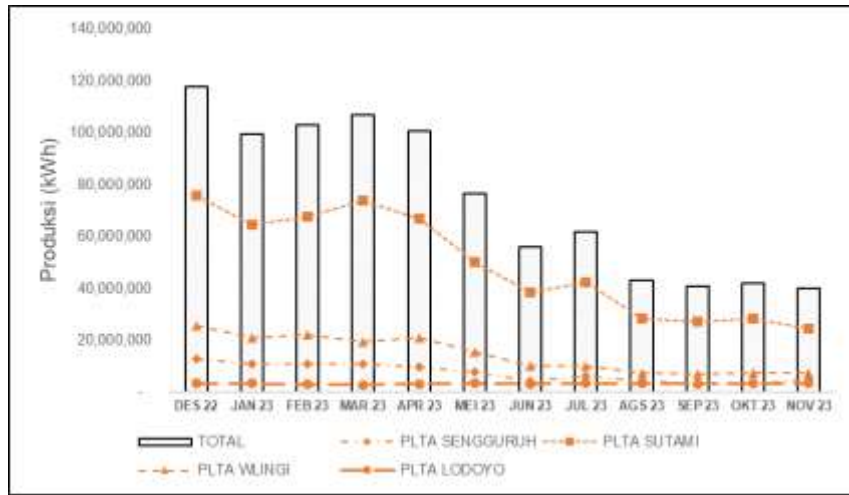
Karakteristik energi hidro yang dimanfaatkan untuk menjadi energi listrik adalah ketinggian air (energi potensial) dan debit air. Energi potensial diukur dari perbedaan ketinggian antara sumber air dan lokasi turbin pembangkit hidro [7]. Debit air mengacu pada jumlah air yang melewati turbin untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan adalah besar debit air terhadap besar energi potensialnya. Pada perhitungan yang spesifik, efisiensi keseluruhan menjadi faktor penting yang berpengaruh terhadap total energi listrik yang dihasilkan [8]. Efisiensi keseluruhan mencerminkan sejauh mana pembangkit hidro mampu mengubah energi potensial air menjadi energi listrik. Pembangkit hidro yang memiliki efisiensi yang tinggi, membutuhkan lebih sedikit debit air untuk menghasilkan energi listrik yang sama. Sehingga, dengan kapasitas sumber energi hidro yang sama mampu menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Pentingnya efisiensi menjadi semakin nyata untuk pembangkit hidro dengan lebih dari satu unit (multiunit)[9]. Pemilihan prioritas unit yang beroperasi berdasarkan efisiensi tertinggi akan dapat memberikan dampak terhadap total capaian produksi pembangkit [10]. Dengan strategi ini, keseluruhan produksi pembangkit dapat dioptimalkan, mencapai tingkat efisiensi maksimum dan memanfaatkan sebanyak mungkin energi hidro yang tersedia[11].

Analisa optimasi pengaturan PLTA sistem kaskade dapat mempermudah penyelesaian masalah yang sering terjadi dalam pengoperasian PLTA di lapangan. Dengan memiliki model operasi yang optimal, operator pembangkit dapat mengembangkan strategi operasional pembangkit yang sesuai dengan tinggi muka air saat ini, kondisi hidrologi, dan kebutuhan air sepanjang tahun [12], [13]. Hal ini dapat dicapai melalui peningkatan referensi pengoperasian pembangkit dengan memanfaatkan informasi yang tersedia, memperhitungkan kondisi iklim dan hidrologi yang diprediksi, serta mengadopsi teknologi komputasi terkini. Analisa optimasi pengaturan PLTA sistem kaskade dengan mengintegrasikan data aktual dengan formulasi optimasi menggunakan teknologi komputasi optimasi seperti *Solver* pada aplikasi *Microsoft Excel* untuk mendapatkan pola pengaturan pembangkit yang optimum guna mencapai nilai *Cascade Effectiveness* tertinggi [14], [15].

2. Metode Penelitian

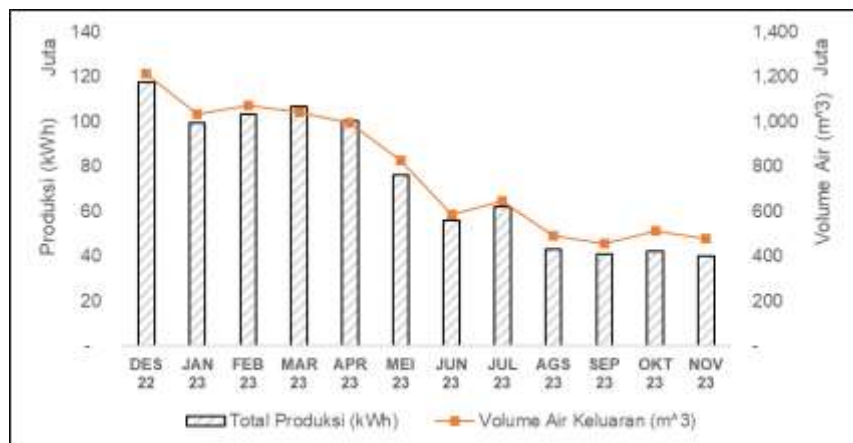
Metode penelitian ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :

1. Sebelum melakukan simulasi, peneliti melakukan survei pendahuluan dan studi literatur.
2. Tahap selanjutnya yaitu melakukan pengambilan data beban dan produksi pembangkit pada masing-masing unit di PLTA Sengguruh, PLTA Sutami, PLTA Wlingi, dan PLTA Lodoyo seperti pada **Gambar 1**.

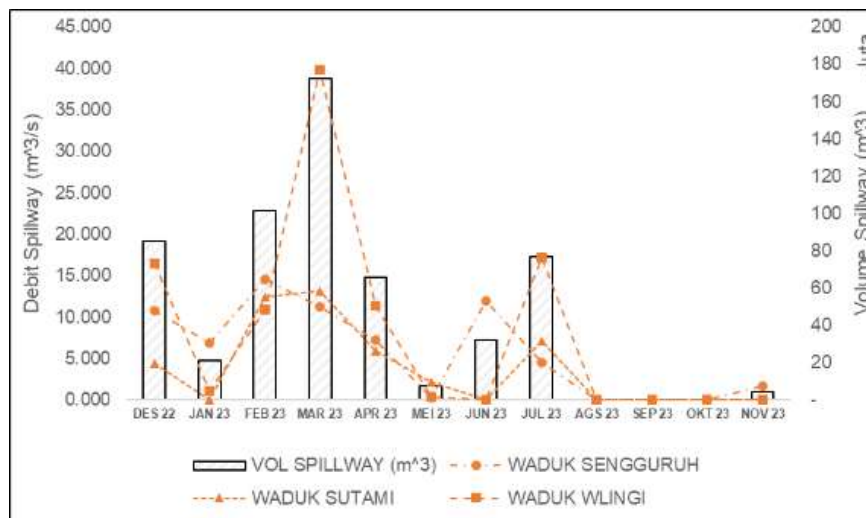


Gambar 1. Produksi PLTA Kaskade WS Brantas periode Desember 2022 – November 2023
Sumber: Pengolahan data, 2024

- Tahap selanjutnya yaitu melakukan pengambilan data debit air masukan dan air keluaran pada masing-masing waduk di Waduk Sengguruh, Waduk Karangates, Waduk Lahor, Waduk Wlingi, dan Waduk Lodoyo seperti pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**.



Gambar 2. Volume air keluaran dan produksi PLTA Kaskade WS Brantas periode Desember 2022 – November 2023
Sumber: Pengolahan data, 2024



Gambar 3. Volume air melalui Spillway PLTA Kaskade WS Brantas
Sumber: Pengolahan data (2024)

4. Tahapan selanjutnya yaitu mengumpulkan data karakteristik waduk serta turbin dan generator seperti pada **Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4**

Tabel 1. Spesifikasi teknis PLTA Sengguruh

Nama PLTA	PLTA SENGGURUH
Daya minimal (Pmin)	8 MW
Daya maksimal (Pmax)	12 MW
Jumlah Unit	2
Net Head (m)	26
Debit air keluaran (m ³ /s)	94,5
Putaran (rpm)	176,5
Merk Turbin	BOVING
Tipe	Kaplan Vertikal
Tahun Operasi	1988

Sumber: Data Pembangkit PLN Nusantara Power UP Brantas, 2024

Tabel 2. Spesifikasi teknis PLTA Sutami

Nama PLTA	PLTA SUTAMI
Daya minimal (Pmin)	20 MW
Daya maksimal (Pmax)	35 MW
Jumlah Unit	3
Head (m)	78
Debit air keluaran (m ³ /s)	53,5
Putaran (rpm)	250
Merk Turbin	TOSHIBA
Tipe	Francis Vertikal
Tahun Operasi	1973 (#1,#2) 1978 (#3)

Sumber: Data Pembangkit PLN Nusantara Power UP Brantas, 2024

Tabel 3. Spesifikasi teknis PLTA Wlingi

Nama PLTA	PLTA WLINGI
Daya minimal (Pmin)	10 MW
Daya maksimal (Pmax)	25 MW
Jumlah Unit	2
Head (m)	22
Debit air keluaran (m ³ /s)	143
Putaran (rpm)	143
Merk Turbin	TOSHIBA
Tipe	Kaplan Vertikal
Tahun Operasi	1978

Sumber: Data Pembangkit PLN Nusantara Power UP Brantas, 2024

Tabel 4. Spesifikasi teknis PLTA Lodoyo

Nama PLTA	PLTA LODOYO
Daya minimal (Pmin)	2 MW
Daya maksimal (Pmax)	4,7 MW
Jumlah Unit	1
Head (m)	8,5
Debit air keluaran (m ³ /s)	64,3
Putaran (rpm)	150
Merk Turbin	TOSHIBA
Tipe	Kaplan Horizontal
Tahun Operasi	1983

Sumber: Data Pembangkit PLN Nusantara Power UP Brantas, 2024

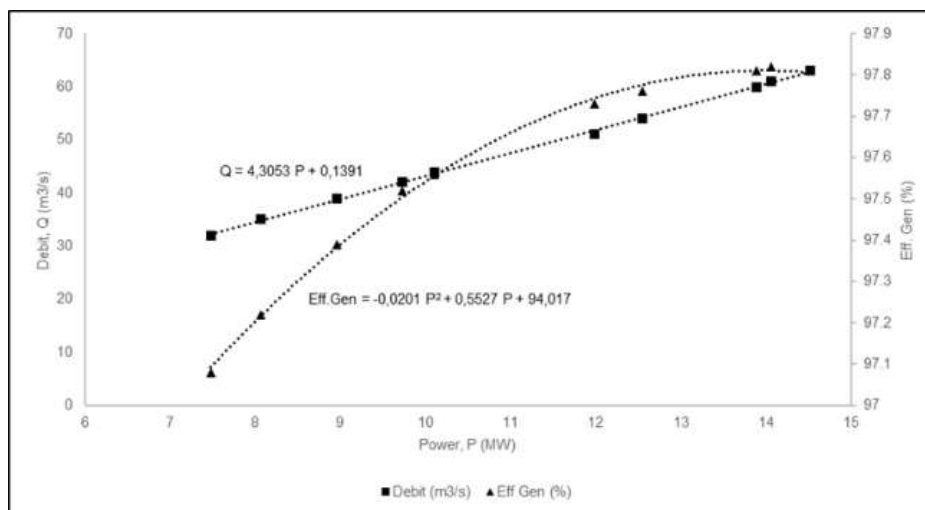
- Tahapan selanjutnya yaitu menyusun desain Flowchart Konfigurasi Pembangkit Kaskade sesuai dengan kondisi pada Kaskade Wilayah Sungai Brantas seperti pada **Gambar 5**.
- Tahapan selanjutnya yaitu merumuskan model matematis untuk konfigurasi Kaskade Wilayah Sungai Brantas

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } \sum_t E_t = & \sum_{\substack{T.SGR \\ T.LDY}} E_{SGR}(Q_{in.SGR}) + \rho g \sum_{t.STM} (H_{STM}(S_{STM}) \times Q_{out.STM} \times \eta_{STM}) + \sum_{t.WLG} E_{WLG}(Q_{in.WLG}) \\
 & + \sum_{t.LDY} E_{LDY}(Q_{in.LDY})
 \end{aligned}$$

- Tahapan selanjutnya yaitu membangun desain sistem optimasi pembangkit serta melakukan pengujian simulasi.
- Setelah simulasi dilakukan tahap selanjutnya adalah analisis data dan memberikan kesimpulan.

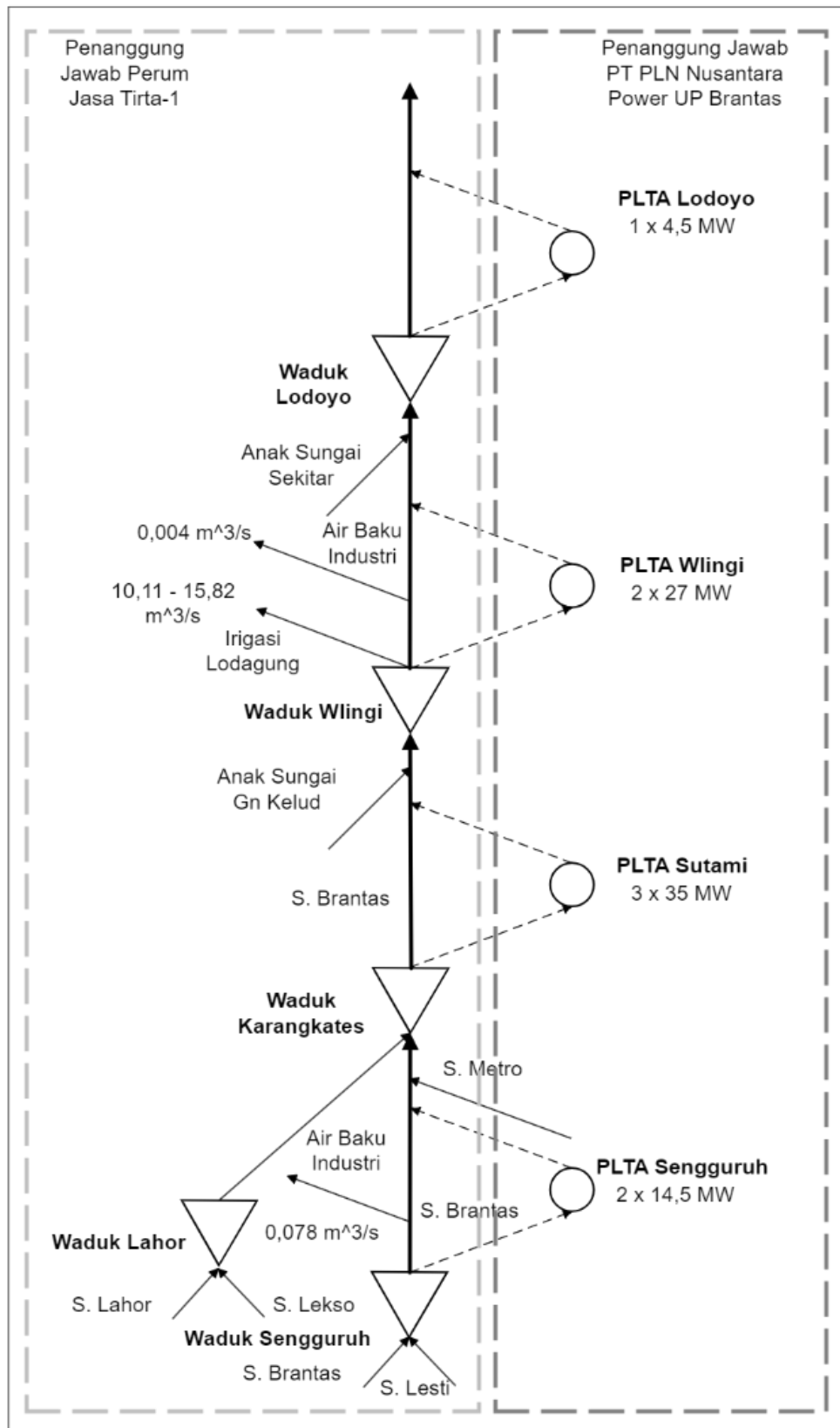
3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan data daya turbin dan debit keluaran yang diperoleh dari data *comissioning* pada masing-masing pembangkit, maka dapat ditentukan masing-masing permodelan PLTA seperti pada **Gambar 4**, **Gambar 6**, **Gambar 7**, **Gambar 8**, **Gambar 9**, dan **Gambar 10**

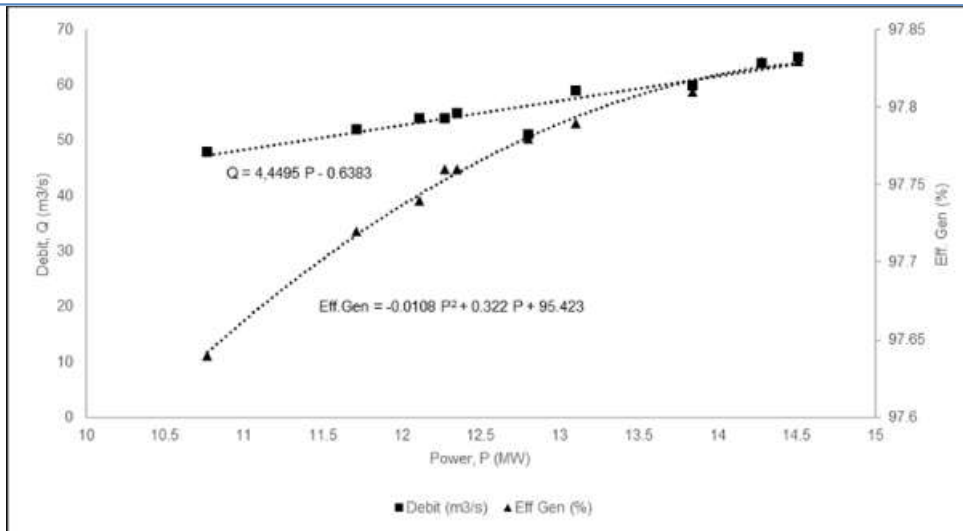


Gambar 4. Hasil regresi pada daya turbin terhadap debit keluaran dan efisiensi generator PLTA Sengguh Unit 1

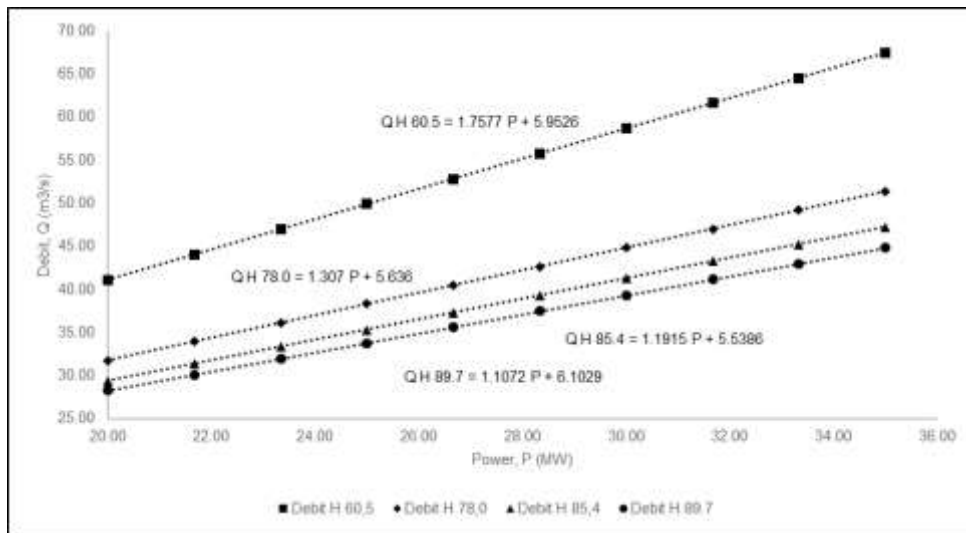
Sumber: Pengolahan data, 2024



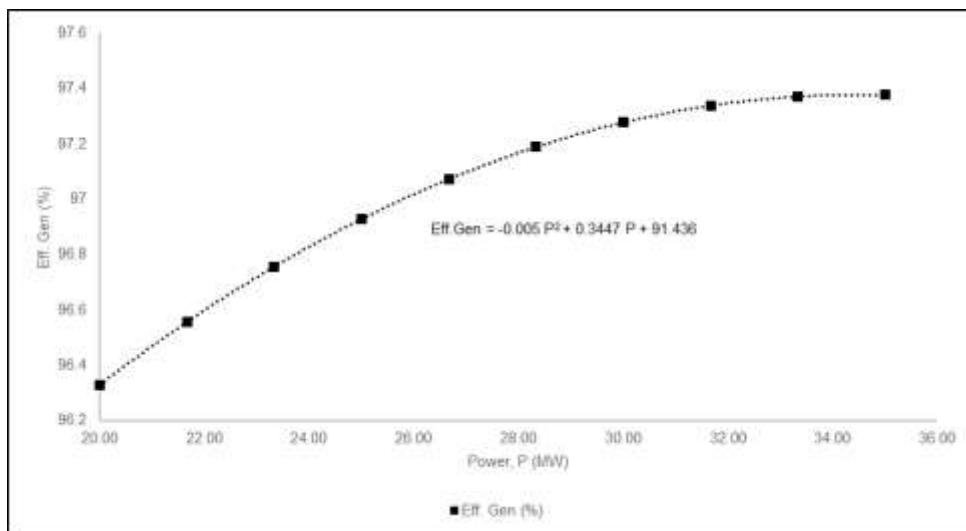
Gambar 5. Konfigurasi PLTA Kaskade WS Brantas
 Sumber: Rancangan penelitian, 2024



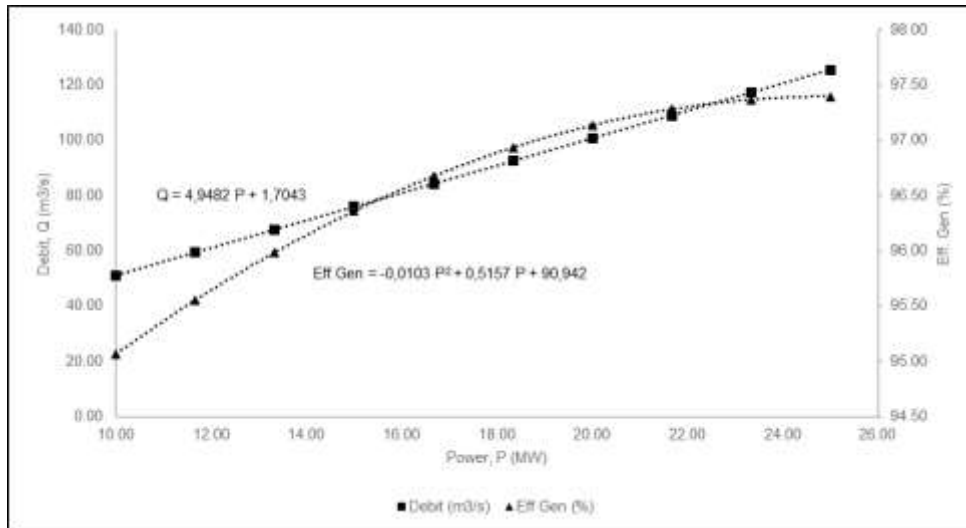
Gambar 6. Hasil regresi pada daya turbin terhadap debit keluaran dan efisiensi generator PLTA Sengguruh Unit 2
 Sumber: Pengolahan data, 2024



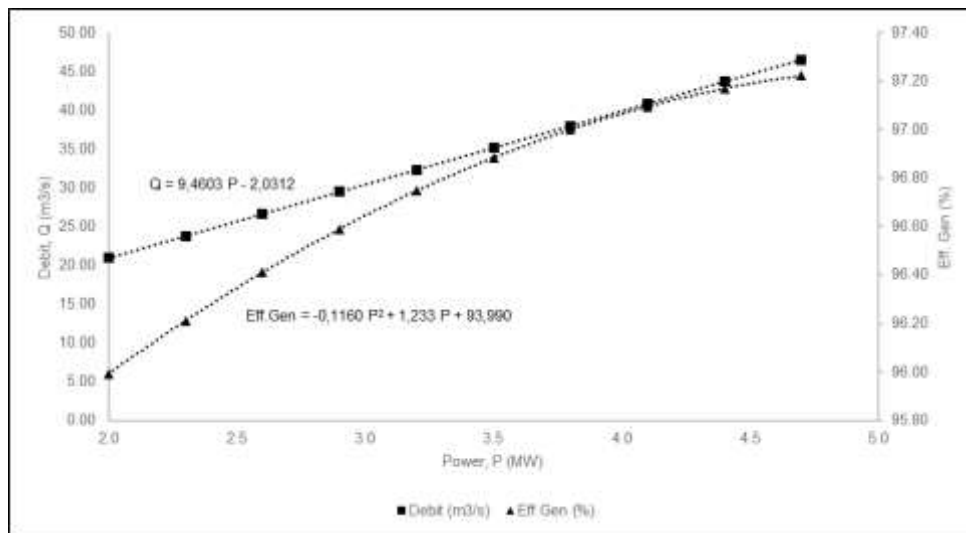
Gambar 7. Hasil regresi pada daya turbin terhadap debit keluaran PLTA Sutami pada Head 60,5 m, 78,0 m, 85,4 m, dan 89,7 m
 Sumber: Pengolahan data, 2024



Gambar 8. Hasil regresi pada daya turbin terhadap efisiensi generator PLTA Sutami
 Sumber: Pengolahan data, 2024

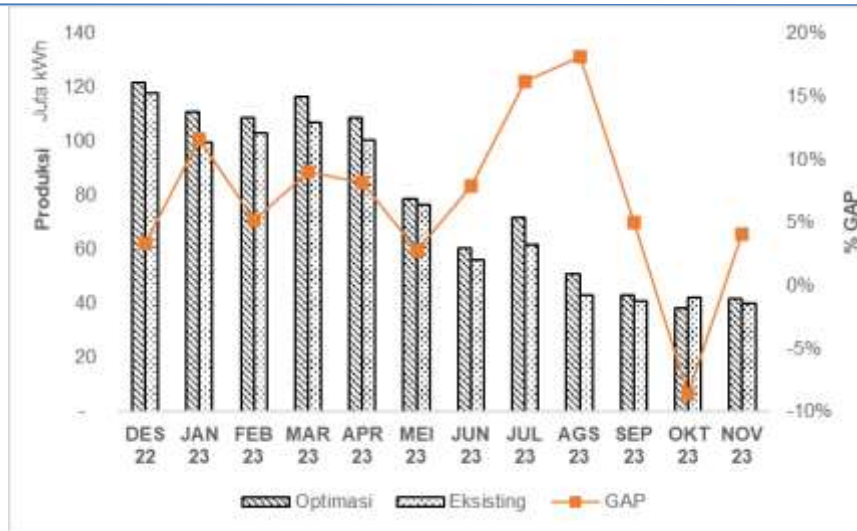


Gambar 9. Hasil regresi pada daya turbin terhadap debit keluaran dan efisiensi generator PLTA Wlingi
Sumber: Pengolahan data, 2024



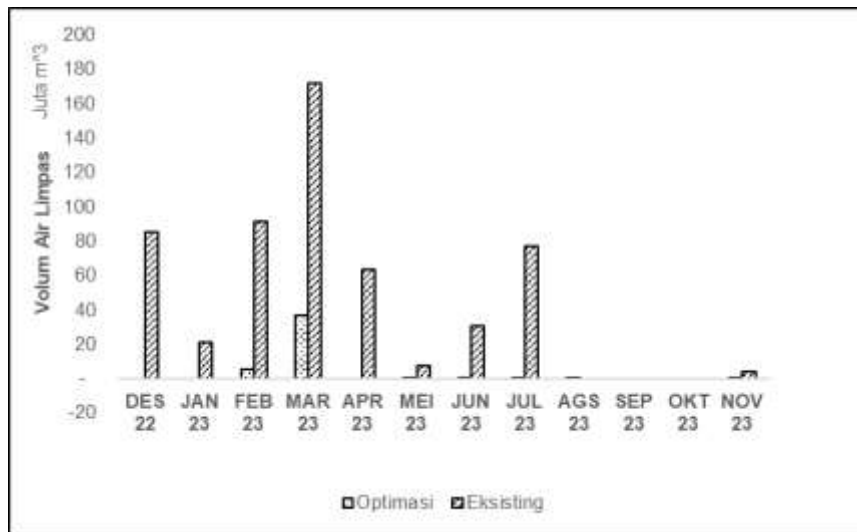
Gambar 10. Hasil regresi pada daya turbin terhadap debit keluaran dan efisiensi generator PLTA Lodoyo
Sumber: Pengolahan data, 2024

Perancangan sistem optimasi pembangkit pada masing-masing PLTA disesuaikan dengan data masukan, proses, dan data keluaran yang dibutuhkan dan dihasilkan pada masing-masing PLTA Kaskade WS Brantas. Data masukan pada sistem optimasi pembangkit adalah ketersediaan sumber energi primer atau volum air masukan. Khusus untuk PLTA Sutami dikarenakan jenis waduk yang digunakan adalah waduk tahunan, maka ketersediaan sumber energi primer adalah jumlah volum air yang dapat digunakan untuk produksi energi listrik yang diperoleh dari debit air masukan dan selisih volum elevasi awal dan elevasi akhir. Proses sistem optimasi pembangkit adalah pengolahan data masukan sebagai batasan maksimal penggunaan sumber energi primer. Pengaturan pembangkit meliputi pengoperasian PLTA dengan beban *output* turbin (MW) optimal pada saat jam *Peak* pada pukul 17.00 sampai dengan 21.00 dan jam *Off-Peak* pada pukul 21.00 sampai dengan 17.00. Hasil optimasi pengaturan pembangkit menghasilkan pengaturan pembangkit yang optimal sesuai karakteristik masing-masing pembangkit yang telah direpresentasikan dalam model matematis terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan produksi PLTA Kaskade WS Brantas pada kondisi eksisting dan pasca optimasi periode Desember 2022 sampai dengan November 2023
Sumber: Pengolahan data, 2024

Berdasarkan hasil pengujian sistem optimasi pembangkit periode Desember 2022 sampai dengan November 2023, terdapat peningkatan signifikan dalam efektifitas penggunaan energi hidro sebagaimana pada perbandingan air limpas PLTA yang terlihat pada **Gambar 12**. Hal ini berdampak terhadap peningkatan kesempatan produksi PLTA Kaskade WS Brantas sebesar 7,11% atau 63.166.185 kWh.

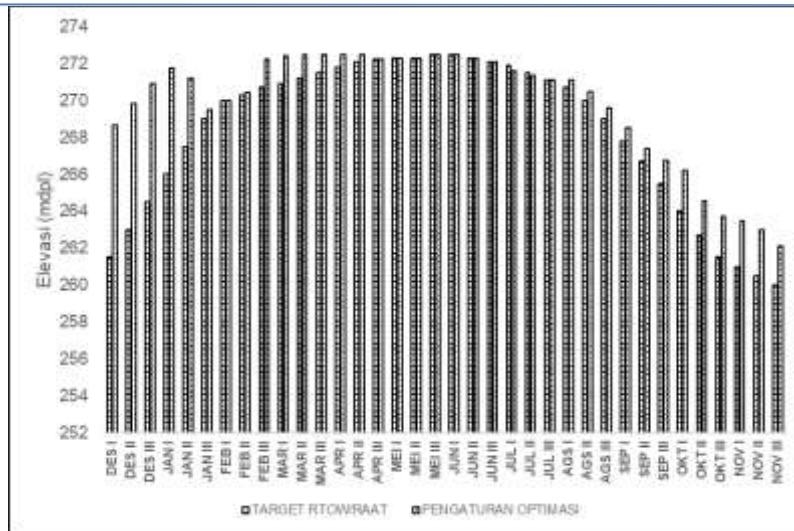


Gambar 12. Perbandingan air limpas PLTA Kaskade WS Brantas pada kondisi eksisting dan pasca optimasi periode Desember 2022 sampai dengan November 2023
Sumber: Pengolahan data, 2024

Formulasi pengaturan pembangkit pasca optimasi yang berdampak terhadap peningkatan kesempatan produksi PLTA Kaskade WS Brantas dikarenakan adanya peningkatan pemanfaatan potensi air sehingga potensi air yang tidak dimanfaatkan untuk diubah menjadi energi listrik (air limpas) dapat diminimalisir. Air limpas pada PLTA Kaskade WS Brantas dapat diminimalisir hingga 92,40% atau 551,61 Juta m3 volum air pada Waduk Senggruh, Waduk Sutami, dan Waduk Wlingi.

Terjadinya peningkatan pemanfaatan energi hidro dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain:

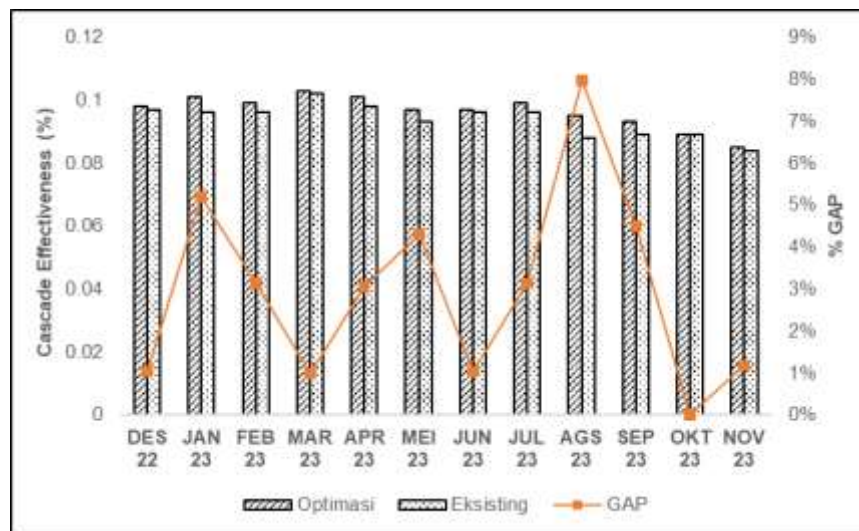
- a. Pengaturan elevasi/Tinggi Muka Air (TMA) akhir dekade melalui perubahan RTOW dan RAAT pada periode Desember 2022 sampai dengan November 2023 dengan mempertimbangkan peningkatan debit air masukan pada Waduk Sutami seperti pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Pengaturan Elevasi/Tinggi Muka Air (TMA) untuk formulasi pengaturan PLTA Kaskade WS Brantas periode Desember 2022 sampai dengan November 2023
Sumber: Pengolahan data (2024)

- b. Pengaturan pembebanan dan waktu operasi masing-masing PLTA Kaskade WS Brantas melalui optimasi pembangkit

Berdasarkan data hasil produksi pembangkit dan volum air keluaran pembangkit PLTA Kaskade WS Brantas pasca optimasi pengaturan PLTA sistem kaskade, maka dapat ditentukan nilai *Cascade Effectiveness* sehingga dapat disimpulkan dampak sistem optimasi pembangkit terhadap peningkatan *Cascade Effectiveness*. Peningkatan *Cascade Effectiveness* hampir terjadi sepanjang periode Desember 2022 sampai dengan November 2023 kecuali pada periode Oktober 2023. Nilai *Cascade Effectiveness* pada periode Oktober 2023 tetap berada pada 0,089 kwh/m3 dikarenakan adanya pengaturan elevasi/Tinggi Muka Air (TMA) akhir dekade. Kenaikan *Cascade Effectiveness* tertinggi terjadi pada periode bulan Agustus 2023 yaitu sebesar 7,95% atau sebesar 0,007 kWh/m3. Pada kondisi riil periode Desember 2022 sampai dengan November 2023, nilai *Cascade Effectiveness* PLTA Kaskade WS Brantas sebesar 0,095 kWh/m3. Pada kondisi simulasi pasca optimasi periode Desember 2022 sampai dengan November 2023, nilai *Cascade Effectiveness* PLTA Kaskade WS Brantas meningkat menjadi sebesar 0,098 kWh/m3. Secara keseluruhan selama periode Desember 2022 sampai dengan November 2023, nilai *Cascade Effectiveness* meningkat 2,87% atau 0,003 kWh/m3 pasca optimasi dengan capaian setiap bulan seperti yang terlihat pada **Gambar 14**.



Gambar 14. Perbandingan *Cascade Effectiveness* PLTA Kaskade WS Brantas pada kondisi eksisting dan pasca optimasi periode Desember 2022 sampai dengan November 2023
Sumber: Pengolahan data (2024)

4. Kesimpulan

Formulasi optimasi pengaturan pembangkit PLTA Kaskade WS Brantas untuk mencapai produksi energi listrik PLTA tertinggi meliputi pengaturan elevasi/Tinggi Muka Air (TMA) akhir dekade pada periode Desember 2022, Januari 2023, periode Februari 2023 dekade 2 dan 3, periode Maret 2023, periode April 2023 dekade 1 dan 2, periode Agustus 2023, periode September 2023, periode Oktober 2023, dan periode November 2023 dan pengaturan pembebanan dan waktu operasi masing-masing PLTA Kaskade WS Brantas meliputi beban minimal dan maksimal pembangkit serta waktu operasi pembangkit pada saat Peak dan Off-Peak dengan tujuan mendapatkan produksi pembangkit tertinggi dengan volum air keluaran yang setara dengan potensi air yang dapat dimanfaatkan untuk menjadi energi listrik.

Dengan diterapkan optimasi pembangkit PLTA Kaskade WS Brantas, produksi energi listrik berpotensi tercapai sebesar 951,796,287 kWh atau meningkat 7,11% dari kondisi riil pada periode Desember 2022 sampai dengan November 2023 dengan peningkatan pemanfaatan potensi air sehingga potensi air yang tidak dimanfaatkan untuk diubah menjadi energi listrik (air limpas) dapat diminimalisir hingga 92,40% atau 551,61 Juta m³ volum air pada Waduk Sengguruh, Waduk Sutami, dan Waduk Wlingi. Hal ini berdampak terhadap kenaikan Cascade Effectiveness pada PLTA Kaskade WS Brantas sebesar 2,87% atau 0,003 kWh/m³.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan kami dari Universitas Islam Malang dan PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Brantas yang telah memberikan dukungan, wawasan, dan keahlian dalam penelitian ini.

6. Singkatan

Lambang	Keterangan
P	Daya pembangkitan (W)
H	Tinggi jatuh air (m)
Elv	Level elevasi air waduk (mdpl)
η	Efisiensi (%)
Q	Laju aliran air (m ³)
Δt	Jam operasi pembangkit (Jam)
E	Produksi energi listrik (kWh)
CE	Cascade Effectiveness (kWh/m ³)

7. Referensi

- [1] B. Dewan Tomo, I. Made, and I. M. Brunner, "Pengaruh Biodiesel Terhadap Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Dengan Aplikasi APPLE-GATRIK (Studi Kasus PLTD Talaga Sulawesi Tenggara)," *Serambi Engineering*, vol. VII, no. 3, pp. 3406–3413, 2022.
- [2] S. Yana, M. Nizar, and A. Yulisma, "Prospek Utama Pengembangan Energi Terbarukan Di Negara-Negara ASEAN," *Serambi Engineering*, vol. VI, no. 2, pp. 1702–1720, 2021, [Online]. Available: <http://www.erranet.org/OtherActivitie>
- [3] PT PLN (Persero), *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2021-2030*. 2021.
- [4] A. Tayebiyani and T. A. Mohammad, "Optimization of cascade hydropower system operation by genetic algorithm to maximize clean energy output," *Environmental Health Engineering and Management*, vol. 3, no. 2, pp. 99–106, Jun. 2016, doi: 10.15171/ehem.2016.07.
- [5] T. D. Asfaw and S. Saiedi, "Optimal Short-term Cascade Reservoirs Operation using Genetic Algorithm," *Asian Journal of Applied Sciences* 4, vol. 3, pp. 297–305, 2011, doi: 10.3923/ajaps.2011.297.305.
- [6] M. R. A. Mullick *et al.*, "Optimal system operation of the drops-cascading Konto system, Indonesia," *Journal of Applied Water Engineering and Research*, vol. 3, no. 2, pp. 105–121, Jul. 2015, doi: 10.1080/23249676.2015.1033657.
- [7] D. Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Airlangga, 2005.
- [8] D. D. Adhistana, "Rencana Pengoperasian yang Optimum pada Potensi Air Waduk Selorejo untuk Pembangkit Listrik dan Irigasi," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [9] L. W. Mays and Y.-Koung. Tung, *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill, 1992.
- [10] J. S. Gulliver and R. E. A. Arndt, *Hydropower Engineering Handbook*. USA: McGraw-Hill, 1991.

- [11] Nukholis, “Optimasi Pengaturan Pembangkit Listrik Hidro-Terma; dengan Fluktuasi Debit Air,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [12] J. C. Grygier and J. R. Stedinger, “Algorithms for Optimizing Hydropower System Operation,” *Water Resour Res*, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 1985.
- [13] D. Andriyan, A. Suseno, F. Tri Aji, and I. Firmansyah, “Optimasi Produksi Ready Mix Concrete Menggunakan Pemrograman Linier Metode Simplex Pada PT. XYZ,” *Serambi Engineering*, vol. VIII, no. 2, pp. 5335–5341, 2023.
- [14] D. Fylstra, L. Lasdon, J. Watson, and A. Waren, “Design and Use of the Microsoft Excel Solver,” *Interfaces (Providence)*, vol. 28, pp. 29–55, 1998, [Online]. Available: <http://silmaril.smeal.psu.edu/pol.html>
- [15] Winasis, H. Prasetijo, and G. Angga Setia, “Optimasi Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Menggunakan Linear Programming Dengan Batasan Ketersediaan Air Optimization of Hydro Power Plant Operation Using Linear Programming With Constraint of Water Availability,” *Dinamika Rekayasa*, vol. 9, no. 2, 2013.