

Optimalisasi Pembangkitan Energi Listrik PLTA Jatiluhur Menggunakan Pemrograman Linier

Giri Angga Setia^{1#}, Rafly Sulthan Mahdy², Winansi³, Hari Prasetyo⁴

^{1,2}Jurus Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Terusan Jend. Sudirman, Cimahi 40351, Jawa Barat, Indonesia

^{3,4}Jurus Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman

Jl. Prof. HR. Bunyamin 708 – Purwokerto, Jawa Tengah, Indonesia

#giri.anggasetia@gmail.com

Abstrak

Permintaan energi listrik yang semakin meningkat berakibat pada meningkatnya kebutuhan terhadap pembangkit sebagai penyedia energi listrik. Salah satu sumber potensi energi listrik terbesar yang dimiliki Indonesia adalah energi air. Pemanfaatan air yang tepat sebagai sumber energi listrik pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan tugas penting terutama pada PLTA yang menggunakan *reservoir*. Beberapa kendala yang dihadapi PLTA tersebut mengacu pada ketersedian air dan kapasitas pembangkitannya. Dengan demikian optimasi pada PLTA perlu dilakukan untuk menghadapi masalah tersebut. Optimasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan data debit PLTA Jatiluhur selama bulan Mei 2020. Metode optimasi pemrograman linier digunakan sebagai solusi terhadap permasalahan operasional pembangkitan daya pada penelitian ini. Fungsi objektif dari optimasi ini adalah untuk memaksimalkan pembangkitan energi listrik unit generator. Adapun fungsi kendalanya yaitu dengan mempertimbangkan ketersediaan air dan kapasitas pembangkitan. Hasil perhitungan dalam periode operasi satu bulan menunjukkan bahwa PLTA berpotensi memproduksi energi listrik lebih besar 11,14% dibandingkan kondisi *existing* atau dengan selisih 7.938,6 MWh. Selain itu rata-rata efisiensi mengalami kenaikan sebesar 0,7%. Dengan demikian hasil tersebut dapat mengindikasikan bahwa implementasi metode pemrograman linier berjalan baik dan efektif dalam memecahkan masalah operasi pembangkitan daya PLTA.

Kata kunci: optimasi, pemrograman linier, PLTA, pembangkitan energi listrik

Abstract

The increasing demand for electrical energy results in an increasing need for generators as a provider of electrical energy. One of Indonesia's largest potential sources of electrical energy is water energy. Proper use of water as a source of electrical energy in hydroelectric power plants (PLTA) is an important task, especially in hydropower plants that use reservoirs. Some of the obstacles faced by the hydropower plant refer to the availability of water and its generating capacity. Thus optimization on hydropower needs to be done to deal with these problems. The optimization carried out in this study used data from the Jatiluhur hydropower plant discharge during May 2020. The linear programming optimization method was used as a solution to the operational problems of power generation in this study. The objective function of this optimization is to maximize the generation of electrical energy from the generator unit. The constraint function is by considering water availability and generating capacity. The calculation results in the one month operating period show that the hydropower plant has the potential to produce 11.14% greater electrical energy compared to the existing conditions or with a difference of 7,938.6 MWh. In addition, the average efficiency increased by 0.7%. Thus these results can indicate that the implementation of the linear programming method is running well and is effective in solving the problem of operating hydropower generation.

Keywords: optimization, linear programming, PLTA, electrical energy generation

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan Outlook Energi Indonesia 2019 bahwa permintaan energi listrik cenderung selalu lebih tinggi dibanding permintaan jenis energi

lainnya. Tercatat selama periode 2018-2050 laju pertumbuhan permintaan energi listrik rata-rata sebesar 4-5 % setiap tahunnya [1]. Selain itu, berdasarkan data yang dimiliki Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik

Indonesia, bahwa potensi energi air yang dimiliki Indonesia cukup besar, yaitu mencapai 75 ribu MW yang tersebar di berbagai provinsi. Namun pemanfaatan air sebagai penyedia energi listrik nasional baru hanya mencapai 10,1% dari total potensi yang dimiliki [2]. Sebagai salah satu sumber energi terbesar, perlunya memaksimalkan pemanfaatan air yang tepat sebagai sumber pembangkitan energi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Energi air saat ini telah mencapai pengembangan yang pesat secara teknis dalam menghasilkan pembangkitannya energi listrik jika dibandingkan dengan energi lainnya. Maka dari itu banyak pendekatan dan pengembangan yang dilakukan dalam memaksimalkan operasinya [3].

PLTA yang beroperasi khususnya dengan sistem *reservoir* harus dapat memaksimalkan pembangkitan energi listrik dengan mempertimbangkan sumber daya yang ada. Salah satu sumber daya (*resource*) pada PLTA yaitu ketersedian air pada *reservoir*. Permasalahan ketersediaan air ini mengacu pada beberapa kendala operasi *reservoir* untuk PLTA diantaranya ketinggian muka air, tinggi jatuh air pada turbin (*head*), debit yang masuk ke *reservoir*, hingga debit air yang keluar dari *reservoir* baik yang digunakan untuk memutar turbin maupun yang keluar melalui sistem *bypass* pada periode waktu tertentu, begitu juga dengan kendala fisik lainnya.

Salah satu tantangan lain pada PLTA adalah pemanfaatan optimasi sistem *multi-reservoir*. Hal ini diakibatkan oleh variabel-variabel non-linier yang kompleks seperti penyimpanan aktif *reservoir*, laju pelepasan energi air, dan tekanan air akibat tinggi jatuh (*head*). Beberapa pengembangan metode seperti meta-heuristik menjadi salah satu solusi yang dikembangkan untuk memecahkan permasalahan optimalisasi tersebut [4], [5].

Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai optimalisasi PLTA dengan menggunakan berbagai macam metode. Beberapa diantara metode tersebut adalah penerapan metode *linear programming* pada penelitian optimalisasi PLTA jangka pendek dan menengah, kemudian memodelkan tinggi jatuh air sebagai batasan operasinya, hal tersebut dilakukan oleh Winasis, dkk [6], [7]. Metode permrograman non-linier pada penelitian optimalisasi penjadwalan PLTA jangka pendek juga telah dilakukan oleh Catalao, dkk [8].

Penelitian lain menggunakan metode heuristik, dilakukan oleh Choubey yang membandingkan antara metode algoritma genetika, metode algoritma evolusi diferensial, dan metode *Particle Swarm Optimization* untuk optimalisasi penjadwalan PLTA [9]. Selain itu penelitian mengenai optimasi desain dan operasi PLTA *reservoir* dengan memperhatikan

ketidakpastian debit *inflow* dilakukan oleh Hoseinzadeh, T, dkk [10] dengan menerapkan dua metode yaitu PSO dan *Cuckoo Optimization Algorithm (COA)* untuk mendapatkan solusinya.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan optimalisasi pembangkitan energi listrik di PLTA Jatiluhur dengan memaksimalkan produksi energi listrik berdasarkan batasan/kendala operasinya menggunakan metode pemrograman linier. Batasan operasi dalam penelitian ini berdasarkan *resource* PLTA yaitu air di *reservoir* dan kapasitas pembangkitan energi listriknya.

II. METODE PENELITIAN

Tujuan dari optimalisasi pembangkitan daya PLTA pada penelitian ini adalah untuk memaksimalkan produksi energi listrik pada periode operasi jangka menengah yaitu satu bulan dengan mempertimbangkan berbagai macam kendala fisik dan operasional pada *reservoir* dengan interval waktu setiap jam. Persamaan (1) berikut menyatakan rumus dari energi listrik yang dibangkitkan.

$$P_i(t) = 9,8 \cdot H(t) \cdot Q_i(t) \cdot \eta \quad (1)$$

Sedangkan untuk fungsi objektif dapat dinyatakan secara matematis pada persamaan (2) berikut ini.

$$\max f = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T E_i(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_i(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

dengan:

$P_i(t)$ = Daya generator unit ke-i pada waktu t (kW)

$H(t)$ = *Head* pada waktu t (m)

$Q_i(t)$ = Debit turbin unit ke-i pada waktu t (m^3/s)

η = Efisiensi keseluruhan PLTA

$E_i(t)$ = Energi yang diproduksi generator unit ke-i pada waktu t (kWh)

f = fungsi objektif

Δt = jumlah jam dalam periode waktu

Dalam mencapai tujuan yang dinyatakan pada (2) terdapat beberapa macam kendala yang dipertimbangkan diantaranya kendala persamaan hubungan antara tinggi jatuh air (*head*) dan tinggi muka air pada *reservoir* dengan debit air masuk dan debit air keluar dari *reservoir*. Menurut Winasis, dkk [6], [7] pada penelitian dalam masalah operasi *reservoir* dan PLTA, *head* sangat erat kaitannya dengan tinggi muka air *reservoir*. Sementara itu debit air masuk dan keluar akan mempengaruhi tinggi muka air *reservoir* tersebut. Semakin besar debit air yang masuk maka akan semakin besar pula kenaikan tinggi muka air, sedangkan semakin besar

debit air yang keluar maka akan semakin besar pula penurunan tinggi muka air. Selain itu luas permukaan *reservoir* juga akan mempengaruhi. Dengan demikian debit air juga akan mempengaruhi *head* turbin. Pada penelitian ini fungsi untuk kendala tersebut dikembangkan dengan menambahkan beberapa faktor lain yang berpengaruh diantaranya debit yang berasal dari curah hujan di *reservoir* dan sekitarnya serta debit pelimpahan melalui *bypass system* dari *reservoir*. Secara matematis kendala tersebut dapat dinyatakan pada persamaan di bawah ini.

$$TMA(t+1) = TMA(t) + \frac{\sum_{i=1}^n Qin_i(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n QT_i(t)}{A} - \frac{Qbp(t)}{A} \quad (3)$$

$$H(t+1) = H(t) + \frac{\sum_{i=1}^n Qin_i(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n QT_i(t)}{A} - \frac{Qbp(t)}{A} \quad (4)$$

$$Trc(t) = TMA(t) - H(t) \quad (5)$$

$$i=1,2,\dots,N; t=1,2,\dots,T;$$

dengan:

$TMA(t+1)$	= Tinggi muka air pada waktu $t+1$ (m)
$TMA(t)$	= Tinggi muka air pada waktu t (m)
$H(t+1)$	= <i>Head</i> pada waktu $t+1$ (m)
$Qin_i(t)$	= Debit air masuk sumber i pada waktu t (m^3/s)
$QT_i(t)$	= Debit air keluar turbin unit i pada waktu t (m^3/s)
$Qbp(t)$	= Debit air pelimpahan (m^3/s)
A	= Luas permukaan <i>reservoir</i> (m^2)
$Trc(t)$	= <i>Tailrace</i> pada waktu t (m)

Adapun beberapa kendala operasional *reservoir* dan pembangkit berupa batasan operasi maksimum dan minimum yang telah ditetapkan atau diizinkan sebelumnya, diantaranya tinggi muka air pada *reservoir*, *head* pada turbin, daya kapasitas daya pembangkitan unit generator yang masing dinyatakan pada persamaan (6) – (9) berikut:

$$TMA^{min} \leq TMA(t) \leq TMA^{max} \quad (6)$$

$$H^{min} \leq H(t) \leq H^{max} \quad (7)$$

$$Trc^{min} \leq Trc(t) \leq Trc^{max} \quad (8)$$

$$P_i^{min} \leq P_i(t) \leq P_i^{max} \quad (9)$$

dengan:

TMA^{min}	= Tinggi muka air <i>reservoir</i> minimum (m)
TMA^{max}	= Tinggi muka air <i>reservoir</i> maksimum (m)
H^{min}	= Tinggi jatuh air/ <i>head</i> minimum (m)
H^{max}	= Tinggi jatuh air/ <i>head</i> maksimum (m)
Trc^{min}	= Tinggi muka air <i>tailrace</i> minimum (m)
Trc^{max}	= Tinggi muka air <i>tailrace</i> maksimum (m)
P_i^{min}	= Daya pembangkitan minimum Generator unit i (kW)
P_i^{max}	= Daya pembangkitan maksimum generator unit i (kW)

Pada penelitian ini metode optimalisasi model pemrograman linier digunakan dalam menyelesaikan masalah operasional *reservoir* dan PLTA tersebut. Simulasi perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan data *input* berupa data teknis diantaranya luas permukaan *reservoir* 83 km^2 . Adapun data operasional diantaranya data debit masuk dari beberapa sumber termasuk curah hujan, debit pelimpahan, dan data yang dijadikan kendala berdasarkan beberapa persamaan dan pertidaksamaan yang telah disebutkan sebelumnya diantaranya, batas tinggi muka air pada *reservoir* yaitu:

$$104 \leq TMA(t) \leq 106,9 \text{ meter}$$

batas tinggi jatuh air (*head*) pada turbin:

$$77 \leq H(t) \leq 80,2 \text{ meter}$$

batas daya pembangkitan unit generator:

$$21 \leq P(t) \leq 32,3 \text{ MW}$$

serta rata-rata efisiensi dalam satu bulan yaitu 0,925.

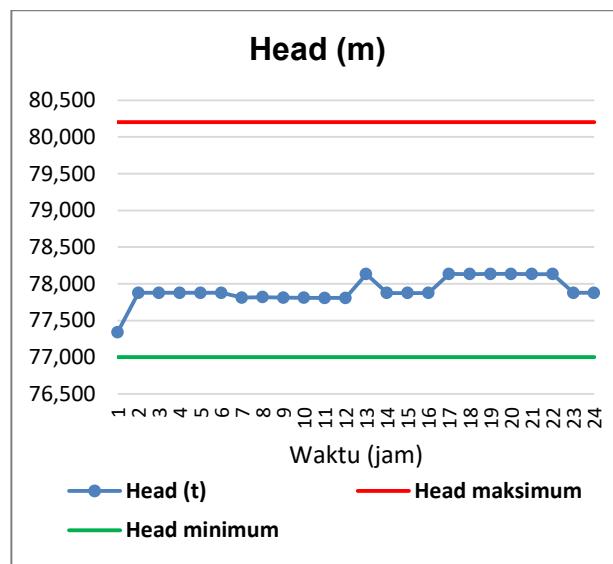
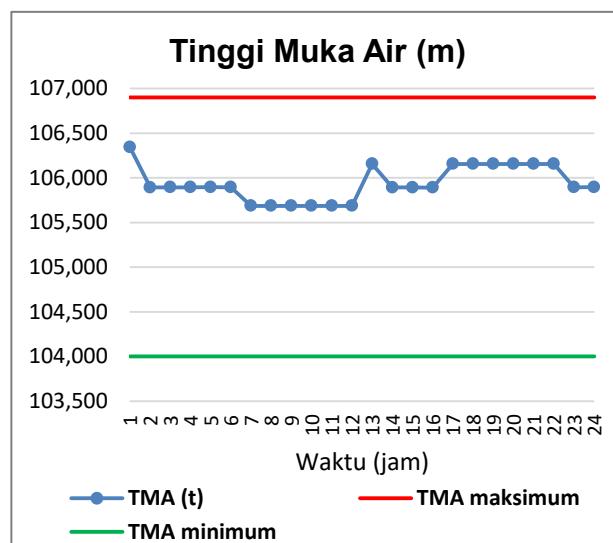
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perumusan dan pemodelan diimplementasikan terhadap data PLTA Jatiluhur selama jangka waktu 1 bulan pada Mei 2020. Hasil dari simulasi perhitungan berupa optimasi pembangkitan energi listrik unit generator. Kemudian kaitan antara debit dengan daya generator yang dihasilkan. Tabel 1 menampilkan debit masuk dari tiga sumber yang berbeda, termasuk debit masuk dari rata-rata curah hujan sekitar *reservoir* (Qin_3) dan debit pelimpahan (Qbp) selama operasi 24 jam.

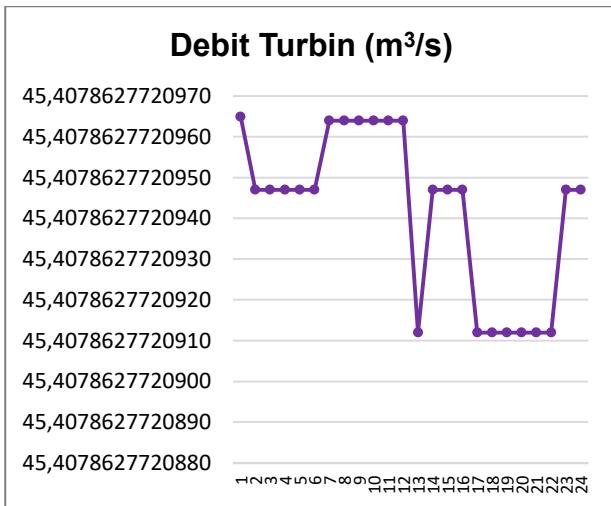
Tabel 1. Debit masuk dan pelimpahan

Jam	Q_{in_1} (m ³ /s)	Q_{in_2} (m ³ /s)	Q_{in_3} (m ³ /s)	Q_{bp} (m ³ /s)
1	389,74	4,56	2,14	77,00
2	384,79	4,56	2,14	77,00
3	389,79	4,56	2,14	77,00
4	404,79	4,47	2,14	77,01
5	452,64	4,37	2,14	77,02
6	422,55	4,37	2,14	77,02
7	162,24	4,35	2,14	77,02
8	0,00	4,52	2,14	77,01
9	140,52	4,82	2,14	77,00
10	145,04	4,82	2,14	0,00
11	177,56	4,91	2,14	0,00
12	189,31	4,82	2,14	0,00
13	238,18	4,46	2,14	0,00
14	287,95	4,28	2,14	0,00
15	300,63	4,33	2,14	0,00
16	253,70	4,16	2,14	0,00
17	201,37	3,79	2,14	0,00
18	243,74	3,71	2,14	0,00
19	218,31	4,11	2,14	0,00
20	213,23	4,11	2,14	0,00
21	309,64	4,11	2,14	77,02
22	304,67	6,50	2,14	77,04
23	356,13	49,22	2,14	77,04
24	449,59	71,74	2,14	158,53

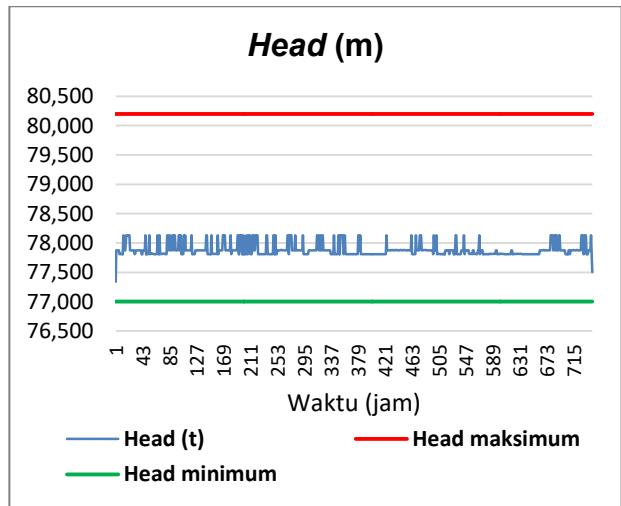
Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan tinggi jatuh air (*head*) dan tinggi muka air pada *reservoir* pada turbin selama operasi 24 jam dari hasil simulasi perhitungan menggunakan metode pemrograman linier yang telah dilakukan. Berdasarkan tabel tersebut, tinggi jatuh air (*head*) pada turbin berkisar antara 77,34 sampai dengan 78,13 meter, sedangkan tinggi muka air pada *reservoir* berkisar antara 105,70 sampai dengan 106,34 meter. Dengan demikian hasil optimalisasi pembangkitan energi listrik dengan batasan operasi berupa *resource* PLTA yaitu air di *reservoir* berada pada batasan kapasitas pembangkitan yang diizinkan. Sehingga metode pemrograman linier berhasil diterapkan pada kondisi batasan operasi yang telah ditetapkan yaitu berdasarkan *resource* pada *reservoir* di PLTA.

**Gambar 1. Grafik head hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 hari****Gambar 2. Grafik tinggi muka air hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 hari**

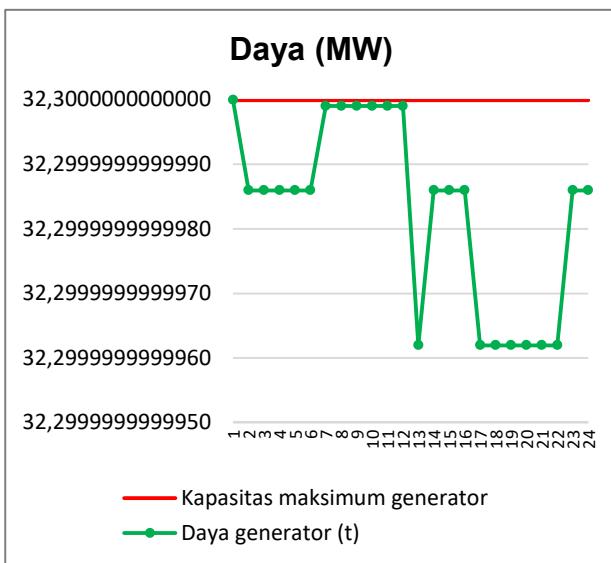
Gambar 3 menunjukkan debit yang digunakan oleh unit turbin berikut daya yang dibangkitkan oleh unit generator selama operasi 24 jam dari hasil simulasi perhitungan menggunakan metode pemrograman linier yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil simulasi perhitungan optimalisasi operasi *reservoir* untuk pembangkitan daya di PLTA menggunakan metode optimalisasi pemrograman linier, diketahui debit yang digunakan oleh unit turbin selama 24 jam berdasarkan grafik, unit turbin tersebut menggunakan debit sebesar 45,40 m³/s. Besar selisih debit yang digunakan antara interval waktu sangat kecil, sehingga dapat dikatakan relatif konstan.



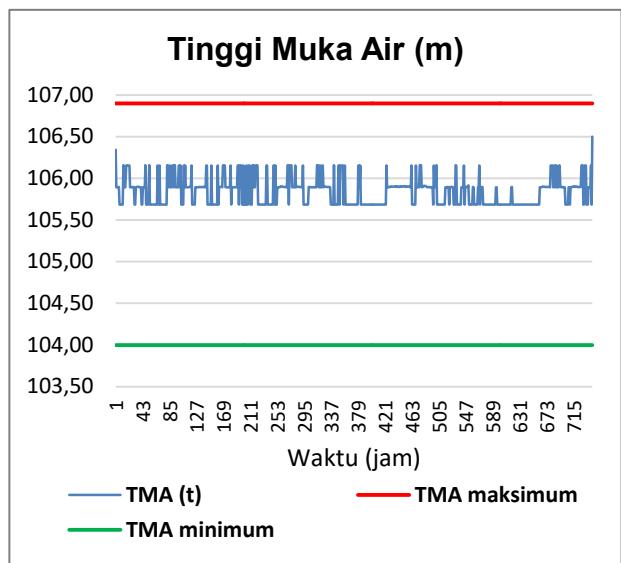
Gambar 3. Grafik debit turbin hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 hari



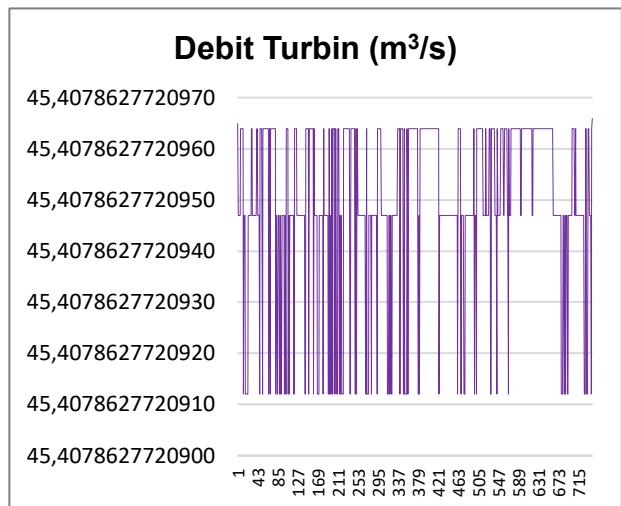
Gambar 5. Grafik head hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 bulan



Gambar 4. Grafik daya generator hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 hari



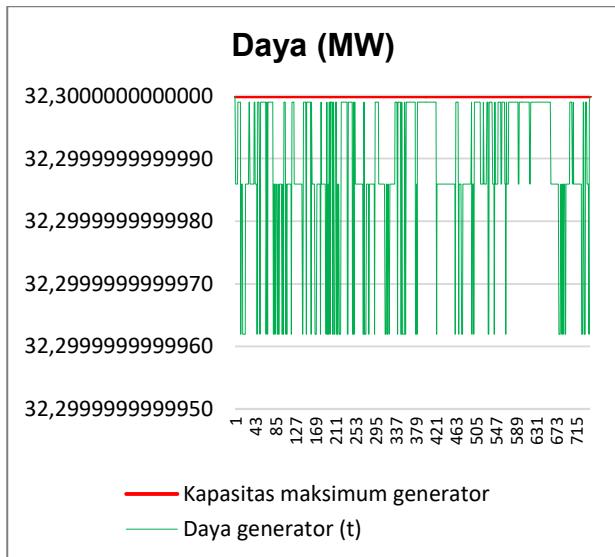
Gambar 6. Grafik tinggi muka air hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 bulan



Gambar 7. Grafik debit turbin hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 bulan

Bagaimana dengan daya yang dibangkitkan oleh generator seperti pada Gambar 4 yaitu sebesar 32,29 MW dengan selisih antara interval waktu sangat kecil sehingga dapat dikatakan konstan dan sebanding dengan debit yang digunakan oleh turbin. Selain itu daya yang dibangkitkan oleh generator masih dalam batas yang diizinkan, yaitu sebesar 32,3 MW.

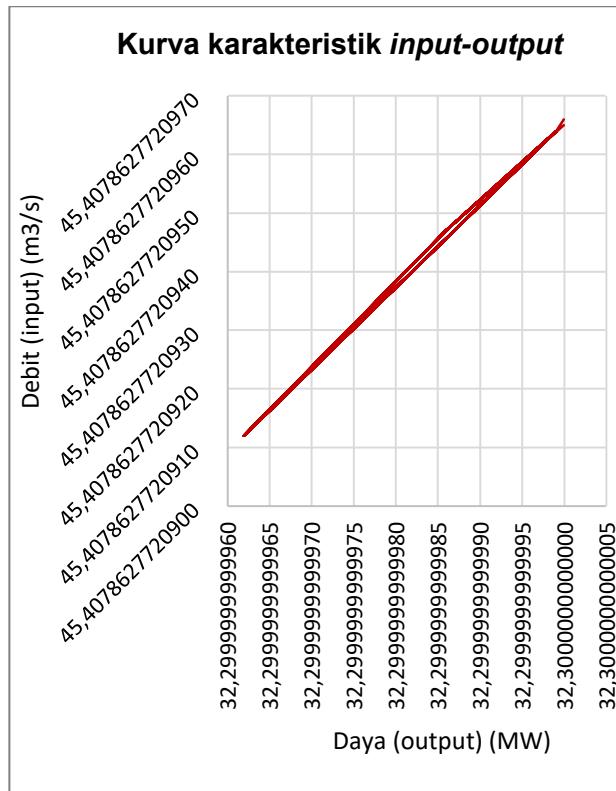
Adapun hasil simulasi perhitungan dalam periode operasi 1 bulan (744 jam) yang ditampilkan masing-masing pada Gambar 5 untuk head, Gambar 6 untuk tinggi muka air, Gambar 7 untuk debit turbin, dan Gambar 8 untuk daya.



Gambar 8. Grafik daya generator hasil simulasi perhitungan periode operasi 1 bulan

Berdasarkan hasil simulasi jangka operasi selama satu bulan, untuk hasil simulasi untuk tinggi jatuh air (*head*) berkisar antara 77,34 meter hingga 78,13 meter. Selisih antara tinggi jatuh air (*head*) maksimum dan minimum hasil dari simulasi yaitu sebesar 0,79 meter. Jika dibandingkan dengan selisih antara tinggi jatuh air (*head*) maksimum dan minimum data operasional di lapangan selisihnya yaitu sebesar 1,19 meter. Sementara itu, ketinggian muka air pada *reservoir* berkisar antara 105,68 hingga 106,50 meter. Selisih antara ketinggian maksimum dan minimum hasil simulasi yaitu sebesar 0,82 meter. Jika dibandingkan dengan selisih antara ketinggian maksimum dan minimum data operasional di lapangan (kondisi *existing*) selisihnya yaitu sebesar 0,15 meter. Hasil simulasi untuk *head* dan tinggi muka air pada *reservoir* tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan data operasional (kondisi *existing*). Perbedaan antara data operasional di lapangan (kondisi *existing*) dengan hasil simulasi baik untuk ketinggian muka air pada *reservoir* maupun tinggi jatuh air (*head*) menunjukkan selisih yang relatif kecil. Sementara itu, sama dengan data operasional di lapangan (kondisi *existing*), hasil simulasi untuk periode operasi 1 bulan juga memenuhi syarat yang telah ditetapkan mengenai batas maksimum dan batas minimum ketinggian muka air dan tinggi jatuh air (*head*) yang diizinkan.

Debit yang digunakan oleh masing-masing unit turbin berdasarkan hasil simulasi perhitungan menunjukkan nilai yang relatif konstan dengan perbedaan nilai antara interval waktu selama periode operasi yang sangat kecil. Dengan demikian daya yang dibangkitkan oleh masing-masing unit generator juga mengikuti besar debit air yang digunakan oleh masing-masing unit turbin.



Gambar 9. Karakteristik *input-output* PLTA total hasil simulasi

Gambar 9 menunjukkan kurva karakteristik *input-output* PLTA berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan. Kurva karakteristik *input-output* pada PLTA menggambarkan hubungan antara debit air (*input*) yang digunakan sebagai penggerak turbin dengan daya (*output*) yang dibangkitkan oleh generator. Diketahui bahwa semakin besar debit yang digunakan untuk memutar turbin, maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh generator. Berdasarkan Gambar 9 diatas kurva karakteristik *input-output* PLTA hasil simulasi menunjukkan hasil yang linier sama seperti kurva karakteristik *input-output* PLTA ideal. Hal ini juga dapat mengindikasikan bahwa metode pemrograman linear berhasil diterapkan pada optimalisasi pembangkitan daya PLTA.

Total energi yang diproduksi unit generator selama periode operasi 1 bulan (744 jam) berdasarkan dari data operasional di lapangan (kondisi *existing*) yaitu sebesar 23.064 MWh, sedangkan berdasarkan hasil simulasi perhitungan optimalisasi total energi yang dapat diproduksi yaitu sebesar 24.031,2 MWh. Data menunjukkan hasil simulasi lebih besar dibandingkan data operasional di lapangan (kondisi *existing*) dengan besar selisih antara kedua data tersebut sebesar 967,2 MWh. Hal tersebut sudah cukup mengindikasikan bahwa hasil simulasi perhitungan optimalisasi operasional *reservoir* dan PLTA menggunakan metode optimalisasi pemrograman linier mendapatkan hasil

yang diharapkan dan memuaskan sesuai dengan fungsi tujuan. Sementara itu efisiensi rata-rata dalam jangka operasi satu bulan mengalami kenaikan dari 92,5% menjadi 93,2%.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dari hasil simulasi perhitungan, tinggi jatuh air (*head*), tinggi muka air, dan daya pembangkitan generator masih dalam batas operasi minimum dan maksimum yang diizinkan. Potensi energi listrik total yang dapat diproduksi selama operasi satu bulan hasil simulasi optimalisasi lebih besar 4,02% dari kondisi *existing* di lapangan. Perbedaan antara kondisi *existing* dengan hasil simulasi juga dapat disebabkan oleh faktor-faktor yang belum diperhitungkan seperti misalnya, evaporasi pada *reservoir*, rugi-rugi di pipa pesat, dan rugi-rugi pada peralatan penunjang lainnya pada PLTA serta kebijakan-kebijakan pengelola PLTA dalam hal memproduksi listrik dan membuang debit ke hilir. Berdasarkan beberapa kesimpulan diatas dapat disimpulkan kembali bahwa implementasi pemrograman lineer berjalan baik dan efektif untuk memecahkan masalah operasional PLTA dan *reservoir*-nya. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan metode optimasi lainnya untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik pada rentang waktu yang lebih lama.

REFERENSI

- [1] BPPT, *Outlook Energi Indonesia 2019 The Impact of Increased Utilization of New and Renewable energy on the National Economy*. 2019.
- [2] Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, “Outlook Energi Indonesia 2019,” *Outlook Energi Indones.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [3] A. S. Azad, M. S. A. Rahaman, J. Watada, P. Vasant, and J. A. G. Vintaned, “Optimization of the hydropower energy generation using Meta-Heuristic approaches: A review,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2230–2248, 2020.
- [4] I. Ahmadianfar, A. Kheyrandish, M. Jamei, and B. Gharabaghi, “Optimizing operating rules for multi-reservoir hydropower generation systems: An adaptive hybrid differential evolution algorithm,” *Renew. Energy*, vol. 167, pp. 774–790, Apr. 2021.
- [5] A. T. Hammid *et al.*, “A review of optimization algorithms in solving hydro generation scheduling problems,” *Energies*, vol. 13, no. 11, pp. 1–21, 2020.
- [6] W. Winasis, H. Prasetijo, G. A. Setia, and W. Ananda, “Optimasi Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Menggunakan Linear Programming Dengan Batasan Ketersediaan Air,” *Din. Rekayasa*, vol. 9, no. 2, pp. 1–6, 2015.
- [7] Winasis, H. Prasetijo, and G. A. Setia, “Optimalisasi Jangka Menengah PLTA Memperhatikan Ketersediaan Air Menggunakan Linear Programming,” *Inteti*, vol. 03, no. 2, pp. 152–156, 2014.
- [8] J. P. S. Catalao, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, and L. A. F. M. Ferreira, “Nonlinear optimization method for short-term hydro scheduling considering head-dependency,” *Eur. Trans. Electr. POWER*, no. November 2008, 2010.
- [9] S. Choubey, “Genetic algorithm, particle swarm optimization and differential evolution algorithm for optimal hydro generation scheduling,” *Proc. 2017 Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. ICICCS 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 486–491, 2017.
- [10] T. Hoseinzadeh, M. Shourian, and J. Yazdi, “Optimum design and operation of a hydropower reservoir considering uncertainty of inflow,” *J. Hydroinformatics*, vol. 22, no. 6, pp. 1452–1467, 2020.

