

Optimalisasi Jangka Menengah PLTA Memperhatikan Ketersediaan Air Menggunakan *Linear Programming*

Winasis¹, Hari Prasetyo², Giri Angga Setia³

Abstract—Hydro power plant is kind of electric power generation which utilize energy from water fall to produce electricity. One of its operational problem is limited water supply and available water which can be stored in reservoir. This limitation will affect the electrical energy can be generated by the hydro power plant. This paper present a methodology of medium term optimization of hydro power plant operation to maximize its energy production with considering water availability in reservoir as operational constraint. Operation optimization problem is formulated in Linear Programming model and then solved using Tomlab optimization software. Simulations using water flow data of Ketenger Hydro Power Plant on June 2013 show that this method can be used to solve hydro power plant operation optimization problem well. Based on the simulation results with a period of 720 hours (1 month) the total electrical energy that can be generated is equal to 2990.8 MWh. This value is 69,6 MWh (or 2,3%) greater when compared to the real condition of electrical power generated in June with ammount of 2921,2 MWh.

Intisari—Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan tenaga jatuh air untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu masalah operasi PLTA adalah pasokan air dan ketersediaan air yang terbatas dan dapat disimpan dalam *reservoir* atau kolam tando. Keterbatasan ini akan mempengaruhi energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh PLTA. Penelitian ini menyajikan metodologi optimalisasi operasi jangka menengah PLTA untuk memaksimalkan energi yang dihasilkan PLTA dengan memperhatikan ketersediaan air di *reservoir* sebagai batasan operasinya. Permasalahan optimasi operasi PLTA ini diformulasikan ke dalam model *Linear Programming* dan diselesaikan dengan software optimasi Tomlab. Simulasi menggunakan data debit PLTA Ketenger Baturaden pada bulan Juni 2013 menunjukkan bahwa metode ini dapat memecahkan permasalahan optimalisasi operasi PLTA dengan baik. Berdasarkan hasil simulasi dengan periode 720 jam (1 bulan) energi listrik total yang dapat dihasilkan adalah sebesar 2990,8 MWh. Nilai ini lebih besar 69,6 MWh (2,3%) jika dibandingkan dengan kondisi real energi listrik di bulan Juni sebesar 2921,2 MWh.

Kata Kunci— optimalisasi, jangka menengah, ketersediaan air, PLTA, *Linear Programming*.

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi listrik dari masyarakat menyebabkan kebutuhan terhadap pembangkit yang mampu membangkitkan energi listrik dalam jumlah besar. Energi

listrik dibangkitkan di pusat-pusat pembangkit listrik termasuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Salah satu aspek pengoperasian PLTA adalah penjadwalan air yang dilepaskan untuk dikonversi menjadi energi listrik. Permasalahan penjadwalan pembangkit hidro melibatkan permasalahan ketersediaan air dan penjadwalan air pada *reservoir* yang dilepaskan selama selang waktu penjadwalan tertentu, tergantung pada kapasitas *reservoir*. [1] Pengoperasian PLTA umumnya bertujuan memaksimalkan sumber daya air (*resource*) yang ditampung di *reservoir* agar diperoleh pembangkitan energi atau keuntungan ekonomi yang paling maksimal. Pengoperasian atau penjadwalan PLTA yang optimal dapat memberikan keuntungan antara lain memaksimalkan nilai sumber daya air dan meminimalkan biaya pembangkitan.

Terkait optimasi pada operasi PLTA ini beberapa penelitian telah dilakukan. Pratama [2] melakukan penelitian mengenai optimasi waduk untuk menganalisis debit andalan harian dan optimal daya di PLTA menggunakan metode *Mass Curve*. Pada penelitian lain Cheng, dkk [3] dan aswaf [4] menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) untuk menganalisis optimasi operasi *reservoir* PLTA. Beberapa penelitian menggunakan metode yang berbeda dalam mengoptimalkan *reservoir* PLTA seperti : *Evolutionary Algorithm* [5], *Particle Swarm Optimization* [6], dan *Non Linear Optimization* [7]. Penggunaan Pemrograman Linear untuk optimasi PLTA antara lain dilakukan oleh Tarigan [8] untuk mengoptimalkan pemanfaatan air waduk Kedungombo untuk memenuhi kebutuhan irigasi, air baku dan PLTA.

Salah satu faktor utama yang berpengaruh terhadap energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh PLTA adalah ketersediaan air di kolam tando (*reservoir*). Ketersediaan air pada *reservoir* ini antara lain dipengaruhi oleh: debit aliran masuk (*inflow*) yang didapat dari sungai-sungai sekitar, curah hujan, penguapan (evaporasi), serta pemanfaatan air baik untuk pembangkitan atau keperluan lain.

Penelitian ini membahas pengoptimalan operasi PLTA dengan *reservoir* berupa kolam tando harian. Optimasi bertujuan untuk memaksimalkan energi listrik yang dibangkitkan PLTA dengan memperhatikan ketersediaan air di kolam tando sebagai fungsi batasan operasinya. Optimasi pengoperasian PLTA ini diformulasikan menggunakan model *Linear Programming* dan penyelesaian formulasi optimasi dilakukan menggunakan software optimasi Tomlab.

II. METODOLOGI

A. Perumusan Masalah Optimalisasi

Optimasi ini dilakukan untuk memaksimalkan besar nilai energi listrik yang dihasilkan dalam periode operasi tertentu.

^{1,2,3}Peneliti, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknik Universitas Jenderal Soedirman; e-mail: waseis@yahoo.com

Fungsi tujuan optimasi diberikan pada persamaan 1 dan 2 berikut :

$$\text{maks} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T E_{gi}(t) \quad (1)$$

$$E_{gi}(t) = P_{gi}(t) \times \Delta t = \{9,8h(t)Q_{out,i}(t)\eta\} \times \Delta t \quad (2)$$

dengan:

$E_{gi}(t)$ = energi generator i pada waktu t (kWh)

$P_{gi}(t)$ = daya pembangkitan generator i pada waktu t (kW)

$h(t)$ = tinggi jatuh air/ *head* pada waktu t (m)

$Q_{out,i}(t)$ = debit aliran keuar unit i pada waktu t (m^3/s)

η = efisiensi

Δt = selang waktu penjadwalan (jam)

T = periode penjadwalan

Besar energi yang dihasilkan oleh generator merupakan fungsi daya pembangkitan dikalikan selang waktu pembangkitan. Nilai daya pembangkitan adalah sebanding dengan tinggi jatuh air dan debit serta dipengaruhi oleh efisiensi generator.

B. Batasan Operasi

Dalam pengoptimalan PLTA ini, beberapa kendala (*constraints*) yang dipertimbangkan menjadi batasan operasional yaitu :

1) Elevasi dan tingi jatuh

Elevasi *reservoir* dibatasi diantara nilai minimal dan maksimal yang diperbolehkan. Nilai elevasi maksimal *reservoir* terkait dengan kapasitas maksimum air yang dapat ditampung. Sedangkan elevasi minimal dibatasi terkait operasi PLTA agar tetap stabil. Dengan nilai elevasi yang dibatasi, maka ketinggian jatuh (*head*) PLTA juga terbatas pada kisaran tertentu. Batasan elevasi dan tinggi jatuh ini dinyatakan pada persamaan 3 dan 4 sebagai berikut.

$$El \leq El(t) \leq El_{maks} \quad (3)$$

$$h_{min} \leq h(t) \leq h_{maks} \quad (4)$$

dengan

$h(t)$ = tinggi jatuh pada step waktu t (m)

h_{min} = tinggi jatuh minimum (m)

h_{maks} = tinggi jatuh maksimum (m)

$El(t)$ = elevasi kolam tando pada waktu t (mdpl)

El_{min} = elevasi minimum (mdpl)

El_{maks} = elevasi maksimum (mdpl)

2) Batas daya pembangkitan unit generator

Daya pembangkitan dan energi yang dihasilkan masing-masing unit generator pada setiap waktu t dibatasi antara minimal dan maksimal, sesuai dengan rating dan batas kerja operasi masing-masing unit pembangkit. Persamaan 5 menunjukkan batasan daya pembangkitan unit generator

$$P_{gi,min} \leq P_{gi}(t) \leq P_{gi,maks} \quad (5)$$

dengan

$P_{gi,min}$ = Daya minimum unit generator i (kW)

$P_{gi,maks}$ = Daya maksimum unit generator i (kW)

3) Debit aliran masuk dan debit aliran keluar pada *reservoir*

Ketinggian elevasi dan tinggi jatuh air pada pembangkit dipengaruhi oleh besar aliran air masuk *reservoir* dan debit aliran air yang keluar *reservoir* (*outflow*). Persamaan 6 dan 7 menunjukkan hubungan antara head, inflow dan outflow ke turbin pada tiap step waktu penjadwalan. Aliran air masuk akan menambah ketinggian elevasi dan tinggi jatuh. Sebaliknya aliran air keluar akan mengurangi ketinggian jatuh air.

$$h(t) = h(t-1) + \frac{Q_{in}(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{out,i}(t)}{A} \quad (6)$$

$$El(t) = El(t-1) + \frac{Q_{in}(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{out,i}(t)}{A} \quad (7)$$

dengan :

$h(t-1)$ = head pada t-1 (m)

$El(t-1)$ = elevasi pada t-1 (m)

$Q_{in}(t)$ = debit aliran masuk pada step waktu t (m^3/s)

$Q_{out,i}(t)$ = debit aliran keuar unit i pada waktu t (m^3/s)

A = Luas permukaan *reservoir* (m^2)

III. SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Formulasi optimasi di atas diimplementasikan menggunakan data PLTA Sub Unit Ketenger Baturraden. Proses pembangkitan daya di PLTA Ketenger menggunakan kolam tando sebagai media penyimpanan/penampung air. Ketersediaan air yang disimpan di kolam tando tergantung dari besarnya sumber air yang diperoleh dari aliran (*inflow*) sungai-sungai sekitar.

PLTA Ketenger memiliki ukuran kolam tando harian muntu sebagai berikut:

- Luas dasar kolam : 1,768 m^2
- Luas permukaan kolam : 4.610,6 m^2
- Elevasi air tertinggi : 663,07 mdpl
- Elevasi air terendah : 658,30 mdpl
- Volume efektif : 20.000 m^3

Pada penelitian ini, analisis optimalisasi dilakukan pada unit generator 1 dan 2 dengan spesifikasi turbin dan generator sebagai berikut

- Jenis turbin : pelton horisontal
- Daya turbin : 3760 kW,
- Putaran : 600 rpm.
- Jenis generator : generator sinkron 3 phase,
- Daya generator : 4400 kVA,
- faktor daya : 0,8
- Daya pembangkitan minimal : 1500 kW
- Daya pembangkitan maksimal: 3500 kW.

Kisaran head operasi turbin generator adalah antara 267,5 – 272,5 meter. Efisiensi keseluruhan pembangkit diasumsikan sebesar 80%. PLTA Ketenger dioperasikan sebagai pemikul beban dasar (*base load*), artinya PLTA ini setiap saat berada pada status beroperasi (*on*).

Pada simulasi ini *economic dispatch* dari sistem interkoneksi Jawa Bali tidak memperhatikan. Optimalisasi

hanya ditujukan untuk menganalisis penggunaan sumber daya air yang tersedia pada reservoir guna menghasilkan energi listrik yang maksimal pada batasan-batasan operasional PLTA.

A. Simulasi Pengoperasian Jangka Pendek

Simulasi optimasi jangka pendek pada periode operasi 24 jam dilakukan dengan menggunakan input data debit aliran masuk PLTA Ketenger selama satu hari. Tabel 1 berikut menunjukkan salah satu hasil simulasi optimasi menggunakan data debit aliran masuk PLTA Ketenger pada tanggal 7 Juni 2013.

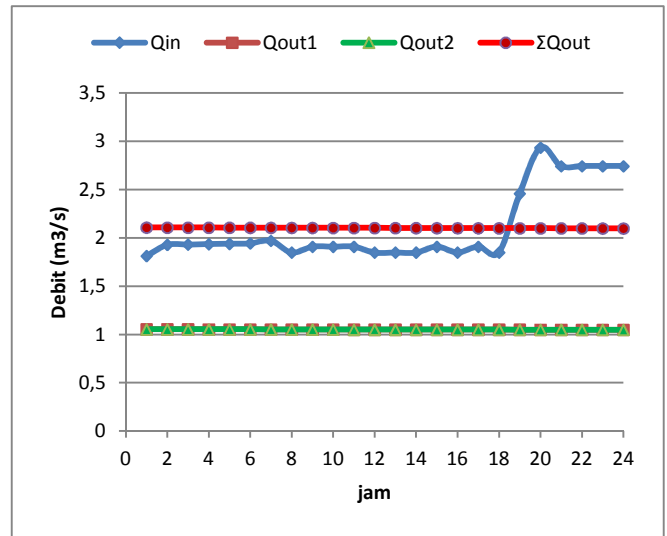
TABEL I
HASIL OPTIMASI 24 JAM MENGGUNAKAN DATA DEBIT ALIRAN MASUK
TANGGAL 7 JUNI 2013

| Jam | Q_{in} (m ³ /s) | Q_{out1} (m ³ /s) | Q_{out2} (m ³ /s) | Elevasi (m) | Head (m) | P_{g1} (kW) | P_{g2} (kW) |
|-----|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|-------------|------------------|------------------|
| 1 | 1,813 | 1,054 | 1,054 | 661,13 | 270,56 | 2246 | 2246 |
| 2 | 1,929 | 1,053 | 1,053 | 661,00 | 270,43 | 2246 | 2246 |
| 3 | 1,932 | 1,053 | 1,053 | 660,86 | 270,29 | 2245 | 2245 |
| 4 | 1,936 | 1,053 | 1,053 | 660,73 | 270,16 | 2245 | 2245 |
| 5 | 1,940 | 1,053 | 1,053 | 660,60 | 270,03 | 2244 | 2244 |
| 6 | 1,944 | 1,052 | 1,052 | 660,47 | 269,90 | 2244 | 2244 |
| 7 | 1,971 | 1,052 | 1,052 | 660,36 | 269,79 | 2243 | 2243 |
| 8 | 1,849 | 1,052 | 1,052 | 660,16 | 269,59 | 2243 | 2243 |
| 9 | 1,910 | 1,052 | 1,052 | 660,01 | 269,44 | 2242 | 2242 |
| 10 | 1,910 | 1,052 | 1,052 | 659,86 | 269,29 | 2242 | 2242 |
| 11 | 1,910 | 1,051 | 1,051 | 659,71 | 269,14 | 2242 | 2242 |
| 12 | 1,849 | 1,051 | 1,051 | 659,51 | 268,94 | 2241 | 2241 |
| 13 | 1,849 | 1,051 | 1,051 | 659,31 | 268,74 | 2241 | 2241 |
| 14 | 1,849 | 1,051 | 1,051 | 659,11 | 268,54 | 2240 | 2240 |
| 15 | 1,910 | 1,051 | 1,051 | 658,96 | 268,39 | 2240 | 2240 |
| 16 | 1,850 | 1,050 | 1,050 | 658,77 | 268,20 | 2239 | 2239 |
| 17 | 1,910 | 1,050 | 1,050 | 658,62 | 268,05 | 2239 | 2239 |
| 18 | 1,850 | 1,050 | 1,050 | 658,42 | 267,85 | 2239 | 2239 |
| 19 | 2,460 | 1,050 | 1,050 | 658,70 | 268,13 | 2238 | 2238 |
| 20 | 2,935 | 1,050 | 1,050 | 659,35 | 268,78 | 2238 | 2238 |
| 21 | 2,743 | 1,050 | 1,050 | 659,86 | 269,29 | 2237 | 2237 |
| 22 | 2,743 | 1,049 | 1,049 | 660,36 | 269,79 | 2237 | 2237 |
| 23 | 2,743 | 1,049 | 1,049 | 660,86 | 270,29 | 2237 | 2237 |
| 24 | 2,743 | 1,049 | 1,049 | 661,37 | 270,8 | 2236 | 2236 |

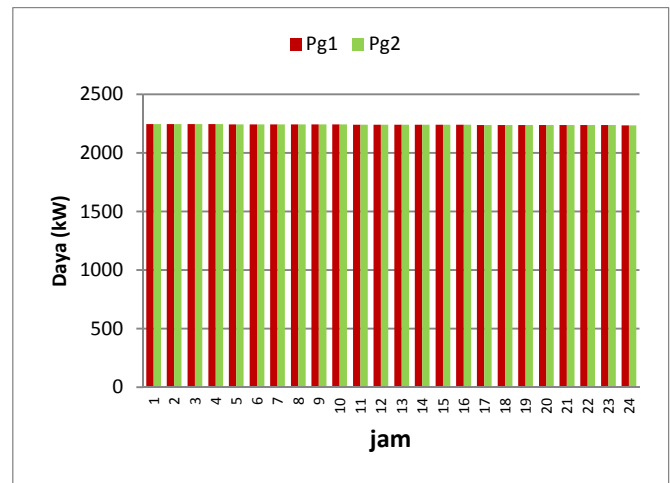
Gbr.1 dan Gbr.2 berikut memperlihatkan hasil simulasi berupa debit aliran masuk dan aliran keluar ke masing-masing unit generator dan daya yang dibangkitkan oleh generator pada setiap step jam selama 24 jam penjadwalan.

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, menunjukkan bahwa metode optimasi pemrograman linear dapat menyelesaikan permasalahan optimasi operasi PLTA secara efektif. Pada debit aliran masuk yang bervariasi dengan nilai berkisar antara 1,81 hingga 2,94 m³/detik sebagaimana diperlihatkan pada Gbr. 1, daya pembangkitan PLTA berada pada batasan kemampuan generator yang ditetapkan (Gbr. 2). Pada simulasi ini daya pembangkitan generator berada pada nilai kisaran sama dan tetap antara 2236 hingga 2246 kW. Hal ini adalah

karena spesifikasi dan karakteristik kedua unit generator adalah serta adalah sama.

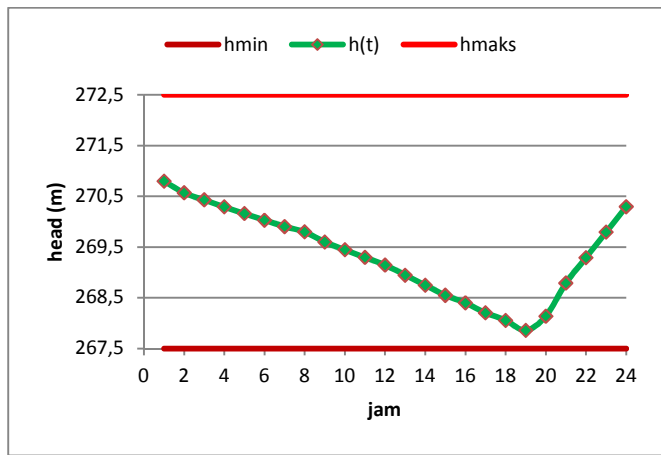


Gbr. 1 Grafik debit aliran masuk ke reservoir 24 jam

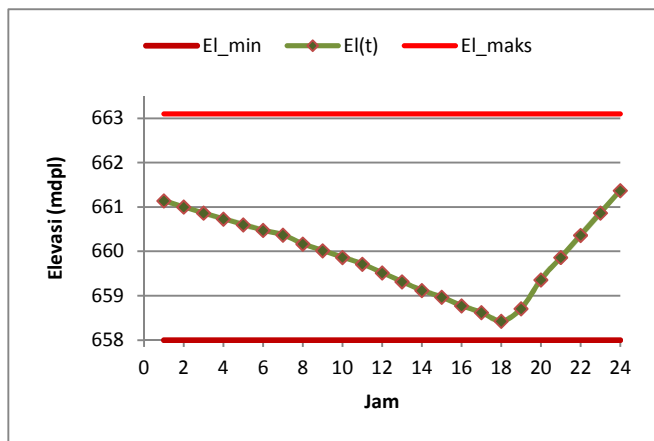


Gbr. 2 Grafik simulasi daya pembangkitan unit generator 1 dan 2

Perubahan debit aliran masuk dan debit keluar untuk pembangkitan daya akan berpengaruh pada fluktuasi elevasi dan head pembangkit sebagaimana diperlihatkan pada Gbr. 3 dan Gbr. 4. Penurunan tinggi jatuh dan elevasi terjadi saat total debit aliran keluar yang digunakan untuk pembangkitan lebih besar dari debit aliran masuk ke reservoir. Sebaliknya saat debit aliran masuk lebih besar dari yang digunakan maka elevasi dan tinggi jatuh mengalami kenaikan. Pada hasil simulasi di atas menunjukkan tinggi jatuh berada pada kisaran 267,86 hingga 270,8 meter. Sedangkan elevasi berada pada kisaran 658,43 sampai 661,37 meter di atas permukaan laut (mdpl). Dari sini diperlihatkan bahwa batasan – batasan terkait tinggi dan elevasi masih terpenuhi.



Gbr. 3 Grafik simulasi head PLTA 24 jam

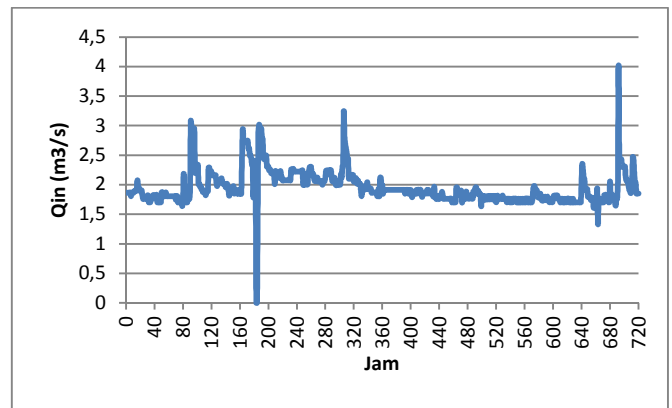


Gbr. 4 Grafik simulasi elevasi PLTA 24 jam

Total energi listrik yang dihasilkan pada hasil simulasi di atas adalah sebesar 107591 kWh. Jika dibandingkan dengan data real pembangkitan energi PLTA Ketenger pada 7 Juni 2013 sebesar 100251 kWh, hasil yang diperoleh adalah 7,32% lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat potensi untuk menghasilkan energi listrik total lebih besar dibanding data real. Adanya selisih dengan data real juga dapat disebabkan karena beberapa faktor yang berpengaruh dalam proses di reservoir dan PLTA yang belum diperhitungkan dalam penelitian ini, seperti evaporasi dan pelimpahan air untuk keperluan selain pembangkitan.

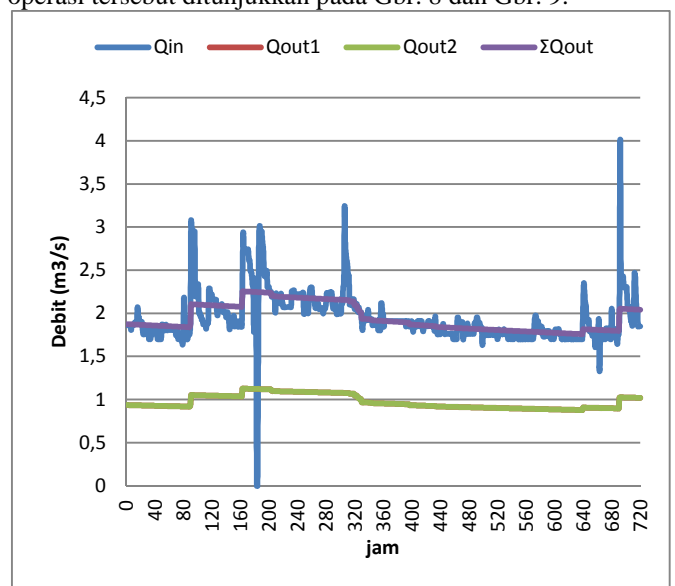
B. Simulasi Pengoperasian jangka menengah

Inputan yang digunakan pada simulasi ini adalah data debit PLTA Ketenger selama 720 jam (1 bulan) pada bulan Juni 2013 diperlihatkan pada Gbr. 5.

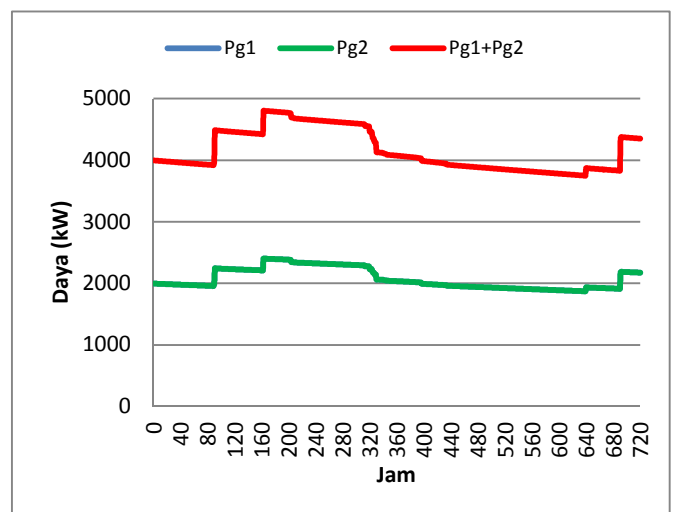


Gbr. 5 Debit aliran masuk PLTA Ketenger Juni 2013

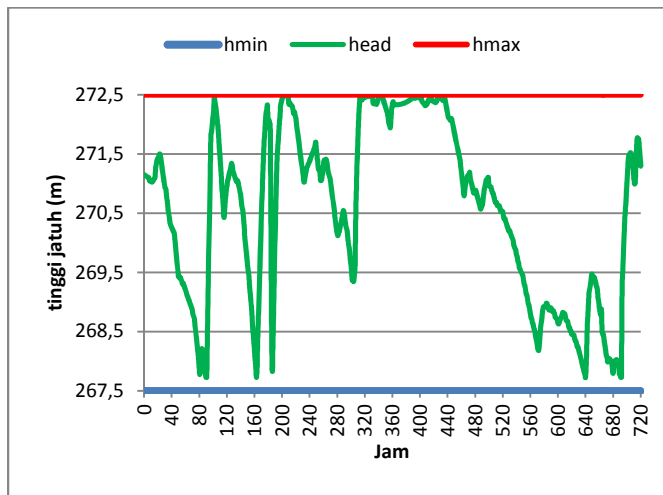
Hasil simulasi berupa outflow dan daya pembangkitan selama 720 jam diperlihatkan pada Gbr. 6 dan Gbr. 7. Sedangkan perubahan tinggi jatuh dan elevasi selama periode operasi tersebut ditunjukkan pada Gbr. 8 dan Gbr. 9.



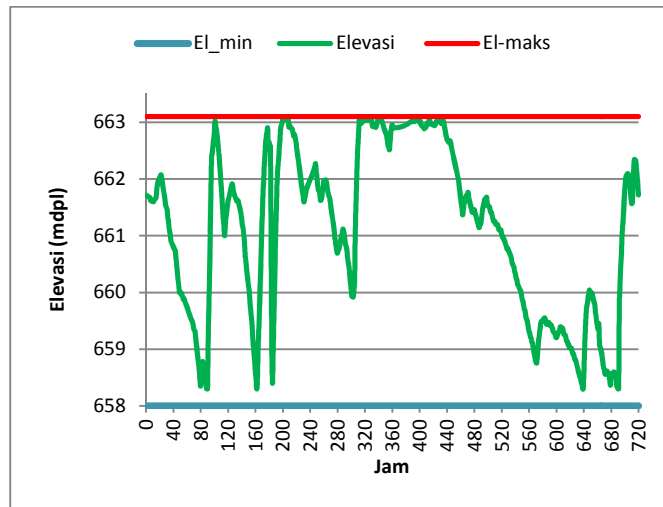
Gbr. 6 Hasil simulasi debit aliran masuk dan keluar selama 720 jam



Gbr. 7 Hasil simulasi daya pembangkitan selama 720 jam bulan Juni



Gbr. 8 Grafik simulasi head PLTA bulan Juni



Gbr. 9 Grafik simulasi Elevasi bulan Juni

Dari grafik hasil simulasi tersebut di atas, daya pembangkitan, tinggi jatuh dan elevasi yang dihasilkan berada pada batasan-batasan nilai yang ditetapkan. Nilai energi listrik total selama 720 jam adalah 2.990,8 MWh. Jika dibandingkan dengan kondisi *real* energi listrik di bulan Juni sebesar 2921,2 MWh. Hal ini menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih besar 69,6 MWh dibanding kondisi *real*.

IV. KESIMPULAN

Pada paper ini pengoptimalan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) diselesaikan dengan menggunakan model *Linear Programming*. Fungsi objektif optimasi adalah untuk memaksimalkan produksi energi listrik yang dihasilkan generator. Optimasi dilakukan dengan memperhatikan batasan operasional berupa ketersediaan air di *reservoir* yang direpresentasikan dalam batasan elevasi dan tinggi jatuh pembangkit, serta batasan daya unit generator. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan data 720 jam operasi PLTA Ketenger pada bulan Juni 2013 sebagai data masukan menunjukkan bahwa metode ini dapat menyelesaikan permasalahan optimasi pada operasi PLTA dengan baik, artinya didapatkan solusi optimal energi listrik sesuai dengan batasan operasional yang telah ditentukan. Total energi listrik yang dihasilkan adalah sebesar 2990 MWh, lebih besar 2,32% dibandingkan dengan data real pembangkitan energi PLTA Ketenger sebesar 2921 MWh.

REFERENSI

- [1] Wood, Alen J., Wollernberg Bruce F., 1996. *Power Generation Operation And Control*. John Wiley & Sons.)
- [2] Pratama, Sezar Yudo. 2011. *Studi Operasional Waduk Sengguruh untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Tesis Program Pascasarjana. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [3] Cheng, C.T. Wang W.C., Xu D.M. and Chau K.W. 2008. *Optimizing hydropower reservoir operation using hybrid genetic algorithm and chaos*. *Water Resources Management*, 22 (7): 895-909.
- [4] Asfaw, Tilahun Derib and Hashim, Ahmad Mustafa, 2011. *Reservoir Operation Analysis Aimed to Optimize the Capacity Factor of Hydroelectric Power Generation*. *International Conference on Environment and Industrial Innovation IPCBEE vol.12 (2011)*, Singapore.
- [5] Jothiprakash V., Arunkumar R., 2013 *Optimization of Hydropower Reservoir Using Evolutionary Algorithms Coupled with Chaos*. *Water Resources Management, Volume 27, Issue 7, pp 1963-1979 May 2013*.
- [6] Ghimirea, Bhola N.S. & Reddy, M.Janga. 2013. *Optimal Reservoir Operation for Hydropower Production Using Particle Swarm Optimization and Sustainability Analysis of Hydropower*. *ISH Journal of Hydraulic Engineering Volume 19, Issue 3, 2013 pages 196-210*.
- [7] Catalao, J.P.S., Mariano, S.J.P.S. Mendes, V.M.F and Ferreira, L.A.F.M. 2008. *Nonlinear optimization method for short-term hydro scheduling considering head-dependency*. *European Transactions On Electrical Power (2008)*
- [8] Tarigan, Abinentaras. 2001. *Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Kedung Ombo dengan Program Linier*. Tesis Program Pascasarjana. Universitas Diponegoro. Semarang.