

PENJADWALAN OPTIMAL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR DENGAN WADUK KASKADE (STUDI KASUS PADA PT VALE INDONESIA)

Deskiniel^{*)}, Hermawan, and Tejo Sukmadi

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email : *deskiniel@gmail.com*

Abstrak

Penjadwalan PLTA Kaskade yang optimal merupakan kegiatan perencanaan yang penting dalam industri tenaga listrik. penelitian ini bertujuan untuk menentukan penjadwalan pembangkit listrik tenaga air kaskade yang optimal berdasarkan Power Characteristic Surface menggunakan metode Program Linear. Dalam perencanaan penjadwalan operasi optimal pembangkit listrik tenaga air memiliki karakteristik non-linear. Seperti masalah alokasi penggunaan air terdistribusi, ketidakpastian ketersediaan air, ketidakpastian permintaan listrik, menimbulkan tantangan nyata dalam sistem pembangkit dengan waduk kaskade. penelitian ini memberikan solusi untuk masalah penjadwalan operasi dengan mempertimbangkan daya keluaran (MW), tinggi jatuh bersih (h), dan debit air (m^3/s) dengan metode program linear. Program Linear digunakan sebagai metode yang cocok untuk sistem kaskade dan head-dependent resevoir. Solusi penjadwalan sistem dikembangkan untuk penjadwalan operasi unit-unit pembangkit hidro yang ada di sistem kelistrikan PT Vale Indonesia. Penyelesaian masalah mengacu kepada sistem pembangkit hidro kaskade dengan tiga resevoir bertingkat dan tujuh unit generator dengan karakteristik berbeda-beda. Hasil optimasi memenuhi semua kendala dan menunjukkan penghematan debit air sebesar 2373.76 $m^3/detik$ yang apabila dikonversi dalam MW maka pola operasi optimasi menghemat energi sebesar 69503.82 MWh selama periode perhitungan.

Kata kunci: PLTA, penjadwalan pembangkit, resevoir kaskade, power characteristic surface

Abstract

The optimal scheduling of cascaded hydropower is crucial in the electric power industry. In this thesis, a model to find the optimal scheduling of cascaded hydropower units based on Power Characteristic Surface by using Linear Programming Method. The hydropower has a non-linear character, such as distributed water usage allocation constraints, uncertainty in water and electricity demand, present a real challenge in cascaded hydropower generating. This paper provides solution to find the optimal scheduling by considering the Power Output (MW), Net Head (m), and Water Discharge (m^3/s) with a linear programming method. This method is used as a strategic solution for system cascaded hydropower and head-dependent resevoir. This solution scheduling system is developed and applied for day-ahead operation scheduling cascaded hydropower electrical system of PT Vale Indonesia. Problem resolution refers to the cascade hydropower systems with three resevoir and seven generator units with different characteristics. Optimization results satisfy to all constraints and give saving 2373.76 cumecs of the water discharges which is equal to 69503.82 MWh saving during the calculation period.

Keywords : hydropower optimal schedullig, cascaded resevoir, power characteristic surface.

1. Pendahuluan

Penjadwalan untuk pengoptimalan operasi sistem tenaga hidro merupakan kegiatan perencanaan yang sangat penting dalam industri tenaga listrik. Tujuan penjadwalan untuk meminimalkan total biaya operasional dan menghasilkan daya keluaran yang maksimal. Pada penjadwalan PLTA Kaskade membutuhkan pemodelan detail karakteristik-karakteristik setiap unit pembangkit

yang saling terhubung^[1]. Alokasi penggunaan air terdistribusi, koordinasi penggunaan air antar unit pembangkit, ketidakpastian ketersediaan air, ketidakpastian permintaan listrik, meminimalkan air yang melalui *spillway*, efisiensi penggunaan air, mengoptimalkan daya yang dihasilkan, menjaga ketersediaan air sepanjang tahun, mencegah terjadinya banjir di hulu dan hilir sungai, waduk atau danau, kebutuhan air untuk keperluan manusia, dan peraturan

pemerintah adalah berbagai masalah yang menimbulkan tantangan nyata dalam sistem pembangkit listrik tenaga air dengan sistem penampungan air bertingkat.

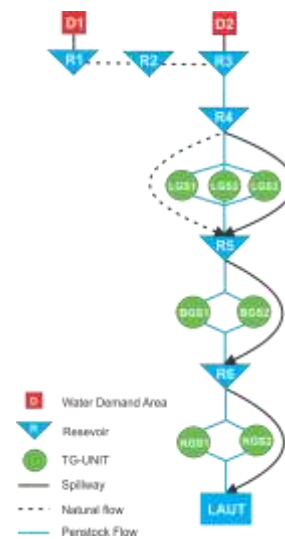
Model terbaru penyelesaian masalah untuk PLTA Kaskade dengan *multi-units* dan *head-dependent* disebut *hydro unit commitment and loading (HUCL) problem*. *HUCL Problem* memperkenalkan model matematika baru dengan mempertimbangkan efisiensi turbin dan generator (*TG-Units efficiency*)^[2]. Kendala resevoir yang dinamis dan masalah yang kompleks pada PLTA Kaskade menjadi tantangan untuk dimodelkan. Kendala-kendala pada PLTA Kaskade memiliki karakteristik non-linear yang dapat dilinearisasikan untuk memudahkan menentukan nilai optimal. Dalam penelitian ini digunakan metode *Linear Programming (LP)*^[3]. LP dikembangkan untuk digunakan pada unit-unit PLTA yang ada di sistem kelistrikan PT Vale Indonesia. Teknik ini digunakan sebagai strategi solusi yang cocok untuk sistem *Hydropower Cascaded* yang membutuhkan penjadwalan ekonomis. Metode penyelesaian lainnya dapat ditemukan di literatur lain seperti *Dynamic Programming (DP)*^[4], *Langrangian Relaxation (LR)*^[5], *Non-Linear Programming (NLP)*^[6], *Mixed-Binary Evolutionary Particle Swarm Optimizer*^[7], *Genetic Algorithm (GA)*^[8], dan *Mixed Integer Quadratically Constrained Program (MIQCP)*^[9].

Adanya simulasi sistem PLTA Kaskade akan lebih memudahkan penyelesaian masalah. Oleh karena itu, untuk menyelesaikan kendala-kendala nyata di lapangan yang setiap hari harus dialami pada pengoperasian tiga unit PLTA yang beroperasi di area pertambangan nikel PT Vale Indonesia Tbk, Sulawesi Selatan, Indonesia perlu dibuat simulasi. Pada Sistem PLTA Kaskade PT Vale Indonesia, terdapat tiga unit pembangkit dalam satu aliran sungai dengan model konvensional (*dams*) secara bertingkat. Tiap unit memiliki bendungan atau resevoir buatan dengan luas dan daya tampung berbeda, *head*, efisiensi dan kemampuan unit turbin generator yang berbeda-beda menjadikan masalah semakin kompleks yang memerlukan pemodelan secara detail karakteristik masing-masing pembangkit.

2. Metode

2.1 Pengoperasian Sistem Cascaded Hydropower^[10]

Pengoperasian dalam sistem *cascaded hydropower* dengan penggunaan air terdistribusi membutuhkan pengaturan yang baik untuk mengatasi masalah-masalah yang timbul.

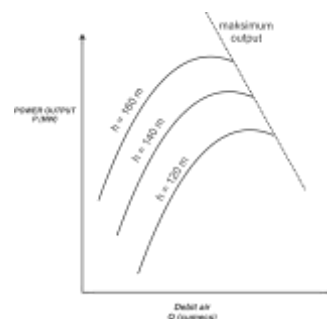


Gambar 2.1 Topologi PLTA Kaskade PT Vale Indonesia

2.2 Karakteristik Pembangkit Cascaded Hydropower

Karakteristik Pembangkit *cascaded hydropower* menunjukkan hubungan antara tiga variabel dalam operasi multi unit. Penggunaan debit air untuk membangkitkan tenaga listrik tiap unit berbeda-beda mengakibatkan pengurangan level ketinggian air pada tiap resevoir mengalami perubahan berbeda dalam setiap waktu operasional. Faktor-faktor lain yang dapat menyebabkan perbedaan ialah kapasitas daya tampung resevoir, ketinggian maksimal resevoir, *head*, dan faktor perubahan iklim.

Untuk level ketinggian air yang berbeda-beda tiap resevoir, karakteristik *cascaded hydropower* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.2 Karakteristik Cascaded Hydropower^[3]

2.3 Perumusan Masalah PLTA Kaskade^[3]

Dalam referensi [3], dimisalkan U adalah unit pembangkit hidro dalam satu *hydro Chain*. Dimisalkan T adalah periode secara horizontal. Tujuan dari masalah penjadwalan pembangkit hidro adalah untuk memenuhi kebutuhan daya per jam secara optimal sebelum

diterapkan ke dalam sistem pembangkit hidro kaskade, sesuai dengan kendala-kendala (*constraints*) umum pada PLTA Kaskade (persamaan 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6).

Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan *constraints* pada masalah penjadwalan optimal PLTA Kaskade, dimana *objective function* (fungsi tujuan) adalah meminimalisasikan penyimpangan yang terjadi antara produksi listrik total dengan kebutuhan beban sistem setiap jam.

Sehingga masalah dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\min \sum_{u,t} \left| dt - \sum_{u,t} P_{u,t} \right| \quad (2.1)$$

Dengan d_t = Kebutuhan beban dalam periode jam t (MW)
 $P_{u,t}$ = Daya output oleh unit u pada jam t (MW)
 tunduk kepada:

- Persamaan *Water Balance*

$$v_{u,t+1} = v_{u,t} - (q_{u,t} + s_{u,t}) + w_{u,t} + (q_{v,t} + s_{v,t}) \quad (2.2)$$

Dengan $v_{u,t}$ = Level Ketinggian resevoir unit u pada waktu t (m dpl)

$q_{u,t}$ = Debit air unit u pada waktu t (m³/detik)
 $w_{u,t}$ = *Natural Inflow* unit u pada waktu t (m³/detik)

- Batas Level Reservoir

$$v_{u,t} = v_u^f \quad \forall u \in U, t = T+1 \quad (2.3)$$

Dengar v_u^f = Level Ketinggian akhir unit u pada waktu t (m dpl)

- Debit maksimal

$$0 \leq q_{u,t} \leq q_u \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (2.4)$$

- Pelimpasan air

$$0 \leq s_{u,t} \leq s_u \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (2.5)$$

- Level ketinggian reservoir awal dan akhir

$$v_{u,t} = v_u^0 \quad \forall u \in U, t = 1 \quad (2.6)$$

$$v_{u,t} = v_u^f \quad \forall u \in U, t = T+1 \quad (2.7)$$

Dengan v_u^0 : Level ketinggian awal unit u pada waktu t (m dpl)

- Kurva Karakteristik Pembangkit Hidro

$$P_{u,t} = P_u(v_{u,t}, q_{u,t}), \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (2.8)$$

Fungsi nilai mutlak pada persamaan (2.1) dapat dengan mudah dinyatakan linear menggunakan dua variabel kontinyu tambahan, didefinisikan penyimpangan perjam positif dan negatif sebagai berikut:

$$\delta_t^+ = d_t - \sum_{u,t} P_{u,t} \quad (2.9)$$

$$\delta_t^- = \sum_{u,t} P_{u,t} - d_t \quad (2.10)$$

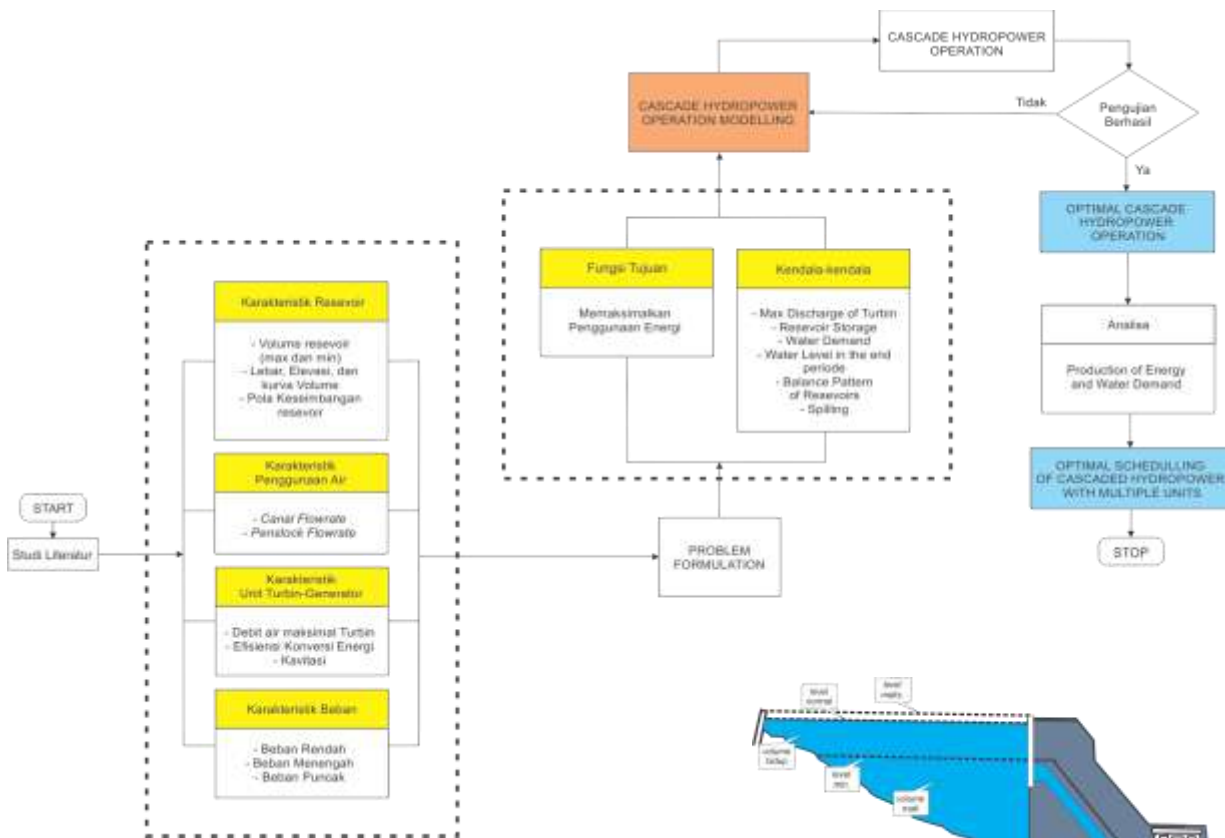
Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan kendala (2.2) ke (2.10), fungsi tujuan (2.1) dapat disubsitusikan dengan persamaan berikut:

$$\min = \sum_{u,t} (\delta_t^+ + \delta_t^-)$$

2.4 Desain Penelitian

Agar diperoleh hasil yang maksimal dalam pengoperasian optimal PLTA Kaskade ini maka diperlukan rancangan penelitian yang terarah, dalam hal ini dilakukan beberapa tahapan pekerjaan sebagai berikut:

1. Melakukan pengumpulan data-data yang berpengaruh dan terkait pada pengoptimasian penjadwalan PLTA Kaskade termasuk data-data penunjang seperti pola operasi eksisting dalam beberapa tahun terakhir.
2. Mengolah data-data yang telah dikumpulkan tersebut sesuai dengan karakteristik resevoir, karakteristik penggunaan air, karakteristik unit turbin-generator, karakteristik beban dan sebagainya.

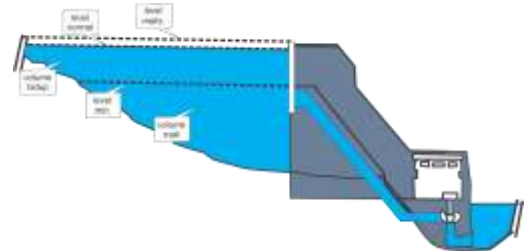


Gambar 2.3 Diagram Alir Pemodelan Sistem

3. Melakukan perhitungan *linear programming* dengan menggunakan software Microsoft Excel sebagai salah satu cara untuk mengkonfirmasi langkah-langkah dan tahapan-tahapan yang dilakukan dengan prosedur program optimasi tersebut.
4. Membuat dan menyusun program *linear programming* tersebut dalam bahasa pemrograman Matlab.
5. Merumuskan pola metode pengoperasian PLTA Kaskade yang didasarkan pada hasil pengoptimasian.
6. Melakukan simulasi terhadap pola pengoperasian PLTA Kaskade eksisting dan terhadap pola pengoperasian yang telah di optimasi.
7. Membandingkan hasil optimasi dengan kondisi eksisting dan menganalisa kinerja dari pola pengoperasiannya.

2.4.1 Karakteristik Parameter Reservoir^[11]

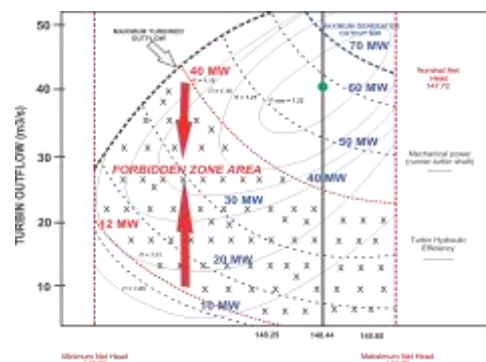
Karakteristik suatu reservoir merupakan bagian pokok dari reservoir yaitu volume hidup (*live storage*), volume mati (*dead storage*), tinggi muka air (TMA) maksimum, TMA minimum, tinggi mercu bangunan pelimpah berdasarkan debit rencana ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 2.4 Karakteristik Reservoir

2.4.2 Karakteristik Parameter TG-Units^[12]

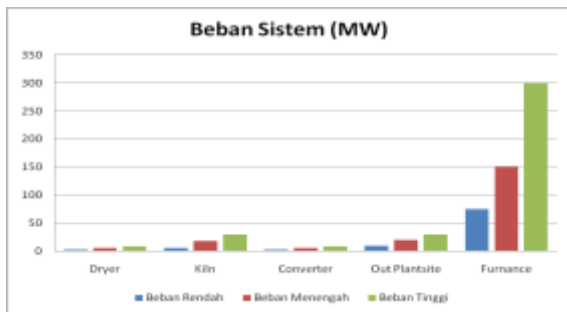
Karakteristik Efisiensi TG-Units adalah seberapa besar kemampuan suatu pembangkit yang dalam hal ini ialah turbin air dan generator pada PLTA dimanfaatkan untuk menghasilkan daya berbanding dengan debit air untuk menghasilkan daya maksimum dalam satuan $MW/m^3/detik$ ^[13] yang ditunjukkan pada *Hill Diagram Curve*.



Gambar 2.5 Hill Diagram TG-units PLTA Larona

2.4.3 Karakteristik Parameter Beban

Perkiraan beban sistem tidak berdasarkan waktu melainkan berdasarkan proses produksi. Pada perkiraan beban *Furnance* tidak dikenal perkiraan beban dalam jangka waktu tertentu seperti perkiraan beban jangka panjang, menengah, dan pendek. Perkiraan beban berdasarkan pada jumlah peralatan *furnance* dan *auxiliary* yang beroperasi di pabrik. Oleh karena itu karakteristik beban sistem dibagi menjadi tiga yaitu beban rendah, menengah, dan tinggi.



Gambar 2.6 Karakteristik Perkiraan Beban Sistem

2.5 Skenario Water Balance

Skenario *water balance* yaitu adanya keseimbangan antara *input-output* dari total penggunaan air untuk menghasilkan daya MW. Pada skenario ini, pelimpahan air (*spilling*) sangat dihindari. Pada sistem PLTA Kaskade PT Vale Indonesia yang terdiri dari 3(tiga) unit pembangkit dan 3(reservoir) maka skenario *water balance* ialah: Besar nilai total Q ($m^3/detik$) yang melalui turbin air pada PLTA Larona adalah sama besarnya dengan nilai Q ($m^3/detik$) + *natural inflow* I_p Sungai Patingko ($m^3/detik$) yang akan digunakan pada PLTA Balambano dan PLTA Karebbe.

2.6 Model Simulasi

Adapun batasan-batasan dalam simulasi sebagai berikut:

1. Data masukan pada simulasi antara lain debit inflow, tampungan yang diperoleh dari perhitungan optimasi dan target pelepasan yang akan dicapai.
2. Apabila tinggi elevasi yang diperoleh dari optimasi lebih kecil dari elevasi minimum operasi Danau Towuti +317,8 m dpl atau saat volume aktif 1013 MCM juta m^3 maka pengoperasian pada bulan tersebut dinyatakan gagal.
3. Apabila tinggi optimasi lebih besar dari tinggi elevasi maksimum operasi Danau Towuti +319,6 m dpl atau saat volume aktif 2057 MCM (juta m^3) berarti terjadi limpasan maka besarnya limpasan harus dihitung.
4. Pada simulasi akan terjadi berbagai kemungkinan sebagai berikut:

- a. Tampungan pada akhir operasi lebih kecil dari tampungan pada awal operasi atau tampungan pada bulan tertentu lebih kecil dari tampungan minimum maka target yang diperoleh dari keluaran tidak terpenuhi.
 - b. Tampungan pada bulan tertentu lebih besar dari tampungan maksimum maka akan terjadi limpasan.
 - c. Jika keadaan a) terjadi maka langkah selanjutnya yang dilakukan adalah memenuhi target energi sampai terpenuhinya kondisi dimana volume waduk berada pada posisi level hidup.
5. Hasil optimasi keluaran program dianggap baik apabila kondisi yang sebenarnya akan tercapai suatu kondisi dimana volume danau tiap bulan lebih besar dari volume minimum dan lebih kecil dari volume maksimum.
 6. Asumsi yang digunakan pada simulasi awal pengoperasian, inflow, outflow dan energi listrik mengikuti keadaan/kondisi aktual dari tahun perhitungan, sedangkan data awal volume simulasi adalah volume maksimal aktif 2057 MCM (juta m^3) atau saat elevasi air + 319,6 m dpl.
 7. Release dari danau merupakan fungsi dari volume awal bulan dan inflow pada bulan tersebut dan tampungan akhir bulan hasil optimasi Persamaan yang digunakan untuk menentukan hubungan ketiga variabel tersebut pada simulasi ini ditunjukkan pada persamaan 2.1.
 8. Perhitungan energi listrik hasil simulasi bulanan dengan rumus:

$$P = \eta_{TG-unit} \times Q \times n \text{ hari dalam 1 bulan (2.1)}$$
 Dengan P = Daya (MW)
 $\eta_{TG-unit}$ = Efisiensi Turbin dan Generator (MW/ $m^3/detik$)
 Q = Debit air ($m^3/detik$)
 9. Data Teknik dari reservoir kaskade yang digunakan untuk perhitungan simulasi ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Data Teknis Reservoir Dan PLTA Kaskade untuk simulasi

UNIT	$V_i \text{ max}$	$V_i \text{ min}$	$q \text{ max}$	$q \text{ max}$	Efisiensi	$P_i \text{ max}$	$P_i \text{ max}$
			saat h	saat h		saat h	saat h
PEMBANGKIT			max	min		max	min
	Juta m^3	Juta m^3	m^3/det	m^3/det	MW/ m^3/det	MW	MW
PLTA LARONA	2057	1013	156	149	1,22	190.32	181.78
PLTA BALAMBANO	31,5	29,8	184	180	0,76	139.84	136.8
PLTA KAREBBE	22	21	186	180	0,92	171.12	165.6

2.7 Implementasi Proses Simulasi

Simulasi dibuat dengan menggunakan Program Matlab R2010a yang digunakan untuk merancang perhitungan dan tampilan simulasi. Tampilan utama dalam simulasi ini ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.7 Tampilan Utama Simulasi

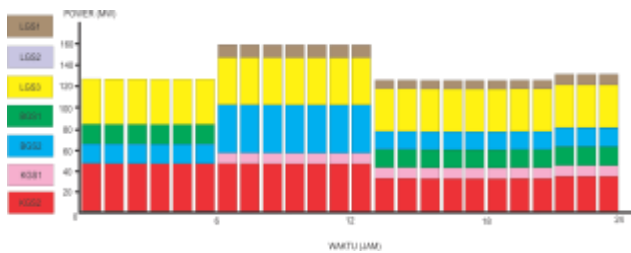
3. Hasil dan Analisa

3.1 Simulasi Operasi Water Balance

Beberapa kondisi dan keadaan yang dapat diperoleh dari program simulasi adalah suatu perbandingan antara eksisting (*realisasi*) dengan kondisi optimasi. Berikut ini adalah tujuan output dari proses simulasi yang ingin dicapai, antara lain:

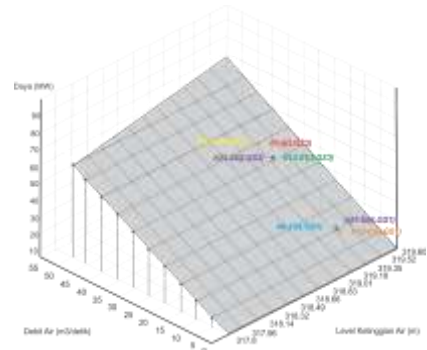
3.1.1 Power Characteristic Surface

Berdasarkan model topologi jaringan PLTA Kaskade yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Unit PLTA Larona dan unit PLTA Balambano menerima aliran air $m^3/detik$ secara konstan berdasarkan level permukaan danau. Gambar 4.1 menunjukkan besar daya yang dihasilkan tiap jam selama 24 jam untuk masing-masing unit generator setelah proses optimasi.

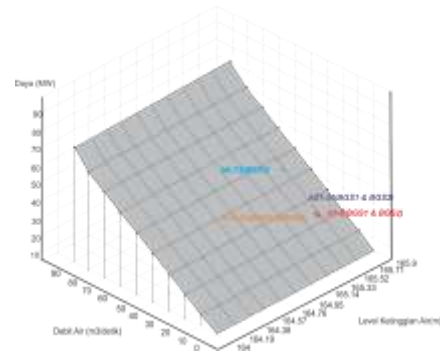


Gambar 3.1 Produksi Daya Tiap TG-unit Hasil Optimasi Selama 24 Jam

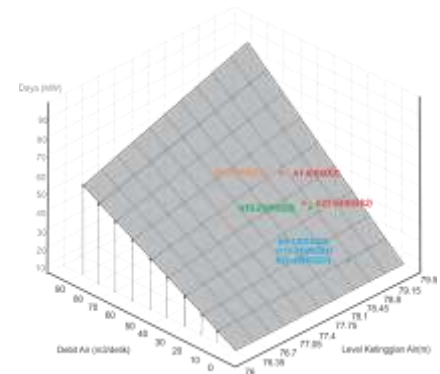
Akhirnya, gambar 3.2, 3.3, dan 3.4 adalah input-output karakteristik untuk tiap TG- unit Pembangkit hasil simulasi yang ditunjukkan dalam grafik 3D *Power Characteristic Surface* berdasarkan hasil pembagian beban pada gambar 3.1



Gambar 3.2 Titik Optimal Operasi TG-Unit PLTA Larona



Gambar 3.3 Titik Optimal Operasi TG-Unit PLTA Balambano



Gambar 3.4 Titik Optimal Operasi TG-Unit PLTA Kerebbe

3.1.2 Kombinasi Pembangkit Optimal

Untuk contoh pembebanan sistem pada tanggal 2 Januari 2012, melalui proses perhitungan optimasi berdasarkan skema *Water Balance* diperoleh hasil kombinasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hasil Kombinasi Pembangkit Optimal PLTA Kaskade

Waktu	LGS1	LGS2	LGS3	BGS1	BGS2	KGS1	KGS2
h0-h6	0	0	1	1	1	0	1
	0	0	1	1	1	1	1
h6-13	1	0	1	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	0	1

h13-21	1	0	1	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	0	1
h21-24	1	0	1	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	0	1

Berdasarkan pada tabel kombinasi pembangkit optimal, terdapat beragam variasi kombinasi pembangkit yang dapat diterapkan pada operasi optimal PLTA Kaskade.

3.1.3 Pola Penggunaan Air Water Balance

Tabel 3.2 menunjukkan hasil optimasi pola pelepasan air tanpa terjadi *spilling* berbeda dengan operasi eksisting yang mengalami *spilling* rata-rata sebesar 41.25 m³/detik

Tabel 3.2 Pola Pelepasan Air Optimasi Danau Towuti Minggu ke 35 Tahun 2011

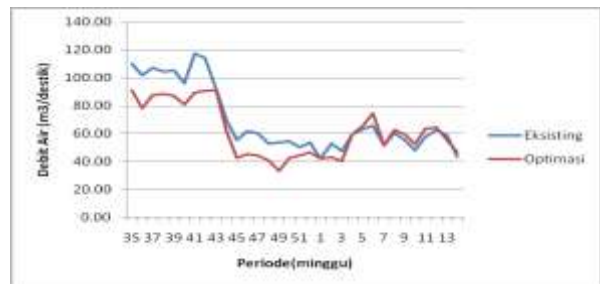
Day	Canal flow	Spillway flow	Outflow (a+b)	Lake level flow (c)	Inflow (a+b)+c	Twt. level	MCM storage
August 27, 2011	93.6	0.00	93.60	-95.74	-2.14	319.02	1714.59
August 28, 2011	90.05	0.00	90.05	-92.08	-2.03	319.00	1706.63
August 29, 2011	87.57	0.00	87.57	-89.53	-1.96	318.99	1698.89
August 30, 2011	92	0.00	92.00	-94.03	-2.03	318.97	1690.77
August 31, 2011	93.7	0.00	93.70	-95.75	-2.05	318.96	1682.50
September 1, 2011	93.26	0.00	93.26	-95.28	-2.02	318.95	1674.27
September 2, 2011	103.43	0.00	103.43	-105.64	-2.21	318.93	1665.14
Weekly Average	93.37	0.00	93.37	-95.44	-2.06	318.97	1690.40

Pola pelepasan air Danau Towuti eksisting selama masa pengujian sebesar 4310.02 m³/detik sementara hasil optimasi hanya menggunakan sebesar 1936.26 m³/detik. Selisih antara operasi eksisting dan optimasi sebesar 2373.76 m³/detik, menunjukkan pola operasi optimasi dengan skenario *Water Balance* berhasil mengurangi penggunaan air (*release*) Danau Towuti tanpa melanggar semua kendala-kendala (*constraint*).

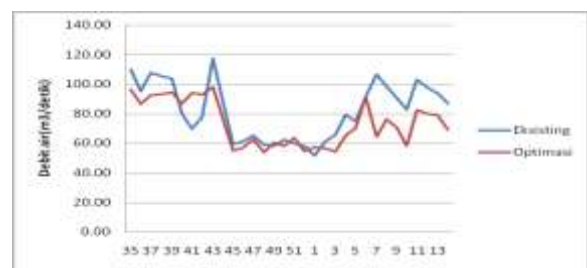


Gambar 3.5 Perbandingan Level Ketinggian Air Pola Release Air Simulasi Optimasi dengan Eksisting PLTA Larona

Pola operasi resevoir kaskade untuk kondisi optimasi dan eksisting ini ditampilkan lebih lengkap pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.6 Perbandingan Penggunaan Debit Air Pola Operasi Simulasi Optimasi Dengan Beban Sistem(MW) Sama dengan Operasi Eksisting PLTA Larona



Gambar 3.7 Perbandingan Penggunaan Debit Air Pola Operasi Simulasi Optimasi Dengan Beban Sistem(MW) Sama dengan Operasi Eksisting PLTA Balambano



Gambar 3.8 Perbandingan Penggunaan Debit Air Pola Operasi Simulasi Optimasi Dengan Beban Sistem(MW) Sama dengan Operasi Eksisting PLTA Karebbe

3.1.4 Produksi Energi Listrik Optimasi dan Eksisting

Grafik pada gambar berikut menunjukkan perbedaan konsumsi air hasil optimasi dan eksisting untuk menyuplai beban yang sama dengan tidak melanggar faktor kendala-kendala



Gambar 4.9 Perbandingan Daya Output Pola Operasi Simulasi Optimasi dengan Operasi Eksisting Menggunakan Debit Air Sama Besar

3.1.5 Aturan Penjadwalan Pembangkit Optimal Untuk PLTA Kaskade PT Vale Indonesia

Proses optimasi menunjukkan hasil kinerja sistem PLTA Kaskade yang lebih baik dibandingkan operasi eksisting. Penjadwalan optimal PLTA Kaskade PT. Vale Indonesia pada periode normal dan periode transisi *dry-flood* berdasarkan skema *Water Balance* adalah sebagai berikut:

Langkah Pertama : Menganalisa debit air rata-rata yang masuk ke reservoir PLTA Larona yaitu level ketinggian air dan volume air pada Danau Towuti. Setelah mengetahui debit air rata-rata yang masuk ke Danau Towuti, selanjutnya dapat ditentukan debit air yang akan digunakan selama periode/minggu.

Langkah Kedua : Menentukan besar debit air yang diperbolehkan berdasarkan level ketinggian air pada tiap reservoir dengan mempertimbangkan pemakaian jangka panjang dengan mempertimbangkan debit *natural inflow* dari Sungai Patingko menuju ke reservoir Balambano menggunakan persamaan skema operasi *Water Balance*.

Langkah Ketiga : Menentukan total *Hydro Power Available(MW)* berdasarkan debit air minimal yang diperbolehkan pada langkah kedua. Kemudian menentukan kebutuhan beban sistem secara keseluruhan, yaitu beban *Furnance* dan beban *Auxiliary* yang dapat disuplai oleh unit PLTA Kaskade selama periode/minggu.

Langkah Keempat : Menentukan *Unit Commitment* dan *Economic Dispatch* masing-masing TG-Units berdasarkan skema operasi optimal *Water Balance* berdasarkan *Power Characteristic Surface* dan kombinasi pembangkit optimal tanpa melanggar faktor-faktor kendala.

3.1.6 Penjadwalan Optimal PLTA Kaskade PT. Vale Indonesia

Tabel 3.3 menunjukkan penjadwalan optimal jangka pendek selama 24 jam unit pembangkit PLTA Kaskade

PT Vale Indonesia, dengan 3 PLTA dan 7 unit Turbin-Generator pada tanggal 2 Januari 2012.

Tabel 3.3 Penjadwalan Optimal Jangka Pendek PLTA Kaskade Selama 24 Jam

Waktu	UNIT PEMBANGKIT						
	LGS1	LGS2	LGS3	BGS1	BGS2	KGS1	KGS2
1	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
2	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
3	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
4	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
5	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
6	0	0	42.79	18.37	18.37	0	44.47
7	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
8	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
9	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
10	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
11	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
12	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
13	12	0	44.25	0	45.13	10	44.63
14	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
15	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
16	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
17	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
18	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
19	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
20	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
21	8.43	0	40	16.87	16.87	10	30.84
22	10.95	0	40	17.65	17.65	10	32.74
23	10.95	0	40	17.65	17.65	10	32.74
24	10.95	0	40	17.65	17.65	10	32.74

Tabel 3.4 menunjukkan penjadwalan optimal jangka panjang selama 32 periode/minggu dari minggu ke-35 tahun 2011 sampai minggu ke-14 tahun 2012

Tabel 3.4 Penjadwalan Optimal Jangka Panjang PLTA Kaskade Selama 32 Minggu

Tahun	Minggu	UNIT PEMBANGKIT						
		LGS1	LGS2	LGS3	BGS1	BGS2	KGS1	KGS2
2011	35	10.00	41.00	60.17	19.00	54.26	44.34	44.34
	36	10.00	41.00	44.66	19.00	46.94	39.91	39.91
	37	10.00	41.00	55.97	19.00	51.20	42.49	42.49
	38	10.00	41.00	57.21	19.00	51.97	42.96	42.96
	39	10.00	41.00	55.48	19.00	52.69	43.39	43.39
	40	10.00	41.00	46.73	65.37	0.00	39.56	39.56
	41	10.00	41.00	58.01	19.00	52.47	43.26	43.26
	42	10.00	41.00	59.90	19.00	51.67	42.78	42.78
	43	10.00	41.00	60.38	19.00	55.43	45.05	45.05
	44	12.00	0.00	63.58	19.00	39.19	35.22	35.22
	45	41.00	0.00	10.85	41.85	0.00	8.00	42.66
	46	44.00	0.00	11.49	19.00	24.47	8.00	44.63
	47	44.00	0.00	9.96	0.00	47.88	8.00	49.96
48	41.00	0.00	8.61	20.51	20.51	8.00	41.67	
49	0.00	0.00	40.53	0.00	46.03	0.00	55.72	
50	11.00	0.00	41.11	0.00	44.39	0.00	53.73	
51	0.00	0.00	44.57	0.00	42.37	10.00	41.29	
52	12.00	0.00	45.09	20.74	20.74	10.00	40.22	
2012	1	0.00	0.00	42.32	18.98	18.98	10.00	35.95
	2	12.00	0.00	43.11	0.00	44.64	10.00	44.04
	3	8.09	0.00	41.00	20.68	20.68	10.00	40.07
	4	12.00	0.00	59.44	8.00	40.92	10.00	49.22
	5	12.00	0.00	67.86	10.00	43.31	32.27	32.27
	6	12.00	12.00	46.48	10.00	46.71	34.32	34.32
	8	12.00	12.00	51.40	10.00	46.93	34.46	34.46
	8	12.00	12.00	52.70	10.00	47.97	35.09	35.09
	9	12.00	12.00	48.55	0.00	53.77	32.54	32.54
	10	0.00	12.00	52.18	0.00	44.40	10.00	43.74
	11	0.00	12.00	65.81	19.00	43.62	37.90	37.90
	12	0.00	12.00	66.52	19.00	41.93	36.88	36.88
	13	0.00	12.00	56.02	19.00	40.94	36.27	36.27
	14	0.00	12.00	44.94	10	42.45	31.75	31.75

3.1.7 Kinerja Simulasi PLTA Kaskade

Dari hasil perhitungan dan simulasi dengan metode *Water Balance* berdasarkan *Power Characteristic Surface* dan *Hill Diargam Curve* menunjukkan nilai yang tidak melanggar kendala-kendala penyimpanan air, *head*, dan debit air.

Dari segi keandalan, apabila PLTA Kaskade dioperasikan sesuai dengan hasil simulasi maka kinerja PLTA PT Vale Indonesia akan beroperasi dengan optimal dan tidak berpengaruh secara lingkungan terhadap *water demand area*.

Dari segi ekonomis akan terjadi penghematan (*Fuel Saving*) pada unit pembangkitan termis yang dimiliki PT Vale Indonesia, karena pembangkit termis tidak perlu dioperasikan selama pembangkit hidro dapat memenuhi kebutuhan sistem.

Terakhir dari segi efisiensi, akan terjadi peningkatan efisiensi penggunaan air karena tidak terjadi pelimpasan air pada setiap reservoir, melainkan semua air yang melalui PLTA digunakan untuk memutar unit Turbin-Generator.

4. Kesimpulan

Karakteristik input-output PLTA Kaskade dapat ditunjukkan melalui *Power Characteristic Surface*, yang menjadi pedoman operasi optimal pada PLTA Kaskade dengan menggunakan metode *Linear Programming* berdasarkan skenario operasi *Water Balance*. Kebijakan pola penggunaan air menggunakan Skema *Water Balance* menunjukkan kinerja pola pelepasan air (*release*) Danau Towuti, reservoir PLTA Balambano dan reservoir PLTA Karebbe mampu mempertahankan level ketinggian permukaan air berada pada level yang cenderung konstan dan tidak terjadi *spilling* pada segala kondisi musim. Hasil penelitian ini dapat menjadi salah satu solusi menyelesaikan persoalan konflik sosial yang terjadi pada *water demand area* sekitar Danau Towuti. Hasil perhitungan *Linear Programming* dengan skema operasi *Water Balance* menunjukkan penghematan air sebesar 2373.76 m³/detik, apabila dikonversi dalam MWh menjadi 69503.82 MWh.

Referensi

[1]. Joeliananto, Gatot. "Optimasi Penjadwalan Pembangkit Listrik Tenaga Air menggunakan Integer Programming". Jurnal Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, Vol 04 Nomor 01, April 2006 ISSN 1693-4024.

[2]. Finardi, Erlon Cristian, Scuzziato, Murilo Reolon. "Hydro unit commitment and loading problem for day-ahead operation planning problem". LabPlan/UFSC, Electrical Systems Planning Research Laboratory, Federal University of Santa Catarina, Campus

Universitário, CP 476, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brazil

[3]. Garcia-Gonzalez, Javier and Alonso Castro, Guillermo, "Short-term Hydro Scheduling with Cascaded and Head-Dependent reservoirs based on Mixed-Integer Linear Programming", IEEE Porto Power Tech Conference September, 2011

[4]. Mukhtar, Alief Rakhman. "Penjadwalan Pembangkit Hidro-Thermal Menggunakan Metode Dynamic Programming" Jurnal Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2010.

[5]. E. C. FINARDI, E. L. da SILVA, C. A. SAGASTIZABAL. "Solving the Unit Commitment Problem of Hydropower Plants Via Lagrangian Relaxation and Sequential Quadratic Programming". Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica. Campus Universitario, Trindade, Florianópolis 88040-900, SC, Brasil.

[6]. Catalão, J. P. S., S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, and L. A. F. M. Ferreira. "Scheduling of Head-Sensitive Cascaded Hydro Systems: A Nonlinear Approach". IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 24, NO. 1, FEBRUARY 2009.

[7]. V.H. Hinojosa, C. Leyton. "Short-term hydrothermal generation scheduling solved with a mixed-binary evolutionary particle swarm optimizer". Electric Power Systems Research 92 (2012) 162–170.

[8]. Boris Pavez-Lazo, Jessica Soto-Cartes. "A deterministic annual crossover genetic algorithm optimisation for the unit commitment problem". Expert Systems with Applications 38 (2011) 6523–6529.

[9]. V.H. Hinojosa, C. Leyton. "Short-term hydrothermal generation scheduling solved with a mixed-binary evolutionary particle swarm optimizer". Electric Power Systems Research 92 (2012) 162–170.

[10]. Marsudi, Djiteng. "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Graha Ilmu, Yogyakarta. 2006.

[11]. Nafis. "Perencanaan PLTA Siteki". Laporan penelitian, Maret 2012.

[12]. Warnick, C.C. "Hydropower Engineering". ISBN 0-13-148478-3, 1984 by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

[13]. Deskinen. "Efisiensi TG-Units Pada PLTA Larona, PLTA Balambano, dan PLTA Karebbe serta Optimalisasi Pengaturan Beban dan Pembangkit. Laporan Kerja Praktek Teknik Elektro UNDIP, 2012.