



Tesis - TF185471

STUDI STRATEGI OPERASIONAL DAM UNTUK MENGOPTIMALKAN PENGATURAN AIR SELAMA PERIODE PREVENTIVE MAINTENANCE PADA PLTA PT.VALE INDONESIA, SOROWAKO

RAJAB
NRP. 02311650022 012

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIP. 19760523 200012 2 001

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
JURUSAN TEKNIK FISIKA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :

Rajab

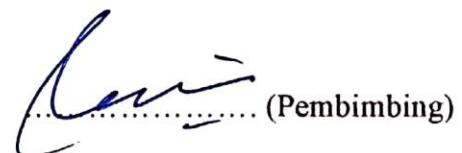
Nrp : 02311650022012

Tanggal Ujian : 10 Januari 2019

Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui oleh :

1. Dr. Katherin Indriawati, ST., MT.
NIP. 19760523 200012 2 001



..... (Pembimbing)

2. Dr. Ing. Doty Dewi Risanti, ST., MT
NIP. 19740903 199802 2 001



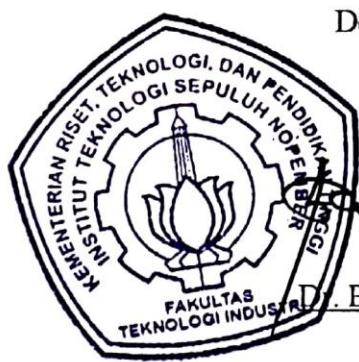
..... (Penguji)

3. Dr. Ir. Purwadi A.D. MSc.
NIP. 19620822 198803 1 001



..... (Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri (Penguji)



D. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T.

NIP. 19690507 199512 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

Studi Strategi Operasional Dam untuk Mengoptimalkan Pengaturan Air Selama Periode Preventive Maintenance Pada PLTA PT. Vale Indonesia

Name : Rajab

ID No. : 02311650022 012

Supervisor I : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Pada Perusahaan PT. Vale Indonesia, ada 3 (tiga) lokasi pembangkit listrik tenaga air yang berada pada satu daerah aliran sungai. Adapun sumber air berasal dari tiga danau yang ada di sekitar wilayah operasional. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) memiliki peran utama untuk menghasilkan Nikel. Oleh karenanya pembangkit listrik tenaga air harus memiliki kehandalan yang tinggi dan umur peralatan yang panjang. Sehingga pemeriksaan secara berkala diperlukan. Makalah ini membahas tentang hasil studi mengenai strategi mengoperasikan dam PLTA dalam rangka untuk mengoptimalkan pengaturan air saat pelaksanaan preventive maintenance, dengan mempertimbangkan permintaan daya listrik pada Furnace peleburan Nikel dan daya pendukung. Linier program dipergunakan sebagai sebuah metode untuk melakukan optimasi. Dari hasil optimasi diperoleh keuntungan daya listrik yang dihasilkan adalah 24120 MWh dengan flow rate air sebesar 24149.07 m³/detik untuk operasi PLTA tahun 2015.

Kata kunci: *Pengaturan air/ optimalisasi/ Linier programming/ hydropower plant.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**Study Of Dam Operating Strategy for Optimal Water
Management During Preventive Maintenance Period On PLTA
PT. VALE INDONESIA**

Name : Rajab

ID No. : 02311650022 012

Supervisor I : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRACT

PT. Vale Indonesia has three hydropower plants (called PLTA). They have three dams cascaded in one river. The water sources from three lakes at around company operational area. The hydropower plants are main supporting units for Nickel production. Thus the hydropower plants must be have high performance and long live time. Here the preventive maintenance is needed. This paper discusses about study result of dam operating strategy of the hydropower plants in order to optimal water management during preventive maintenance period, by considering of power demand at the smelting furnace and the auxiliary power. Linear programming is used as an optimization method. It is proved that the electric energy of 24120 MWhours be obtained through water flow rate of 24149.07 m³/seconds, for 2015's operation.

Keywords: *water management/ optimization, Linier programming, hydropower plant.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena dengan berkah dan limpahan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga tesis yang berjudul “*Studi Strategi Operasional Dam untuk Mengoptimalkan Pengaturan Air Selama Periode Preventive maintenance Pada PLTA PT.Vale Indonesia*” ini dapat penulis selesaikan.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (MT) dalam bidang keahlian Rekayasa Energi Terbarukan pada program studi Pascasarjana Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan suatu karya ilmiah tidaklah mudah, oleh karena itu tidak tertutup kemungkinan dalam penyusunan tesis ini terdapat kekurangan, sehingga penulis sangat mengharapkan masukan, saran, dan kritikan yang bersifat membangun guna kesempurnaan tesis ini.

Proses penyusunan tesis ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari pengumpulan literatur, pengumpulan data sampai pada pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material maupun moril. Olehnya itu dalam kesempatan ini izinkanlah penulis mengucapkan Jazakumullahu Khairan katsira kepada yang terhormat:

1. Cintaku Nurinsana dan anak-anakku tersayang Zulfadhli, Hilma, Aisyah dan Ahmad Azzam atas dukungan dan pengorbanan waktunya. Permohonan maaf Abi telah mengambil waktu kumpul keluarga untuk Abi gunakan untuk kuliah S2 ini.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, ST, MT atas bimbingan dan arahan yang telah meluangkan waktu kepada penulis untuk berdiskusi selama menjadi dosen pembimbing.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, ST, MT, Ibu Dr. Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT, Bapak Dr. Ir. Purwadi A, M.Sc, yang telah memberikan masukan dan saran pada saat seminar proposal dan seminar hasil tesis.
4. Bapak Totok Ruki Biyanto, ST, MT, Ph.D atas bimbingan dan arahan yang telah meluangkan waktu kepada penulis untuk berdiskusi selama menjadi dosen

wali.

5. Ketua program studi Pascasarjana Teknik Fisika Bapak Dr.rer.nat.Ir. Aulia. M.T. Nasution MSc.
6. Seluruh Dosen program Pascasarja Teknik Fisika khususnya dosen Rekayasa Energi Terbarukan yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk mendalami ilmu Rekayasa Energi Terbarukan.
7. Bapak Ahyar Mansur, ST, MT dosen di Akademi Teknik Sorowako dan sekaligus rekan bermain tennis lapangan dengan penulis yang telah banyak meluangkan waktu berdiskusi dengan penulis.
8. Orang tuaku tercinta, ayahanda H. Sunusi Pappuangan Bora dan Ibunda Hajja Nurmia yang telah mencerahkan seluruh cinta, kasih sayang, cucuran keringat dan air mata, untaian doa serta pengorbanan tiada henti, yang hingga kapanpun penulis takkan bisa membalasnya. Maafkan jika ananda sering menyusahkan, merepotkan, serta melukai perasaan ayahanda dan ibunda. Keselamatan dunia akhirat semoga selalu untukmu ayahanda dan ibunda. Semoga Allah selalu menyapamu dengan cinta dan ridho-Nya.
9. Seluruh Keluarga besarku yang senantiasa memberikan motivasi kepada penulis untuk menyelesikan studi, serta adik-adik penulis yang telah mencerahkan kasih sayang, dorongan semangat.
10. Rekan-rekan mahasiswa pascasarjana Teknik Fisika kerjasama Vale-ITS (mas Anang, akang Asep, pak Andi, mas Andrie, mas Anom, mas Ardian, daeng Asgar, mas Asrul, mas Bagus, opu Baso temenku penuh semangat, mas Farhan, mas Febrin, pak Dewa, mas Indin, pak Kasman, mas Leo, Muammar, pak Asril, Nurkholis, pak Pamrih, lae Ricky, Rustam yang Saleh, pak Teguh, om Wafir, de Erwin, bang Zai dan seluruh rekan mahasiswa pascasarjana Teknik Fisika angkatan 2016.
11. Admin TU Pascasarjana Teknik Fisika Mbak Martha Hardiyah yang senantiasa memberikan pelayanan administrasi yang memuaskan.
12. Kepada semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Selain itu, penulis juga mengucapkan permohonan maaf yang sedalam-

dalamnya jika penulis telah banyak melakukan kesalahan dan kekhilafan, baik dalam bentuk ucapan maupun tingkah laku, semenjak penulis menginjakkan kaki pertama kali di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga selesaiya studi penulis. Semua itu adalah murni dari penulis sebagai manusia biasa yang tak pernah luput dari kesalahan dan kekhilafan. Adapun mengenai kebaikan-kebaikan penulis, itu semata-mata datangnya dari Allah SWT, karena segala kesempurnaan hanyalah milik-Nya

Akhirnya, penulis berharap bahwa apa yang disajikan dalam tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Semoga kesemuanya ini dapat bernilai ibadah di sisi-Nya. Amin.

Surabaya, November 2018

Rajab

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Hydro Power atau Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	5
2.2 Pengukuran Debit Air dan Ketinggian Jatuh Air	6
2.3 Pengoperasian Sistem PLTA Berjenjang PT Vale Indonesia	7
2.3.1 Skenario Power Balance	9
2.3.2 Preventive Maintenance	10
2.4 Fungsi obyektif	10
2.5 Batasan batasan operasi (<i>Constrain</i>)	11
BAB 3 METODOLOGI	15
3.1 Pengumpulan Data	16
3.1.3.1 Dam Batubesi dan Larona Kanal	17
3.1.3.2 PLTA Larona	18
3.1.3.3 PLTA Balambano	18
3.1.3.4 PLTA Karebbe	20
3.2 Penentuan Fungsi Obyektif	21
3.3 Penentuan Batasan (<i>Constrain</i>)	22
3.4 Optimasi Daya	23
3.4.1 Simulasi	23
3.4.2 Koreksi Hasil	25
3.5 Analisa	25

BAB 4 HASIL PENELITIAN.....	27
4.1 Penentua Realisasi Beban PLTA.....	27
4.2 Karakteristik Input-Output masing-masing PLTA	27
4.3 Hasil Simulasi MATLAB	29
4.4 Hasil Terkoreksi	32
4.5 Analisa dan Pembahasan Preventive Maintenance	38
4.5.1 Jadwal Preventive Maintenance <i>Furnace</i>	39
4.5.2 Energi Saving for PLTA Preventive Maintenance Independent	39
BAB 5 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI	41
5.1 Kesimpulan.....	41
5.2 Rekomendasi	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	PLTA berjenjang PT Vale Indonesia	7
Gambar 2. 2	Fungsi Waktu Tunda Air [Ref: 8]	8
Gambar 2.3	Jadwal Preventive maintenance Smelting Fuernace	10
Gambar 2.4	Jadwal Preventive maintenance PLTA	10
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	15
Gambar 3.2	PLTA Larona.....	19
Gambar 3.3	PLTA Balambano.....	20
Gambar 3.4	PLTA Karelbe	20
Gambar 3.5	Input dan Output di MATLAB Software	24
Gambar 4.1	Beban Smelting Furnace Tahun 2015	28
Gambar 4.2	Beban Auxiliary Tahun 2015	28
Gambar 4.3	PLTA Larona Karakteristik Input-Output.....	30
Gambar 4.4	PLTA Balambano Karakteristik Input-Output.....	30
Gambar 4.5	PLTA Karelbe Karakteristik Input-Output.....	31
Gambar 4.6	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik	32
Gambar 4.7	Simulasi Inflow 130 m ³ /detik	32
Gambar 4.8	Simulasi Inflow 140 m ³ /detik	33

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Data Operasi PLTA PT. Vale Tahun 2015 sampai 2017	17
Tabel 3.2	Spesifikasi PLTA Larona	18
Tabel 3.3	Spesifikasi PLTA Balambano	19
Tabel 3.4	Spesifikasi PLTA Karebbe	21
Tabel 3.5	PLTA Spek Daya Output dan Outflow Turbine	25
Tabel 4.1	Hasil Optimasi MATLAB	31
Tabel 4.2	Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 120 m ³ /detik	33
Tabel 4.3	Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 130 m ³ /detik	34
Tabel 4.4	Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 140 m ³ /detik	34
Tabel 4.5	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 120.778 m ³ /detik.....	34
Tabel 4.6	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 123.89 m ³ /detik	35
Tabel 4.7	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 120.78 m ³ /detik	36
Tabel 4.8	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 124.67 m ³ /detik	36
Tabel 4.9	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 121.22 m ³ /detik	37
Tabel 4.10	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 126.442 m ³ /detik	37
Tabel 4.11	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 121.22 m ³ /detik.	38
Tabel 4.15	Simulasi Inflow 120 m ³ /detik ke 124.87 m ³ /detik	38

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik tenaga air adalah sebuah sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan [1]. Penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik semakin hari semakin terbatas, dikarenakan sumber daya alam energi fosil semakin berkurang, sehingga memicu harga yang semakin tinggi, belum lagi efek domino yang ditimbulkan akibat penggunaan energi fosil dalam hal ini BBM atau Coal sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik terhadap lapisan ozon atau biasa dikenal efek gas rumah kaca (GRK). Pada bagian pembangkit listrik, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Air, pemaksimalan pengaturan potensi air adalah suatu keharusan. Dam sendiri memiliki beberapa fungsi yakni sebagai pembangkitan listrik, pengairan persawahan, dan penahan banjir [2]. Sebuah Reservoir pada suatu PLTA memiliki tugas yang sangat penting dan memberikan banyak keuntungan, sehingga penelitian mengenai optimal operasi pada beberapa pembangkit listrik tenaga air semakin diminati [3].

Pada perusahaan PT Vale Indonesia, kebutuhan listrik adalah hal yang sangat vital. Kebutuhan listrik terbagi 2 bagian besar yakni kebutuhan pada proses peleburan nikel dan kebutuhan pendukung. Proses peleburan Nikel sendiri dilakukan pada peralatan Tanur Reduksi (Smelting Furnace) yang telah terpasang ada 4 Unit, masing-masing unit memiliki maksimum kapasitas terpasang adalah: EF#1 = 80 MW, EF#2 = 80 MW, EF#3 = 75 MW dan EF#4 = 80 MW, sementara kebutuhan listrik pendukung antara lain pada proses auxiliary seperti kopressor udara bertekanan, motor-motor, lampu penerangan dan alat-alat yang membutuhkan listrik lainnya. Dan kebutuhan daya listrik yang sangat besar ini tentu memberikan dampak biaya operasi yang sangat besar bagi perusahaan, sehingga perusahaan mampu atau tidak mampu bersaing dengan pabrik-pabrik pengolahan Nikel dibelahan dunia lainnya.

Pada PT Vale Indonesia dewasa ini memiliki beberapa unit pembangkit listrik sendiri antara lain PLTA, PLTU dan PLTD (MBDG dan CAT). Adapun biaya pembangkitan energi listrik untuk masing-masing unit pembangkit dalam membangkitkan daya listrik 1 MWhours dengan mengambil data dari laporan “Utilities operation overview report tahun 2015” (Lampiran A) periode tahun (2008) – (2012), selanjutnya menghitung nilai mean masing-masing pembangkit dan dihasilkan:

- PLTA = \$1.268,
- PLTU = \$ 236.158,
- PLTD MBDG = \$ 224.022 dan
- PLTD CAT = \$ 218.632

Dapat disimpulkan bahwa penggunaan pembangkitan daya listrik menggunakan unit PLTA dibandingkan PLTU atau PLTD (MBDG dan CAT) jauh lebih murah sehingga sangat membantu perusahaan untuk dapat bersaing dengan pabrik pengolahan Nikel yang ada di dunia. Sehingga menjadi sangat penting untuk memberikan perhatian lebih pada PLTA, termasuk pengembangan (*improvement*) ide ide baru.

Di wilayah operasional PT Vale Indonesia sendiri memiliki sumber energi air yang cukup besar yang dialirkan dari 3 (tiga) danau yakni danau Matano, Mahalona dan Towuti. Energi air ini selanjutnya ditampung pada dam (Batusesi dam) untuk selanjutnya dialirkan masuk ke kanal buatan sepanjang 7 km dan diteruskan masuk ke pipa *penstock*. PLTA yang terpasang adalah PLTA berjenjang dan berada pada satu aliran sungai yakni aliran sungai Larona. PLTA Larona berada pada sisi hulu (*upstream*), PLTA balambano (*middle*) dan PLTA Karella berada pada bagian hilir (*downstream*). Karena PLTA Karella berada dihilir, maka sangat penting tetap memaksimalkan pengaturan air agar tidak terjadi pelimpasan (*spilling*) untuk menjaga air tidak terbuang ke laut di Malili secara percuma, pada saat pelaksanaan *preventive maintenance* (pemeriksaan berkala) pada salah satu PLTA.

Beberapa tahun operasi PLTA hanya dapat dilakukan *preventive maintenance* pada saat tiba jadwal *preventive maintenance* pada Smelting Furnace. *Preventive maintenance* pada Smelting Furnace terbagi dua (2) waktu yakni *preventive maintenance* lamanya 4 jam untuk pemeriksaan kecil terhadap beberapa item pokok dan lamanya 10 jam digunakan untuk pemeriksaan lebih banyak itemnya.

Faktor utama yang mendorong kami melakukan dan memilih tema ini, karena begitu pentingnya reliability dan live time unit PLTA, sehingga memerlukan jadwal *preventive maintenance* yang berdiri sendiri (*independent*). Selanjutnya untuk melaksanakan *preventive maintenance* terhadap salah satu unit PLTA secara *independent* dibutuhkan pengaturan air yang optimal agar tidak terjadi pelimpasan air di Dam Karella secara percuma.

Berdasarkan beberapa penelitian terkait masalah optimasi pengaturan air bendungan yang dilakukan antara lain oleh; Liping Wang, Boquan Wang, Pu Zhang, Minghao Liu, Chuangang Li "Study on optimization of the short-term operation of cascade hydropower

stations by considering output error"[4], A. Bensalem, A. Bouhentala, A. El-Maouhab "Deterministic optimal management strategy of hydroelectric power plant"[5]. Beberapa penelitian ini telah mengkaji pengaturan air pada reservoir, namun pada penelitian kami mencoba mengangkat dan meneliti pengaturan air secara optimal pada PLTA terpasang secara berjenjang saat salah satu unit dari PLTA tersebut dilakukan Preventive maintenance (pemeliharaan berkala).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mempertahankan selisih Q_{in} (*inflow*) dan Q_{out} (*outflow*) tetap pada nilai yang seimbang pada elevasi air yang berbeda pada reservoir, jika salah satu unit PLTA dilakukan pemeriksaan berkala.
2. Memformulasikan strategi operasi pengaturan air yang optimal, saat pelaksanaan *preventive maintenance* pada salah satu unit PLTA.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Variabel optimasi yang ditinjau dalam rangka memaksimalkan daya adalah *inflow*.
2. Penentuan variable optimasi dilakukan berdasarkan pola beban PLTA.
3. Skenario operasi PLTA yang digunakan adalah metode *water unbalance*.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasakan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini terhadap PLTA PT Vale Indonesia, adalah:

1. Mengetahui besarnya realisasi power yang dibutuhkan saat melakukan *preventive maintenance independent* pada PLTA.
2. Mengetahui PLTA yang dapat dilakukan *preventive maintenance* secara *independent*.
3. Mengetahui besarnya inflow optimum untuk melakukan *preventive maintenance independent* pada PLTA.
4. Mengetahui dampak ekonomi dari penerapan *preventive maintenance independent* pada PLTA.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Hydro Power atau Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit Listrik tenaga air adalah pembangkitan energi listrik yang merubah energi potensial air menjadi energi mekanik oleh turbin dan diubah lagi menjadi energi listrik oleh generator. Prinsip pembangkit listrik tenaga air sebenarnya tidak terlalu rumit. Kita hanya memanfaatkan arus air, atau air yang jatuh pada air terjun untuk memutar Generator. Air terjun yang berada pada ketinggian tertentu senantiasa mengalirkan air dengan Massa tertentu setiap menit. Seperti Massa air yang berada pada suatu ketinggian memiliki energi potensial gravitasi. Ketika Massa air turun ke bawah energi potensialnya berkurang karna sebagian energi potensialnya dirubah menjadi enrgi kinetik. Sesuai dengan hukum kekekalan energi, semakin ke bawah energi kinetik semakin besar. Ek air yang cukup besar mengenai sudu-sudu turbin yang dipasang didasar air terjun dan selanjutnya memutarkan poros turbin yang seporos dengan poros generator, kemudian generator berputar dan menghasilkan energi listrik.

Secara teori Daya dihasilkan melalui sebuah sistim hydro power tergantung sepenuhnya dari besar aliran air, ketinggian vertical (head) jatuh dan akselerasi air sehubungan dengan gravitasi melalui persamaan sebagai berikut.

$$P_T = \rho g Q H \quad (2.1)$$

Dimana P_T adalah daya dengan satu watt, ρ adalah kelembaban atau massa jenis air sama dengan 1000 kg/m^3 , Q adalah besarnya flow atau aliran dalam satuan m^3/det , H adalah head dalam satuan meter dan g adalah gaya gravitasi sama dengan 9.81 m/det^2 .

Secara teori Daya adalah kalkulasi kasar dari hydropower pada sebuah sungai. Disana ada beberapa rugi-rugi yang menimbulkan penurunan daya saat proses konversi. Oleh karena itu, daya listrik yan dihasilkan oleh sebuah hydropower seharusnya dikalikan dengan total efisiensi dari system, termasuk efisisensi penstock, efisisensi generator dan efisiensi turbine. Selanjutnya, output daya dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$P_T = \rho g Q H \eta \quad (2.2)$$

Dimana P_g adalah Daya yang dibangkitkan dalam satuan watt dan η adalah seluruh efisiensi dalam satuan percent itu berada pada kisaran 50-70%.

2.2 Pengukuran Debit Air dan Ketinggian Jatuh Air

Flow adalah jumlah debit air yang melalui suatu permukaan pada suatu periode waktu yang dinyatakan sebagai volume dalam gallons per menit (gpm) atau meter kubik per detik (m^3/det), dan ketinggian jatuh air adalah jarak vertical jatuhnya air menuruni ketinggian sebagai akibat dari gaya gravitasi bumi.

Adapun cara mengukur debit air dapat dilakukan dengan beberapa metode sederhana. Metode yang biasa digunakan dalam mengukur laju alir (flow), ada 2 metode:

- a. Metode bucket, dan
- b. Metode area dan kecepatan

Metode bucket dapat digunakan untuk mengukur laju alir terutama pada aliran air yang rendah atau pada sebuah sungai kecil yang memiliki volume yang kecil. Metode ini digunakan untuk menghitung waktu yang dibutuhkan untuk memenuhi sebuah ember atau bak mandi dan laju alirannya dihitung dengan cara membagi volume air dalam ember atau bak mandi terhadap waktu yang dipergunakan atau dalam formulasi

$$Q = V/t \quad (2.3)$$

Q adalah debit, V adalah Volume dan t adalah waktu

Sementara untuk mengukur debit air yang lebih tinggi dan volume yang lebih besar menggunakan metode area dan kecepatan. Pada metode ini, debit air dapat diukur dengan menggunakan sebuah bangunan bendungan yang diketahui dimensi atau ukurannya, dan waktu dapat diukur dengan cara mengukur waktu yang diperlukan untuk menyimpan air hingga mencapai suatu ketinggian yang telah diketahui. Sebuah benda dapat diletakkan mengapung dan lamanya waktu mengapung dari hulu ke hilir dapat diketahui. Debit air adalah jumlah volume air, pergerakan air dan adanya koefisien gesekan per satuan waktu (*0.6 for rocky stream bottoms*).

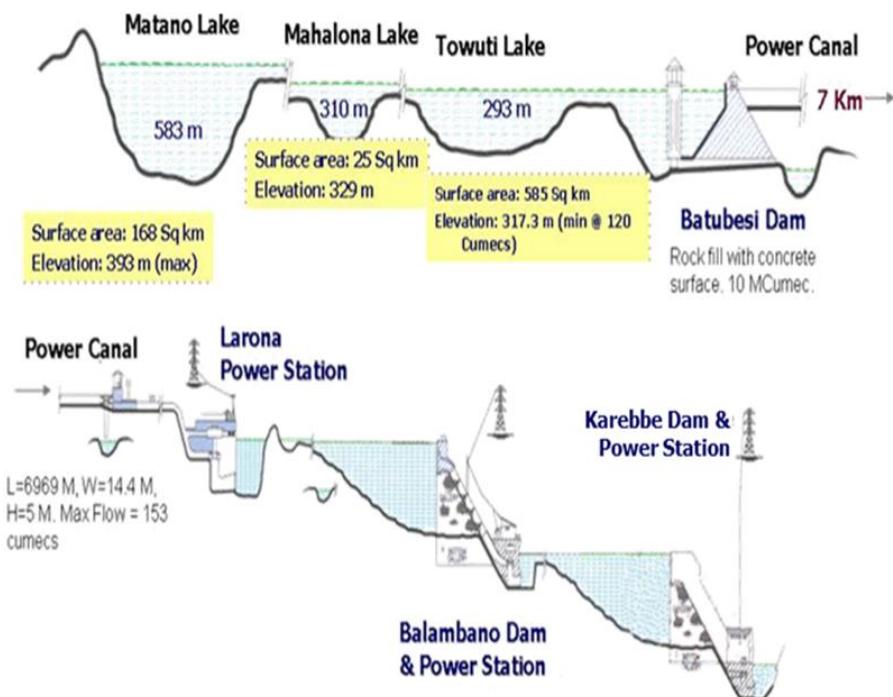
Jika terkendala dan kesulitan membangun sebuah bendungan, metode area dan kecepatan juga dapat dipergunakan. Metode ini mengukur dengan cara menghitung bagian bagian area berpotongan/melintang (S) sebagai sebuah hasil yang mewakili lebar dan rata-rata

kedalaman pada sungai atau bendungan. Kemudian aliran air dapat dihitung dengan mengkalikan luas bagian bagian area yang berpotongan dengan kecepatan rata rata aliran air. Aliran air atau flow rate (Q), kecepatan rata-rata aliran air (Vavg) dan luas bagian bagian area berpotongan pada sebuah media (S). Metode ini dapat diformulasikan sebagai berikut [6]:

$$Q = V_{avg} \times S \text{ (m}^3/\text{detik)} \quad (2.4)$$

2.3 Pengoperasian Sistem PLTA Berjenjang PT Vale Indonesia

Karakteristik sistem PLTA berjenjang (cascaded hydropower) menggambarkan hubungan antara debit air (flow), level ketinggian air pada bendungan dan waktu. Ketiga parameter ini akan bervariasi pada setiap unit PLTA disebabkan perbedaan luas bendungan, ketinggian air, efisiensi turbin, kemampuan generator dan perubahan iklim. PLTA berjenjang PT Vale Indonesia seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 PLTA berjenjang PT Vale Indonesia

Selanjutnya karakteristik suatu bendungan (*dam*) merupakan bagian pokok dari bendungan yaitu volume hidup (*live storage*), volume mati (*dead storage*), tinggi muka air (*TMA*) maksimum, *TMA* minimum, tinggi bangunan pelimpah (*spillway*).

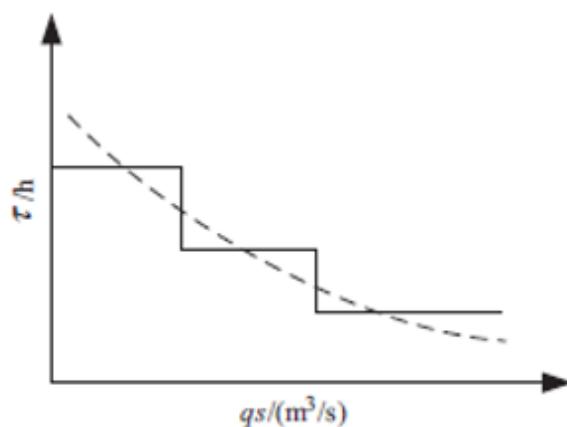
Volume hidup bendungan (*live storage*) atau tampungan efektif, adalah suatu wadah yang muka airnya terletak antara *TMA* normal dengan *TMA* minimum, volume ini yang dapat

mengerakkan turbin untuk membangkitkan daya listrik. Volume mati bendungan (*dead storage*) atau tampungan mati adalah suatu wadah atau tempat yang terletak dibawah TMA minimum, wadah tersebut direncanakan sebagai kantong Lumpur. Tinggi Muka Air (TMA) adalah tinggi muka air bendungan yang dapat diketahui dengan cara melihat pada alat ukur ketinggian yang terpasang pada tepi bendungan. TMA bendungan biasanya berkaitan/dihubungkan dengan volume atau luas permukaan bendungan atau danau. Tinggi bangunan pelimpah adalah tinggi bangunan pintu pelimpah yang menjaga bendungan agar terhindar dari *overtopping*.

Pengoperasian pada sistem PLTA berunduk sangat penting untuk mengatur air yang dipergunakan, karena air yang ada pada PLTA hulu akan dipergunakan juga pada PLTA hilir. pemanfaatan potensi air secara maksimal menjadi suatu keharusan, sehingga potensi air tidak terbuang secara percuma. Beberapa hal yang mempengaruhi pergerakan air dari hulu ke hilir, antara lain:

a. Waktu Tunda Air

Waktu tunda adalah lamanya pergerakan air dari hulu ke hilir. Selama periode perencanaan seperti melakukan preventive maintenance, dengan menganggap informasi awal data hidrologi cukup akurat, maka inflow air alami dapat dianggap sebagai informasi yang sudah ditentukan. Dengan adanya inflow air alami yang konstan, waktu tunda aliran air antara bendungan di hulu dan hilir adalah dipengaruhi oleh outflow air dari bendungan di hulu. Jika terjadi peningkatan outflow air dari bendungan di hulu, hal ini dapat mempersingkat waktu tunda aliran air antara bendungan yang berada di hulu dan hilir. Karena dampak outflow air, waktu tunda aliran air mengalir tidak konstan, dan hubungan tidak linier di antara keduanya ditunjukkan pada Gambar 2.1 (garis putus-putus). [7]



Gambar 2. 2 Fungsi Waktu Tunda Air [Ref: 8]

b. Water Balance

Water balance adalah cara operator mengoperasikan PLTA membangkitkan daya listrik yang menyebabkan besarnya *inflow* air pada bendungan yang berada di hulu (*upsteam dam*) sama dengan besarnya *inflow* air pada bendungan di hilir (*downstream dam*).

c. Water Unbalance

Water unbalance adalah cara operator mengoperasikan PLTA membangkitkan daya listrik yang menyebabkan besarnya *inflow* air pada bendungan yang berada di hulu (*upsteam dam*) tidak sama dengan besarnya *inflow* air pada bendungan di hilir (*downstream dam*).

d. Spilling (Pelimpasan)

Pada suatu PLTA dam, selalu dilengkapi dengan pintu pelimpasan yang berfungsi sebagai regulator. Pintu pelimpasan ini juga berfungsi sebagai pengaman bendungan (*dam*) untuk tetap menjaga bendungan agar tidak meluap (*overtopping*). Pada PLTA PT Vale Indonesia, pintu pelimpasan juga dipergunakan saat kondisi melakukan perbaikan pada salah satu unit pembangkit.

2.3.1 Skenario Power Balance

Pada PLTA PT Vale Indonesia sekarang ini jika menggunakan skenario *water balance* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 PLTA Pembangkitan Daya Listrik Skenario *Water Balance*

Power Scenario (148 cumecs) Water Balance	1 Unit Hydro supply Auxiliary
Canal Flow	148
LGS1	10
LGS2	55
LGS3	55
BGS1	57
BGS2	57
KGS1	51
KGS2	51
Total Hydro to FCE grid	337
DC Links	-7.25
STG	0
MBDG1	0
MBDG2	0
MBDG3	0
MBDG4	0
MBDG5	0
Caterpilar Diesel	0
Unit Hydro to Aux. Grid	45
Total Auxiliary	45
Losses + SS 9,10+ PLN	21
Bandwidth	20
Power Available to Furnace	292

2.3.2 Preventive Maintenance

Beberapa tahun operasi, jadwal *preventive maintenance* pada PLTA PT Vale Indonesia mengikuti jadwal *preventive maintenance* pada smelting furnace. Sementara preventive maintenance pada Smelting furnace terbagi dua (2) yakni pertama *preventive maintenance* lamanya 4 jam untuk pemeriksaan kecil terhadap beberapa item pokok dan kedua *preventive maintenance* lamanya 10 jam digunakan untuk pemeriksaan lebih banyak itemnya. Jadwal *preventive maintenance* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan 2.4.

WEEK	DATE	TIME	UNIT	PLAN DURATION
22	Tuesday May 29 2018	07.30	HMC#1	2/Weekly 4hrs
	Tuesday May 29 2018	07.30	HMC#2	2/Weekly 4hrs
	Tuesday May 29 2018	07.30	Granulation System	2/Weekly 4hrs
	Thursday May 31 2018	07.30	EPM#2	6/Weekly 4hrs
	Thursday May 31 2018	07.30	RK#2	4hrs
	Thursday May 31 2018	07.30	CC#2	6/Weekly 4hrs
	Thursday May 31 2018	07.30	RK#3	6/Weekly 4hrs
	Thursday May 31 2018	07.30	CC#3	6/Weekly 4hrs
WEEK	DATE	TIME	UNIT	PLAN DURATION
25	Tuesday June 19 2018	07.30	HMC#3	Monthly 6hrs
	Wednesday June 20 2018	07.30	HMC#4	Monthly 6hrs
	Wednesday June 20 2018	07.30	Dry#1	2/Monthly 12hrs
	Wednesday June 20 2018	07.30	CM#1	Monthly 8hrs
	Thursday June 21 2018	07.30	EPM#3	3/Monthly 10hrs
	Thursday June 21 2018	07.30	RK#4	3/Monthly 10hrs
	Thursday June 21 2018	07.30	CC#4	3/Monthly 10hrs

Fce#2 PM
pada 31 Mei
2018

Gambar 2.3 Jadwal Preventive maintenance Smelting Fuernace

		5/25	5/27	5/28	5/29	5/30	5/31	6/1	Weekly
BGS1	Total Operating Hours	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
	Actual Plan Outage hrs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	0.00	0.00
	Standby hrs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Force outage by Maintenance	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Force outage by Operation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00

PLTA BGS
PM juga pada
21 Mei 2018

Gambar 2.4 Jadwal Preventive maintenance PLTA

2.4 Fungsi obyektif

Pada beberapa penelitian dengan topik PLTA Dam Cascaded , fungsi obyektif utamanya adalah memaksimalkan total potensi energi pada volume air dam dari jumlah dam terpasang secara cascaded pada satu aliran sungai [5]. Mengidentifikasi ketidaksesuaian (error) antara aktual dan rencana daya (power) yang dibangkitkan pada PLTA dilakukan dengan menggunakan konsep Value at Risk (VaR) [4]. Pada penelitian kami, fungsi obyektifnya adalah memaksimalkan total energi potensial air yang tersimpan pada semua reservoir.

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n \sum_t^T E_{gi}(t) \quad (2.5)$$

dengan $E_{gi}(t)$ adalah energi listrik i pada waktu t dalam satuan MW hours, dan n adalah total jumlah unit generator services. Energi ini bergantung pada jumlah air yang tersimpan pada dam i .

Besaran energi listrik yang dihasilkan oleh generator adalah fungsi dari daya pembangkitan dikalikan dengan interval waktu. Energi listrik atau daya yang dibangkitkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) ditentukan 3 parameter yakni ketinggian jatuh air (head), debit air menuju turbin dan faktor efisiensi pembangkit. Efisiensi pada PLTA sendiri merupakan gabungan antara efisiensi di saluran (penstock), efisiensi turbin dan efisiensi generator. Besarnya energi listrik pada PLTA dapat dihitung menggunakan persamaan ini:

$$E_{gi}(t) = P_{gi}(t) \times \Delta t \quad (2.6)$$

dengan:

$P_{gi}(t)$ adalah daya yang dibangkitkan generator i pada waktu t dalam satuan MW.

Sementara besarnya daya listrik pada PLTA dapat dihitung menggunakan persamaan ini:

$$P_{gi}(t) = 9.8h(t) \cdot Q_{out,i}(t) \cdot \eta \quad (2.7)$$

dengan:

$h(t)$ adalah ketinggian jatuh air pada waktu t dalam satuan meter.

$Q_{out,i}(t)$ adalah debit air (outflow) yang melalui turbin i pada waktu t dalam satuan m³/detik.

η adalah efisiensi pembangkit listrik.

2.5 Batasan batasan operasi (*Constrain*)

Fungsi kendala merupakan bentuk penyajian secara matematis dari batasan-batasan operasi yang tersedia pada berbagai aktifitas. Untuk problem pengoptimalan pada PLTA, ada beberapa batasan yang dapat dipertimbangkan antara lain:

A. Elevasi Dam

Elevasi bendungan (dam) dibatasi diantara nilai minimum dan nilai maksimum yang diperbolehkan, secara matematis pada persamaan berikut ini:

$$El_{min} \leq El(t) \leq El_{max} \quad (2.8)$$

dengan:

$El(t)$ = Elevasi bendungan pada waktu t (mdpl)

El_{min} = Elevasi minimum disyaratkan (mdpl)

El_{mak} = Elevasi maksimum disyaratkan (mdpl)

Nilai minimal elevasi bendungan adalah elevasi air minimal agar operasi turbin dan generator dapat berjalan stabil. Sedangkan nilai maksimal elevasi bendungan menggambarkan kapasitas dari bendungan itu sendiri

B. Ketinggian Jatuh Air

Pembatasan pada elevasi, maka ketinggian jatuh air (head) pada PLTA dam juga akan terbatas pada nilai tertentu. Ketinggian jatuh air (head) PLTA dam diantara nilai minimum dan maksimum yang diperbolehkan, secara matematis pada persamaan berikut ini:

$$h_{min} \leq h(t) \leq h_{mak} \quad (2.9)$$

dengan:

$h(t)$ = Ketinggian jatuh air pada waktu t (m)

h_{min} = Ketinggian jatuh air minimum disyaratkan (m)

h_{mak} = Ketinggian jatuh air maksimum disyaratkan (m)

C. Daya yan dibangkitkan

Daya pembangkitan yang dihasilkan oleh unit generator dibatasi antara nilai daya pembangkitan minimal dan maksimal, dan secara metematis pada persamaan berikut ini:

$$P_{gi,min} \leq P_{gi}(t) \leq P_{gi,mak} \quad (2.10)$$

Nilai $P_{gi,min}$ adalah daya pembangkitan minimum unit generator i dalam satuan MW. Batasan nilai daya pembangkitan minimum generator ini dimaksudkan agar generator beroperasi stabil, dan nilai daya pembangkitan maksimum unit generator ini adalah rating kapasitas generator itu sendiri.

Ketinggian elevasi bendungan dan ketinggian jatuh air (head) pada pembangkit listrik tenaga air dipengaruhi oleh aliran air masuk (inflow) dan aliran air keluar (outflow) yang selanjutnya dipergunakan memutar turbin. Hubungan elevasi bendungan dengan debit inflow dan debit outflow ke turbin, secara matematis pada persamaan berikut ini:

$$El(t) = El(t-1) + \frac{Q_{in}(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{out,i}(t)}{A} \quad (2.11)$$

Hubungan head dengan debit inflow dan debit outflow ke turbin, secara matematis pada persamaan berikut ini:

$$h(t) = h(t - 1) + \frac{Q_{in}(t)}{A} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{out,i}(t)}{A} \quad (2.12)$$

dengan:

$El(t - 1)$ = Elevasi pada waktu t-1 (m)

$h(t - 1)$ = Head pada waktu t-1 (m)

$Q_{in}(t)$ = Debit inflow pada step waktu t (m³/detik)

$Q_{out,i}(t)$ = Debit outflow turbin i pada step waktu t (m³/detik)

A = Luas permukaan dam (m²)

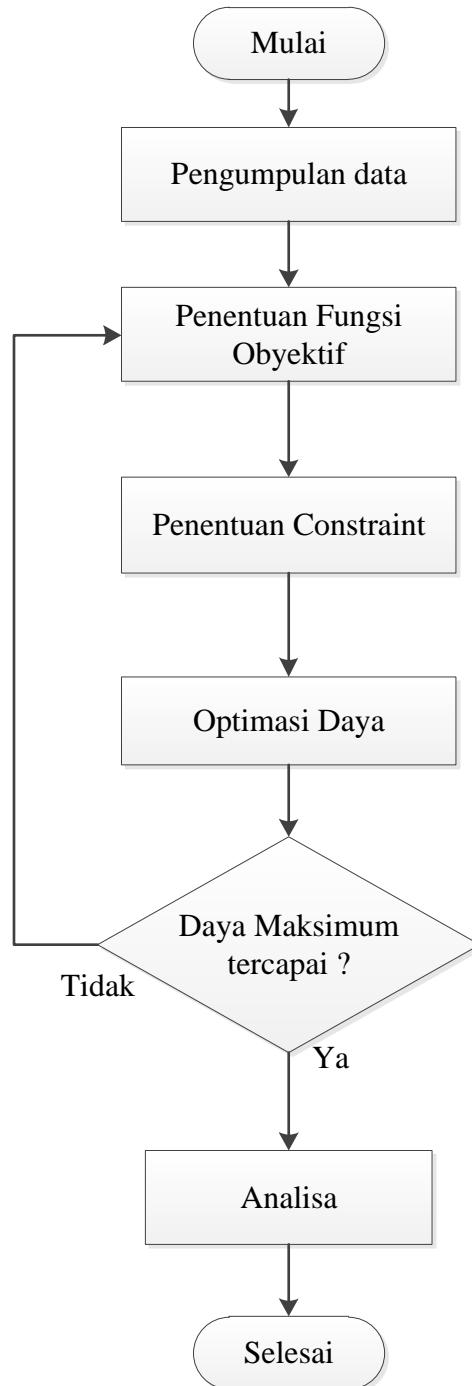
Pada persamaan (2.11) dan (2.12) menunjukkan bahwa aliran air masuk ke dam (debit inflow) akan menambah ketinggian (elevasi) permukaan air di dam dan juga tinggi jatuh air menuju turbin dari step sebelumnya. Sebaliknya debit air yang mengalir keluar melalui penstock dan turbin menyebabkan penurunan elevasi muka air dan tinggi jatuh air dam.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI

Pada bab ini metodologi yang dipergunakan oleh penulis untuk menyelesaikan studi kasusnya ada pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Parameter-parameter optimasi pengaturan air pada dam PLTA PT Vale Indonesia yang menjadi pertimbangan pada studi ini daya listrik, inflow, outflow, elevasi atau tinggi jatuh air.

3.1 Pengumpulan Data

Mengumpulkan informasi yang diperlukan untuk melakukan simulasi optimasi. Data yang dikumpulkan adalah:

1) Daya listrik yang dipergunakan

Daya listrik yang dibutuhkan adalah daya listrik yang dipergunakan pada smelting furnace (Furnace power) dan daya listrik untuk pendukung proses (Auxiliary power) selama tiga tahun yakni periode januari tahun 2015, 2016 sampai dengan Desember 2017.

2) Turbin dan Daya listrik yang dibangkitkan

Daya listrik yang dibangkitkan generator selama tiga tahun yakni periode januari tahun 2015, 2016 sampai dengan Desember 2017.

3) Spesifikasi PLTA

Data spesifikasi PLTA yakni spesifikasi turbine, generator dan bendungan.

3.1.1 Daya listrik yang dipergunakan

Pembebanan terhadap pembangkit listrik yang ada pada perusahaan PT.Vale Indonesia terbagi 2 (dua) bagian yakni:

- Pembebanan oleh peleburan nikel atau smelting furnace yang disebut furnace grid, dan
- Pembebanan oleh motor-motor pompa, penerangan untuk pabrik dan masyarakat disekitar pemberdayaan perusahaan atau biasa disebut auxiliary grid.

Pada tulisan ini kami melakukan analisa terhadap data beban selama 3 tahun yakni periode tahun 2015,2016 dan 2017. Grafik kontrol untuk kedua beban (furnace grid dan auxiliary grid) tersebut ditunjukkan pada lampiran B. Untuk keperluan informasi data realisasi beban bagi prosedur optimisasi, maka digunakan nilai $\mu + 2\delta$ (mean + 2 standar deviasi) yang diperoleh dari grafik kontrol tersebut. Selanjutnya dihitung nilai rata-rata dari ketiga data diatas (selama 3 tahun) untuk mengetahui realisasi beban.

3.1.2 Turbin Outflow dan Daya listrik yang dibangkitkan

Tabel 3.1 menampilkan data hubungan antara outflow yang melewati turbin dengan daya yang dibangkitkan oleh generator selama periode 1 Januari 2015 sampai dengan 29 Desember 2017. Data ini digunakan untuk mengetahui karakteristik input output PLTA.

Tabel 3. 1 Data Operasi PLTA PT. Vale Tahun 2015 sampai 2017

NO.	Day	LARONA		BALAMBANO		KAREBBE	
		Inflow (m ³ /detik)	Average (Mwatt)	Turbine flow (m ³ /detik)	Average (Mwatt)	Turbine flow (m ³ /detik)	Average (Mwatt)
1	1-Jan-15	121.450	144.833	127.193	96.667	133.132	82.542
2	2-Jan-15	123.610	148.250	125.877	95.667	130.914	81.167
3	3-Jan-15	123.610	147.750	118.969	90.417	135.685	84.125
4	4-Jan-15	126.500	152.417	126.700	96.292	134.274	83.250
5	5-Jan-15	118.580	140.792	123.300	93.708	132.258	82.000
6	6-Jan-15	94.160	106.167	89.254	67.833	104.772	64.958
7	7-Jan-15	108.470	127.375	86.842	66.000	91.398	56.667
8	8-Jan-15	97.660	112.375	97.917	74.417	94.422	58.542
9	9-Jan-15	113.020	133.000	99.726	75.792	84.543	52.417
1084	20-Dec-17	115.060	136.000	104.715	79.583	97.782	60.625
1085	21-Dec-17	117.140	138.708	125.713	95.542	138.575	85.917
1086	22-Dec-17	114.320	135.417	125.439	95.333	134.946	83.667
1087	23-Dec-17	117.140	138.708	118.805	90.292	134.005	83.083
1088	24-Dec-17	118.580	140.833	119.079	90.500	128.763	79.833
1089	25-Dec-17	117.140	139.292	125.877	95.667	128.293	79.542
1090	26-Dec-17	120.010	143.167	122.862	93.375	130.444	80.875
1091	27-Dec-17	104.880	122.125	104.112	79.125	124.866	77.417
1092	28-Dec-17	114.320	135.583	117.982	89.667	124.597	77.250
1093	29-Dec-17	115.790	137.333	116.667	88.667	126.411	78.375

3.1.3 Spesifikasi PLTA

Pada pembangkit listrik tenaga air terbagi beberapa bagian utama antara lain bendungan (dam), kanal, pipa penstock, turbin, generator. Tabel 3.2 - 3.4, kita dapat melihat spesifikasi masing-masing PLTA PT. Vale Indonesia. Dari table ini dapat diperoleh informasi untuk keperluan fungsi kendala, yaitu data kapasitas generator, kapasitas bendungan, dan besarnya limpasan yang diijinkan.

3.1.3.1 Dam Batubesi dan Larona Kanal

Di daerah Batubesi (sekitar 25 km dari Sorowako), tepatnya diujung danau Towuti dibangun bendungan setinggi 30 meter, bendungan ini digunakan untuk mengendalikan dan mengalirkan air yang masuk ke kanal buatan. Energi air mengalir melalui kanal buatan terbuka sepanjang 7.1 km dan kemudian diterjunkan melalui 3 buah Penstock sepanjang 1.3 km dengan tinggi 140 meter. Penstock adalah pipa baja yang mengalirkan air dari ujung kanal (lower canal) ke turbin yang berputar.

3.1.3.2 PLTA Larona

PLTA Larona mulai dibangun pada tahun 1975 dan diresmikan penggunaannya pada tahun 1977. PLTA Larona memiliki tiga buah generator yang mulanya hanya berkapasitas 55 MW. Kemudian pada tahun 1997 ketiga buah generator tersebut di-upgrade sehingga kapasitasnya menjadi 65 MW, dan selanjutnya tahun 2003 salah satu unit ini kembali di-upgrade menjadi 70 MW. Inflow untuk ketiga unit pembangkit ini disupplai melalui pintu Larona kanal (*canal intake*) dengan debit air kapasitas maksimum 148 m³/detik (*cumecs*).

Pada Tabel 3.2 sebagai berikut menunjukkan spesifikasi pembangkit listrik tenaga air Larona. Sedangkan Gambar 3.2 menunjukkan gambar PLTA Larona yang merupakan PLTA yang berada pada hulu (*Upper stream*).

Tabel 3.2 Spesifikasi PLTA Larona

Turbine/parameter	Unit	Min	Max
Rating head	m	146.7	150.3
Rating daya	MW	65.4	67
Rating net head	m	148	
Rating net daya	MW	65.4	
Speed	RPM	272.7	
Rate flow	Cumecs	51	
Generator/parameter			
Rating daya output	MW	70 & 85	
Factor daya		0.8 & 0.85	
Voltage	kV	11	
Frekuensi	Hz	50	

3.1.3.3 PLTA Balambano

PLTA Balambano dibangun pada tahun 1998 dan memiliki dua buah generator dengan daya terpasang masing-masing 68.5 MW. Berbeda dengan PLTA Larona, PLTA Balambano tidak menggunakan kanal untuk mengalirkan airnya, tetapi air dari dam Balambano langsung masuk dua buah penstock sepanjang 120 meter dan berdiameter 5 meter. Air dari penstock akan memutar turbin dengan kecepatan 214.3 rpm. Inflow untuk kedua unit pembangkit ini disupplai melalui pipa penstock masing-masing dengan debit air kapasitas maksimum 148 m³/detik (*cumecs*).

Pada Tabel 3.3 menunjukkan spesifikasi pembangkit listrik tenaga air Balambano. Sedangkan Gambar 3.3 menunjukkan gambar PLTA Balambano yang merupakan PLTA yang berada pada tengah-tengah (*Middle stream*).

Tabel 3.3 Spesifikasi PLTA Balambano

Turbine/parameter	Unit	Min	Max
Rating head	m	83.5	86.5
Rating daya	MW	67.5	68.5
Rating net head	m	148	
Rating net daya	MW	65.4	
Speed	RPM	214.3	
Rate flow	Cumecs	92	
Generator/parameter			
Rating daya output	MW	70.5	
Factor daya		0.85	
Voltage	kV	11	
Frekuensi	Hz	50	
Dam/parameter			
Storage	m3 Million	31.5	
Elevation	m	164	165.95
Storage effective	m3 Million	1.7	



Gambar 3.2 PLTA Larona



Gambar 3.3 PLTA Balambano



Gambar 3.4 PLTA Karebbe

3.1.3.4 PLTA Karebbe

Pada tahun 2006 dimulai pembangunan PLTA Karebbe dan tujuan pembangunan untuk mengatasi kendala keterbatasan energi listrik agar dapat mencapai target produksi 200 juta pon nickel per tahun. PLTA Karebbe memanfaatkan aliran Sungai Larona yang mengalir dari PLTA Balambano. Tampungan air Dam Karebbe ini selanjut disalurkan

melalui 2 buah Penstock yang menghasilkan daya terpasang masing-masing generator 65 MW. Inflow untuk kedua unit pembangkit ini disuplai melalui pipa penstock masing-masing dengan debit air kapasitas maksimum 148 m³/detik (*cumecs*).

Pada Tabel 3.4 sebagai berikut menunjukkan spesifikasi pembangkit listrik tenaga air Karebbe. Sedangkan Gambar 3.4 menunjukkan gambar PLTA Karebbe yang merupakan PLTA yang berada pada daerah hilir (*Downstream*).

Tabel 3.4 Spesifikasi PLTA Karebbe

Turbine/parameter	Unit	Min	Max
Rating head	m	83.5	86.5
Rating daya	MW	67.5	68.5
Rating net head	m	148	
Rating net daya	MW	65.4	
Speed	RPM	214.3	
Rate flow	Cumecs	92	
Generator/parameter			
Rating daya output	MW	68.5	
Factor daya		0.85	
Voltage	kV	11	
Frekuensi	Hz	50	
Dam/parameter			
Storage	m ³ Million	31.5	
Elevation	m	164	165.95
Storage effective	m ³ Million	1.7	

3.2 Penentuan Fungsi Obyektif

Fungsi obyektif atau fungsi tujuan merupakan fungsi dari tujuan yang ingin kita capai misalnya hasil yang optimal. Pada tulisan ini fungsi obyektifnya adalah mengoptimalkan besarnya daya yang dibangkitkan, atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Max } (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} + P_{g4} + P_{g5} + P_{g6} + P_{g7}) \quad (3.1)$$

dengan:

P_{g1} = Larona hydropower generator unit-1

P_{g2} = Larona hydropower generator unit-2

P_{g3} = Larona hydropower generator unit-3

P_{g4} = Balambano hydropower generator unit-1

P_{g5} = Balambano hydropower generator unit-2

P_{g6} = Karebbe hydropower generator unit-1

P_{g7} = Karebbe hydropower generator unit-2

3.3 Penentuan Batasan (*Constrain*)

Fungsi kendala adalah batasan-batasan yang ada pada PLTA dam. Pada penelitian ini batasan-batasannya adalah:

- Daya maksimum yang dibutuhkan oleh Smelting Furnace dan Auxilery.
- Kapasitas masing-masing generator membangkitkan daya atau pelepasan air oleh turbine masing-masing PLTA.
- Kapasitas dam/bendungan.
- Besarnya limpasan (spill) yang diizinkan pada bangunan pelimpah.

Dari hasil pengumpulan data daya seperti yang disebutkan pada subbab 3.1.1, diperoleh maksimum daya yang dibutuhkan adalah 325 MWatt. Sehingga batasan-batasan dapat dituliskan,

$$P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} + P_{g4} + P_{g5} + P_{g6} + P_{g7} \geq 325 \quad (3.2)$$

$$P_{g1} \leq 65 \quad (3.3)$$

$$P_{g2} \leq 65 \quad (3.4)$$

$$P_{g3} \leq 85 \quad (3.5)$$

$$P_{g4} \leq 68.5 \quad (3.6)$$

$$P_{g5} \leq 68.5 \quad (3.7)$$

$$P_{g6} \leq 65 \quad (3.8)$$

$$P_{g7} \leq 65 \quad (3.9)$$

Selain persamaan kendala di atas ada 3 persamaan kendala yang diperoleh dari mengetahui karakteristik input-output dari masing-masing pembangkit listrik tenaga air itu sendiri. Karakteristik input-output dapat dihitung karena sebagaimana kita ketahui bahwa besarnya daya listrik yang dibangkitkan generator adalah fungsi dari water ouflow

turbin. Pada penelitian ini karakteristik input-output ditentukan melalui metode regresi linier dengan mengambil dan menganalisa data proses selama 3 tahun yakni pada tahun (2015) – (2017) seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1.2. adapun ke 3 persamaan kendala tersebut dituliskan pada persamaan (3.10) – (3.12).

$$Q_{TL} = 17.325 + 0.717P [m^3/det] \quad (3.10)$$

$$Q_{TB} = 1.315P [m^3/det] \quad (3.11)$$

$$Q_{TK} = 1.613P [m^3/det] \quad (3.12)$$

3.4 Optimasi Daya

Melakukan optimasi pada suatu proses adalah suatu keniscayaan apalagi itu berdamfak langsung terhadap besar kecilnya biaya yang ditimbulkan, terkhusus bagi perusahaan PT Vale Indonesia. Optimasi pada operasi pembangkit listrik tenaga air adalah sangat tergantung pada ketersedian air pada bendungan.

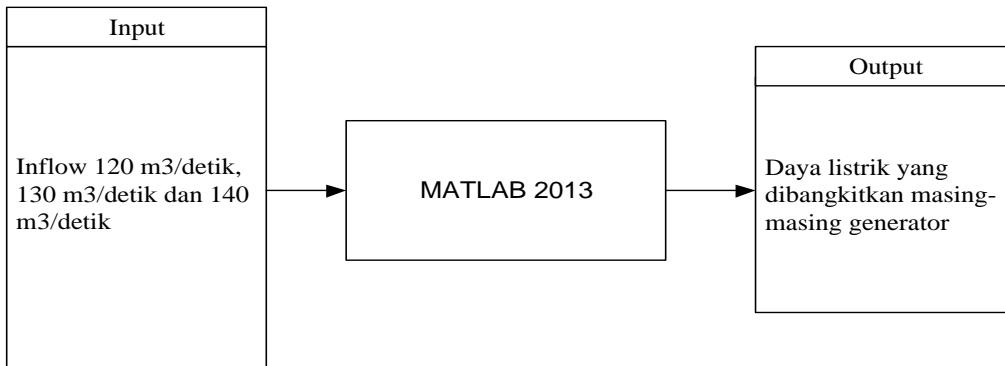
Pada penelitian ini, algoritma optimasi yang digunakan adalah linier programming dengan fungsi obyektif pada (3.1). Sementara fungsi kendala pada persamaan (3.2) – (3.9) ditambah 3 persamaan karakteristik input-output (3.10) – (3.12). Sehingga ada 11 persamaan kendala (*constraint*). Persamaan kendala dapat dituliskan dalam bentuk matriks. Hasil algoritma ini memberikan nilai daya optimum setiap unit PLTA apabila salah satu unit PLTA di-off-kan karena Preventive Maintenance. Pada penelitian ini, salah satu unit saja di-off-kan untuk Preventive Maintenance, karena hal ini terkait pemenuhan kebutuhan daya minimum pada *furnace* dan *auxiliary*.

Dalam menurunkan fungsi kendala, diperlukan informasi tentang karakteristik input-output masing-masing PLTA. Melalui simulasi beberapa skenario nilai *inflow*, dapat diperoleh pola beban yang terjadi. Dari pola beban ini selanjutnya dapat dicari nilai inflow yang optimum untuk setiap beban yang dibutuhkan oleh *furnace* dan *auxiliary*.

3.4.1 Simulasi

Pada studi ini, software yang dipergunakan melakukan simulasi optimasi adalah MATLAB dan Excell. MATLAB adalah salah satu software yang dipergunakan untuk melakukan simulasi optimasi pada suatu proses. Dan pada studi ini dilakukan optimasi pengaturan air pada PLTA dam dengan fungsi obyektif memaksimalkan daya listrik yang

dibangkitkan oleh generator. Sebelum menjalankan simulasi pada MATLAB, kami membuatkan Matrix terhadap parameter-parameter batasan semua generator terpasang dan persamaan karakteristik input-output untuk selanjutnya melakukan simulasi dengan variasi inflow dari 120 m³/detik, 130 m³/detik dan 140 m³/detik. Simulasi di MATLAB software dapat digambarkan seperti berikut ini.



Gambar 3.5 Input dan Output di MATLAB Software

Langkah-langkah simulasi ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Memberikan variasi input inflow dari 120 m³/detik, 130 m³/detik, dan 140 m³/detik pada sisi input.
- Setiap input inflow dilakukan perhitungan pada persamaan karakteristik input-output generator. Hasil perhitungan ini diformulasikan dalam persamaan matrix.
- Persamaan matrix (Lampiran C) lalu dimasukkan ke dalam MATLAB.
- Pada MATLAB juga dimasukkan semua batasan-batasan
- Pada MATLAB angka 1 mewakili generator on dan angka 0 mewakili generator off.
- Pada MATLAB, jika PLTA Larona unit#1 di set pada angka 0 artinya Preventive maintenance dilakukan pada PLTA Larona unit#1(Pg1), sementara Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6 dan Pg7 di set angka 1 artinya Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6 dan Pg7 posisi on. Hal ini dilakukan secara bergantian sampai semua unit PLTA dapat dilakukan Preventive Maintenance.
- Setelah melakukan langkah “f”, setiap kondisi simulasi menghasilkan optimal daya pada masing-masing unit PLTA.

3.4.2 Koreksi Hasil

Tahap ini diperlukan karena hasil optimasi masih menunjukkan nilai daya bukan nol pada unit yang di-off-kan. Selain itu masih terdapat nilai daya yang di atas kapasitas unit. Dari tahap ini dihasilkan pola beban yang terkoreksi. Nilai MWatt tersebut mengillustrasikan bahwa ada debit air (flow) yang dialirkan melalui bypass valve atau pintu spillway dari PLTA turbine generator yang sementara dilaksanakan preventive maintenance. Besarnya angka MWatt ini dihitung atau dikonversi menjadi total debit air (*flow rate*) melalui persamaan karakteristik input-output masing-masing PLTA. Adapun konversi MWatt output terhadap outflow turbine masing-masing PLTA sesuai spek ditunjukkan pada Tabel 3.5 sebagai berikut:

Tabel 3.5 PLTA Spek Daya Output dan Outflow Turbine

PLTA	Mwatt/(m ³ /detik)
LARONA	1.218
BALAMBANO	0.778
KAREBBE	0.644

3.5 Analisa

Pada tahap ini dilakukan analisa terhadap semua table pada beban terkoreksi, sehingga diperoleh kesimpulan tentang laju aliran inflow optimum.

Mengenai dampak ekonomi yang ditimbulkan dengan melakukan *preventive maintenance* pada PLTA PT Vale Indonesia secara independent dapat dihitung melalui persamaan:

$$E_{s1} = A_1 B_1 (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} + P_{g4} + P_{g5} + P_{g6} + P_{g7}) \quad (3.13)$$

$$E_{s2} = A_2 B_2 (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} + P_{g4} + P_{g5} + P_{g6} + P_{g7}) \quad (3.14)$$

$$E_s = E_{s1} + E_{s2} \quad (3.15)$$

Dengan:

E_{s1} = Energi saving preventive maintenance durasi 4 jam

E_{s2} = Energi saving preventive maintenance durasi 10 jam

A_1 = frekuensi preventive maintenance durasi 4 jam periode satu tahun

A_2 = frekuensi preventive maintenance durasi 10 jam periode satu tahun

B_1 = Preventive maintenance durasi 4 jam selama satu tahun

B_2 = Preventive maintenance durasi 10 jam selama satu tahun

E_s = Energi saving

BAB 4

HASIL PENELITIAN

4.1 Penentua Realisasi Beban PLTA

Adapun cara penentuan besarnya realisasi beban telah dibahas pada sub bab 3.1.1 dengan melakukan Analisa menggunakan control chart terhadap data beban PLTA PT Vale Indonesia selama 3 tahun yakni periode tahun (2015) – (2017). Grafik kontrol untuk kedua beban (furnace grid dan auxiliary grid) tersebut ditunjukkan pada lampiran B. Untuk keperluan informasi data realisasi beban bagi prosedur optimisasi, maka digunakan nilai $\mu + 2\delta$ (mean + 2 standar deviasi) yang diperoleh dari grafik kontrol tersebut. Selanjutnya dihitung nilai rata-rata dari ketiga data diatas (selama 3 tahun) untuk mengetahui realisasi beban seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebesar 324.77 atau dibulatkan 325 MWatt.

Untuk periode tahun 2015 beban smelting furnace ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan beban auxiliary pada Gambar 4.2. Keseluruhan control chart periode tahun (2015) – (2017) dapat dilihat pada lampiran B.

Tabel 4. 1 Realisasi Beban PLTA PT Vale Indonesia Tahun (2015) – (2017)

Tahun	Parameter	FCE	Auxiliary	FCE + Auxiliary	Realisasi Beban
2015	UCL	282.54	68.17	350.71	324.77
	Mean	237.93	57.65	295.58	
	LCL	193.32	47.12	240.44	
	Mean + 2 kali standar deviasi			332.33	
2016	UCL	264.17	70.63	334.80	324.77
	Mean	229.33	57.17	286.49	
	LCL	194.48	43.70	238.18	
	Mean + 2 kali deviasi			318.70	
2017	UCL	270.69	68.48	339.17	324.77
	Mean	234.85	56.64	291.49	
	LCL	193.01	44.79	237.80	
	Mean + 2 kali deviasi			323.28	

4.2 Karakteristik Input-Output masing-masing PLTA

Data input – output dari setiap PLTA dibuat grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 – Gambar 4.3. Dari hasil ini diperoleh persamaan input-output masing-masing PLTA sebagai berikut:

- PLTA Larona

$$Q_{TL} = 17.325 + 0.717P [m^3/det] \quad (4.1)$$

- PLTA Balambano

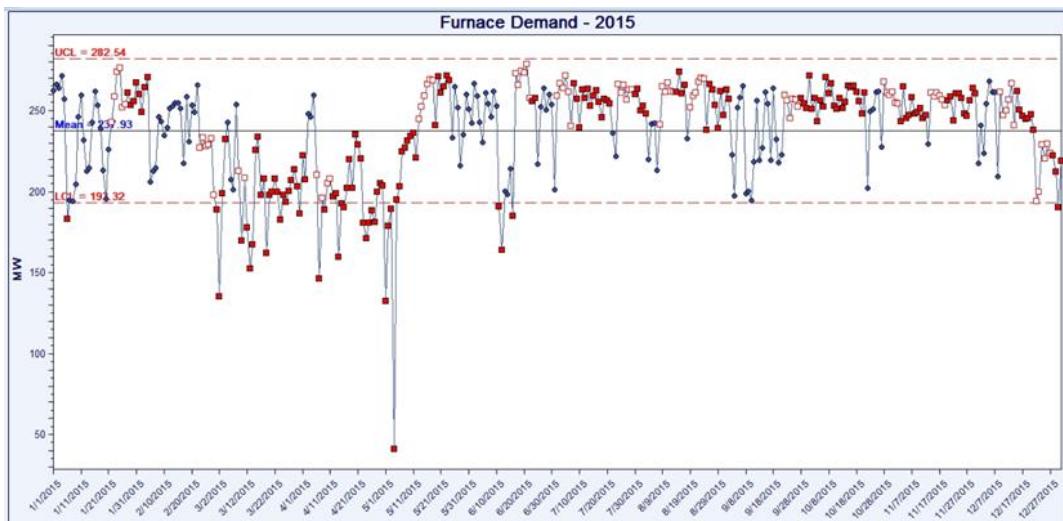
$$Q_{TB} = -0.0003 + 1.315P [m^3/det] \text{ atau}$$

$$Q_{TB} = 1.315P [m^3/det] \quad (4.2)$$

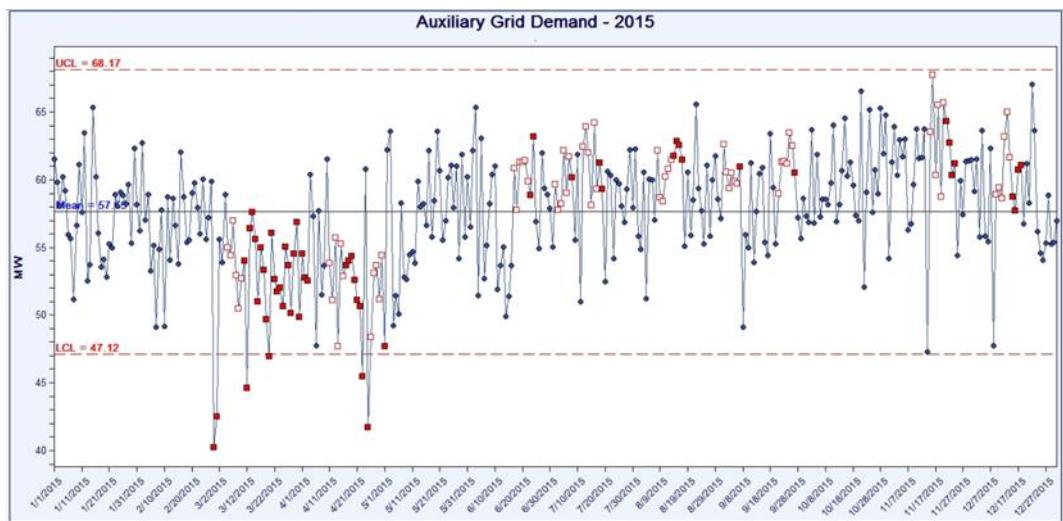
- PLTA Karebbe

$$Q_{TK} = -0.0002 + 1.613P [m^3/det] \text{ atau}$$

$$Q_{TK} = 1.613P [m^3/det] \quad (4.3)$$



Gambar 4.1 Beban Smelting Furnace Tahun 2015



Gambar 4.2 Beban Auxiliary Tahun 2015

4.3 Hasil Simulasi MATLAB

Persamaan input-output untuk masing-masing PLTA saat aliran inflow berbeda dengan mengacu pada persamaan (4.1) – (4.3) adalah:

- Inflow 120 m³/detik

PLTA Larona

$$102.675 = 0.717 (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3}) \quad (4.4)$$

PLTA Balambano

$$125 = 1.315 (P_{g4} + P_{g5}) \quad (4.5)$$

PLTA Karebbe

$$125 = 1.613 (P_{g6} + P_{g7}) \quad (4.6)$$

- Inflow 130 m³/detik

PLTA Larona

$$112.675 = 0.717 (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3}) \quad (4.7)$$

PLTA Balambano

$$135 = 1.315 (P_{g4} + P_{g5}) \quad (4.8)$$

PLTA Karebbe

$$135 = 1.613 (P_{g6} + P_{g7}) \quad (4.9)$$

- Inflow 140 m³/detik

PLTA Larona

$$122.675 = 0.717 (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3}) \quad (4.10)$$

PLTA Balambano

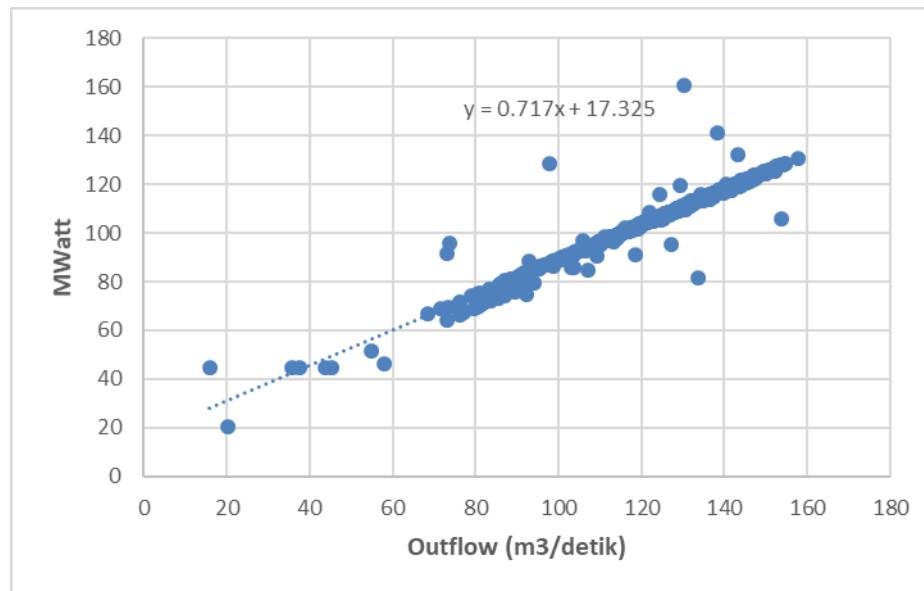
$$145 = 1.315 (P_{g4} + P_{g5}) \quad (4.11)$$

PLTA Karebbe

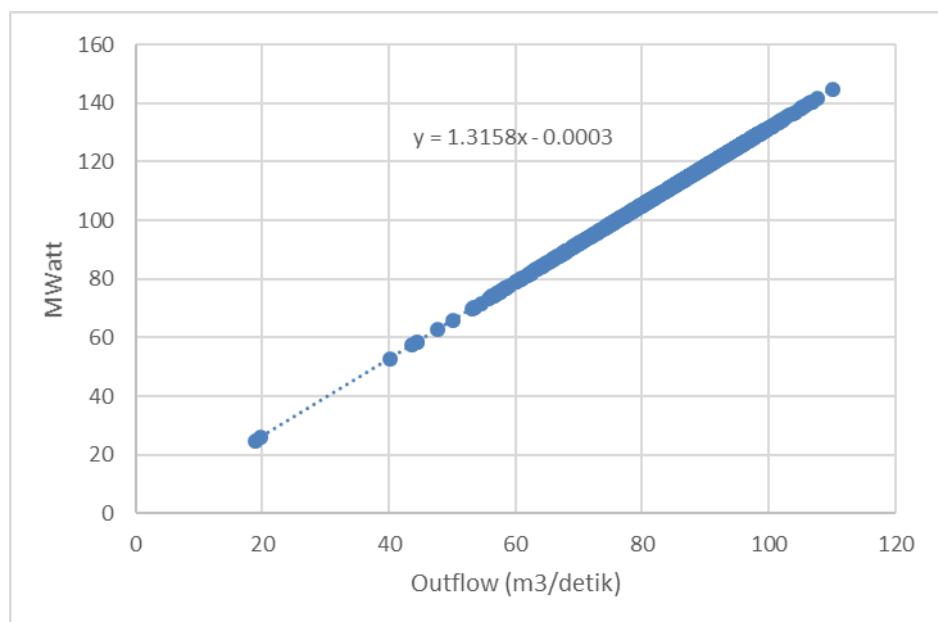
$$145 = 1.613 (P_{g6} + P_{g7}) \quad (4.12)$$

Sembilan persamaan di atas selanjutnya menjadi fungsi kendala tambahan bagi problem optimisasi yang telah didefinisikan pada (3.1). Sehingga diperoleh 11 fungsi kendala untuk setiap inflow yang berbeda, yaitu (3.2) – (3.9) dan tiga persamaan

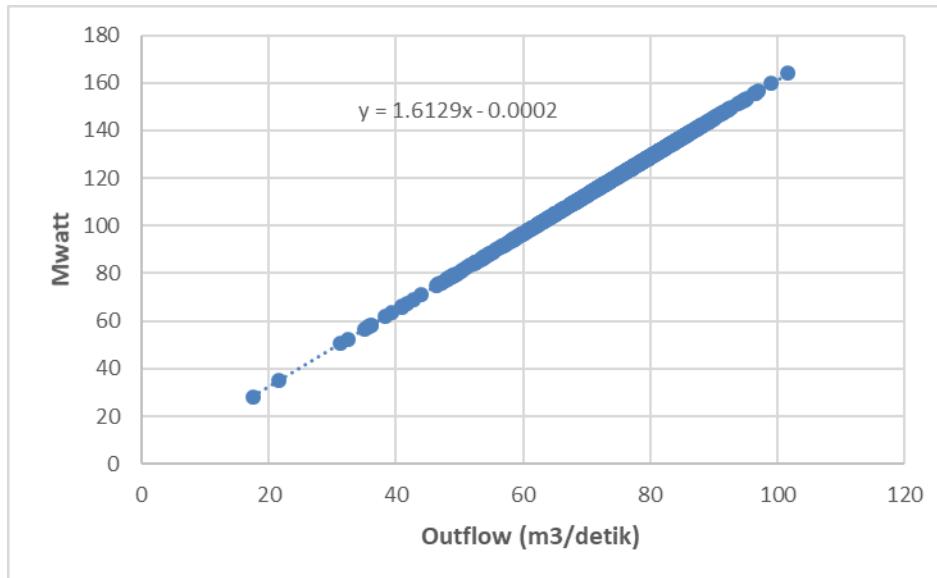
karakteristik input-output terkait seperti yang ditunjukkan pada Lampiran C. Selanjutnya hasil optimisasi dari Matlab ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.6 – Gambar 4.8. Pada simulasi ini, tambahan flow pada bendungan (dam) Balambano adalah berasal dari sungai Patingko dengan debit air pada kisaran 5 m³/detik dan tambahan flow pada bendungan Karebbe yang berasal dari sungai Balambano dengan debit air pada kisaran sebesar 5 m³/detik (Sumber laporan daily operator PLTA PT Vale Indonesia).



Gambar 4.3 PLTA Larona Karakteristik Input-Output



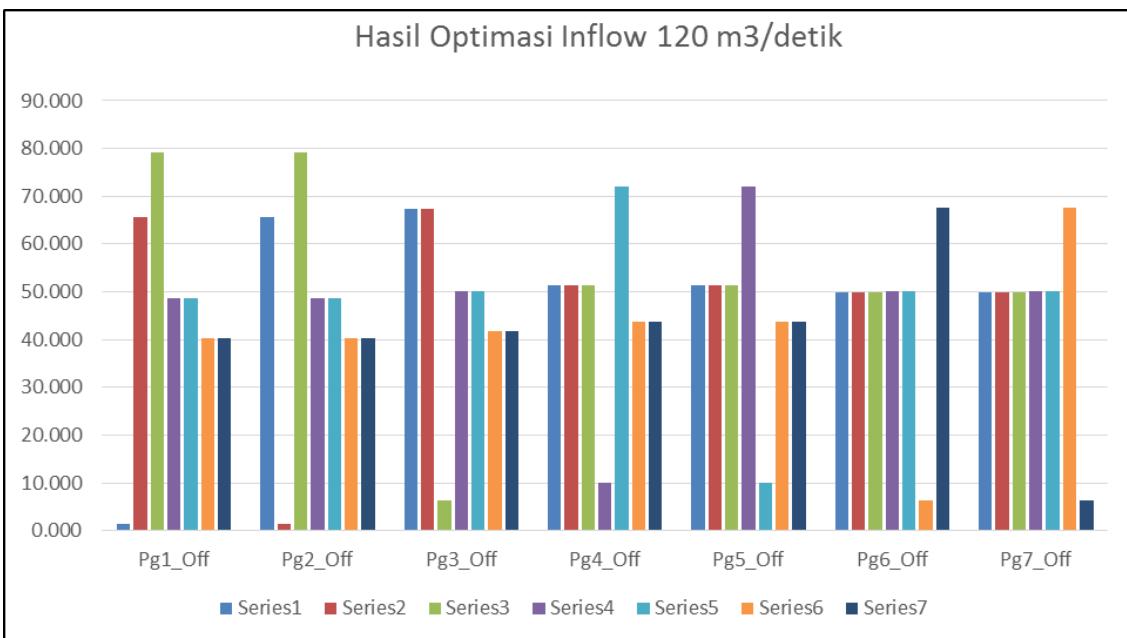
Gambar 4.4 PLTA Balambano Karakteristik Input-Output



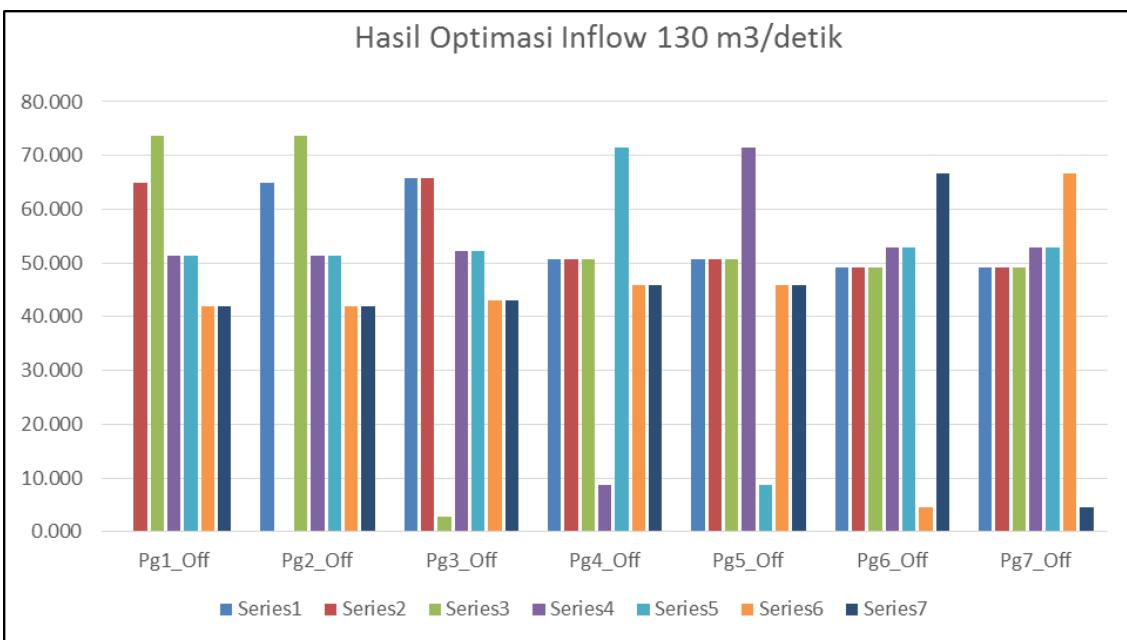
Gambar 4.5 PLTA Karelbe Karakteristik Input-Output

Tabel 4.2 Hasil Optimasi MATLAB

Qin	Qout	Hydropower	Pg1_Off (MW)	Pg2_Off (MW)	Pg3_Off (MW)	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)	Pg6_Off (MW)	Pg7_Off (MW)
m3/sec	m3/sec								
120.000	120.000	Pg1	1.402	65.645	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg2	65.645	1.402	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg3	79.064	79.064	6.335	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646	50.041	10.084	72.150	10.084	50.161
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646	50.041	72.150	10.084	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	6.331	67.516
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	67.516	6.331
		Totally	323.934	323.934	324.566	323.506	323.506	324.024	324.024
130.000	130.000	Pg1	0.000	65.000	65.837	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg2	65.000	0.000	65.837	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg3	73.643	73.643	2.872	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	135.000	Pg4	51.331	51.331	52.259	8.639	71.510	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg5	51.331	51.331	52.259	71.510	8.639	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg6	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	4.470	66.609
130.000	135.000	Pg7	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	66.609	4.470
		Totally	325.000	325.000	325.211	323.960	323.960	324.671	324.671
140.000	140.000	Pg1	0.000	62.420	62.420	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg2	62.420	0.000	62.420	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg3	62.420	62.420	0.000	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	145.000	Pg4	55.133	55.133	55.133	6.768	70.979	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg5	55.133	55.133	55.133	70.979	6.768	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg6	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	2.679	65.644
140.000	145.000	Pg7	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	65.644	2.679
		Totally	325.000	325.000	325.000	323.939	323.939	325.491	325.491



Gambar 4.6 Simulasi Inflow 120 m³/detik

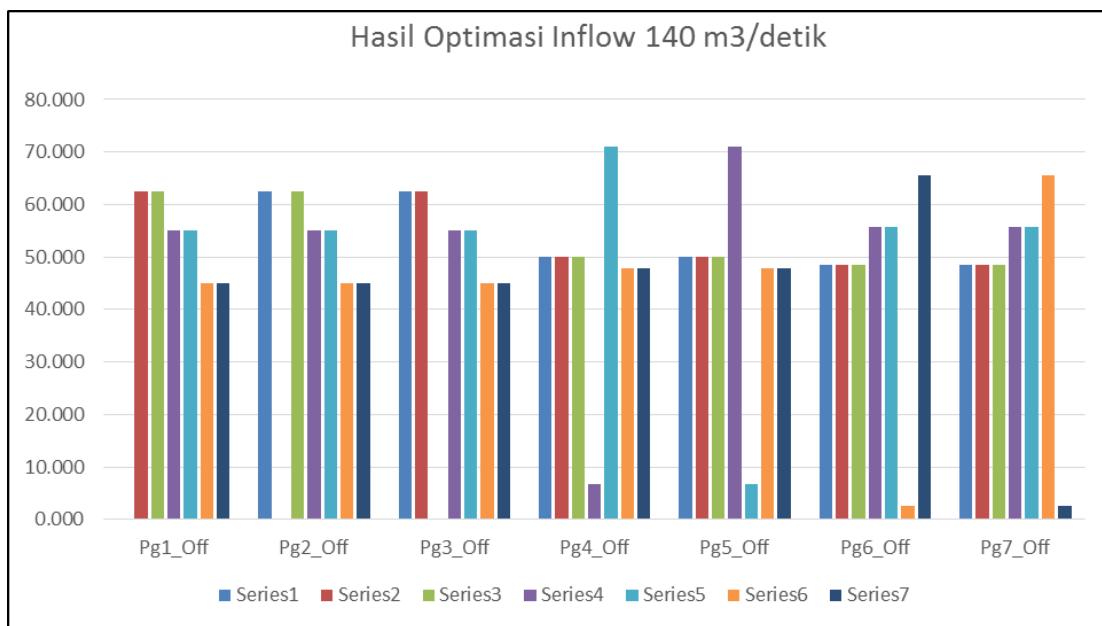


Gambar 4.7 Simulasi Inflow 130 m³/detik

4.4 Hasil Terkoreksi

Hasil terkoreksi simulasi inflow 120 m³/detik, 130 m³/detik dan 140 m³/detik saat terjadi *preventive maintenance* pada masing-masing PLTA ditunjukkan pada Tabel 4.3 – Tabel 4.5. Jika jumlah daya listrik yang dibutuhkan pada saat pelaksanaan *preventive maintenance* lebih besar dari hasil terkoreksi ini, maka perlu dilakukan penambahan

inflow. Sebagai contoh, misalkan pada saat PLTA Larona 1 (Pg1) dilakukan preventive maintenance, daya total terkoreksi yang dihasilkan adalah 307.823 MWatt (lihat Tabel 4.3, kolom 4, baris terakhir). Jika permintaan daya listrik lebih besar dari 307.823 MWatt, maka hal ini dapat ditingkatkan dengan langkah menambah inflow pada sisi Larona kanal. Simulasi penambahan inflow ini ditunjukkan pada Tabel 4.6 untuk penambahan sebesar 1 m³/detik dan Tabel 4.7 untuk penambahan sebesar 5 m³/detik. Langkah-langkah penambahan inflow ini lebih detil ditunjukkan pada Lampiran E.



Gambar 4.8 Simulasi Inflow 140 m3/detik

Tabel 4.3 Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 120 m³/detik

Qin m3/sec	Qout m3/sec	PLTA	Pg1_Off (MW)	Pg2_Off (MW)	Pg3_Off (MW)	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)	Pg6_Off (MW)	Pg7_Off (MW)
			0.000	60.000	60.000	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg1	0.000	60.000	60.000	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg2	60.000	0.000	60.000	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg3	70.000	70.000	0.000	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646	50.041	0.000	60.000	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646	50.041	60.000	0.000	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	0.000	55.000
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	55.000	0.000
		Total	307.823	307.823	303.701	301.272	301.272	305.177	305.177

Tabel 4.4 Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 130 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off	Pg4_Off	Pg5_Off	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)						
130.000	130.000	Pg1	0.000	60.000	60.000	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg2	60.000	0.000	60.000	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg3	70.000	70.000	0.000	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	135.000	Pg4	51.331	51.331	52.259	0.000	60.000	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg5	51.331	51.331	52.259	60.000	0.000	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg6	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	0.000	55.000
130.000	135.000	Pg7	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	55.000	0.000
		Total	316.357	316.357	310.664	303.810	303.810	308.592	308.592

Tabel 4.5 Hasil Terkoreksi Simulasi Inflow 140 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off	Pg4_Off	Pg5_Off	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)						
140.000	140.000	Pg1	0.000	60.000	60.000	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg2	60.000	0.000	60.000	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg3	62.420	62.420	0.000	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	145.000	Pg4	55.133	55.133	55.133	0.000	60.000	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg5	55.133	55.133	55.133	60.000	0.000	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg6	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	0.000	55.000
140.000	145.000	Pg7	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	55.000	0.000
		Totally	322.580	322.580	320.161	306.191	306.191	312.167	312.167

Pada Tabel 4.6, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar 1 m³/detik, *preventive maintenance* dilaksanakan pada Pg1 atau Pg2, dan total daya yang dibangkitkan 310.668 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA yang dilakukan *preventive maintenance* sejumlah 14.232 m³/detik.

Tabel 4.6 Simulasi Inflow 120 m³/detik ke 121 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
121.00	121.00	Pg1	0.000	60.000
121.00	121.00	Pg2	60.000	0.000
121.00	121.00	Pg3	70.000	70.000
121.00	126.00	Pg4	49.425	49.425
121.00	126.00	Pg5	49.425	49.425
121.00	126.00	Pg6	40.909	40.909
121.00	126.00	Pg7	40.909	40.909
		Total	310.668	310.668

Pada Tabel 4.7, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar $5 \text{ m}^3/\text{detik}$, Preventive maintenance dilaksanakan pada Pg1 atau Pg2, dan total daya yang dibangkitkan 322.049 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA unit yang di Preventive maintenance sejumlah 18.232 m^3/detik . Untuk simulasi penambahan inflow lainnya, dapat dilihat pada Lampiran D.

Tabel 4.7 Simulasi Inflow 120 m^3/detik ke 125 m^3/detik

Q_{in}	Q_{out}	PLTA	$Pg1_Off$	$Pg2_Off$
m^3/sec	m^3/sec		(MW)	(MW)
125.00	125.00	Pg1	0.000	60.000
125.00	125.00	Pg2	60.000	0.000
125.00	125.00	Pg3	70.000	70.000
125.00	130.00	Pg4	52.538	52.538
125.00	130.00	Pg5	52.538	52.538
125.00	130.00	Pg6	43.486	43.486
125.00	130.00	Pg7	43.486	43.486
		Total	322.049	322.049

Sebagai contoh, misalkan pada saat PLTA Larona 3 (Pg3) dilakukan preventive maintenance, daya total terkoreksi yang dihasilkan adalah 303.701 MWatt (lihat Tabel 4.3, kolom 6, baris terakhir). Jika permintaan daya listrik lebih besar dari 303.701 MWatt, maka hal ini dapat ditingkatkan dengan langkah menambah inflow pada sisi Larona kanal. Simulasi penambahan inflow ini ditunjukkan pada Tabel 4.8 untuk penambahan sebesar $1 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan Tabel 4.9 untuk penambahan sebesar $5 \text{ m}^3/\text{detik}$. Langkah-langkah penambahan inflow ini lebih detil ditunjukkan pada Lampiran E.

Pada Tabel 4.8, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar $1 \text{ m}^3/\text{detik}$, *preventive maintenance* dilaksanakan pada Pg3, dan total daya yang dibangkitkan 306.546 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA yang dilakukan *preventive maintenance* sejumlah 18.136 m^3/detik .

Pada Tabel 4.9, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar $5 \text{ m}^3/\text{detik}$, Preventive maintenance dilaksanakan pada Pg3, dan total daya yang dibangkitkan 317.927 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA unit yang di Preventive maintenance sejumlah 22.136 m^3/detik .

Sebagai contoh, misalkan pada saat PLTA Balambano 1 atau 2 (Pg4 & Pg5) dilakukan preventive maintenance, daya total terkoreksi yang dihasilkan adalah 301.272

MWatt (lihat Tabel 4.3, kolom 7 dan 8, baris terakhir). Jika permintaan daya listrik lebih besar dari 301.272 MWatt, maka hal ini dapat ditingkatkan dengan langkah menambah inflow pada sisi Larona kanal. Simulasi penambahan inflow ini ditunjukkan pada Tabel 4.10 untuk penambahan sebesar 1 m³/detik dan Tabel 4.11 untuk penambahan sebesar 5 m³/detik. Langkah-langkah penambahan inflow ini lebih detil ditunjukkan pada Lampiran E.

Tabel 4.8 Simulasi Inflow 120 m3/detik ke 121 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)
121.00	121.000	Pg1	60.000
121.00	121.000	Pg2	60.000
121.00	121.000	Pg3	0.000
121.00	126.000	Pg4	50.819
121.00	126.000	Pg5	50.819
121.00	126.000	Pg6	42.454
121.00	126.000	Pg7	42.454
		Total	306.546

Tabel 4.9 Simulasi Inflow 120 m3/detik ke 125 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)
125.00	125.000	Pg1	60.000
125.00	125.000	Pg2	60.000
125.00	125.000	Pg3	0.000
125.00	130.000	Pg4	53.932
125.00	130.000	Pg5	53.932
125.00	130.000	Pg6	45.031
125.00	130.000	Pg7	45.031
		Total	317.927

Pada Tabel 4.10, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar 1 m³/detik, *preventive maintenance* dilaksanakan pada Pg4 atau Pg5, dan total daya yang dibangkitkan 306.213 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA yang dilakukan *preventive maintenance* sejumlah 29.567 m³/detik.

Tabel 4.10 Simulasi Inflow 120 m³/detik ke 121 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m ³ /sec	m ³ /sec		(MW)	(MW)
121.00	121.000	Pg1	52.473	52.473
121.00	121.000	Pg2	52.473	52.473
121.00	121.000	Pg3	52.473	52.473
121.00	126.000	Pg4	0.000	60.000
121.00	126.000	Pg5	60.000	0.000
121.00	126.000	Pg6	44.396	44.396
121.00	126.000	Pg7	44.396	44.396
		Total	306.213	306.213

Tabel 4.11 Simulasi Inflow 120 m³/detik ke 125 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m ³ /sec	m ³ /sec		(MW)	(MW)
125.00	125.000	Pg1	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg2	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg3	57.344	57.344
125.00	130.000	Pg4	0.000	60.000
125.00	130.000	Pg5	60.000	0.000
125.00	130.000	Pg6	46.973	46.973
125.00	130.000	Pg7	46.973	46.973
		Total	325.978	325.978

Sebagai contoh, misalkan pada saat PLTA Karelbe 1 atau 2 (Pg6 & Pg7) dilakukan preventive maintenance, daya total terkoreksi yang dihasilkan adalah 310.177 MWatt (lihat Tabel 4.3, kolom 9 dan 10, baris terakhir). Jika permintaan daya listrik lebih besar dari 310.177 MWatt, maka hal ini dapat ditingkatkan dengan langkah menambah inflow pada sisi Larona kanal. Simulasi penambahan inflow ini ditunjukkan pada Tabel 4.12 untuk penambahan sebesar 1 m³/detik dan Tabel 4.13 untuk penambahan sebesar 5 m³/detik. Langkah-langkah penambahan inflow ini lebih detil ditunjukkan pada Lampiran E.

Pada Tabel 4.12, ini adalah hasil yang diperoleh saat menambahkan inflow pada Larona kanal sebesar 1 m³/detik, *preventive maintenance* dilaksanakan pada Pg6 atau Pg7, dan total daya yang dibangkitkan 310.387 MWatt. Pada langkah ini air yang dilewatkan pada bypass PLTA yang dilakukan *preventive maintenance* sejumlah 30.255 m³/detik.

Jika jumlah daya listrik yang dibutuhkan pada saat pelaksanaan Preventive maintenance tersebut lebih besar dari total 310.177 MWatt, maka hal ini dapat ditingkatkan dengan langkah menambah inflow melalui penambahan inflow Larona kanal. Besarnya penambahan inflow ini mengikuti tabel nilai konversi.

Tabel 4.12 Simulasi Inflow 120 m³/detik ke 121.22 m³/detik.

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m ³ /sec	m ³ /sec		(MW)	(MW)
121.00	121.00	Pg1	51.169	51.169
121.00	121.00	Pg2	51.169	51.169
121.00	121.00	Pg3	51.169	51.169
121.00	126.00	Pg4	50.940	50.940
121.00	126.00	Pg5	50.940	50.940
121.00	126.00	Pg6	0.000	55.000
121.00	126.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	310.387	310.387

Tabel 4.13 Simulasi Inflow 120 m³/detik ke 124 m³/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m ³ /sec	m ³ /sec		(MW)	(MW)
124.00	124.00	Pg1	62.128	62.128
124.00	124.00	Pg2	62.128	62.128
124.00	124.00	Pg3	62.128	62.128
124.00	129.00	Pg4	53.275	53.275
124.00	129.00	Pg5	53.275	53.275
124.00	129.00	Pg6	0.000	55.000
124.00	129.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	347.932	347.932

4.5 Analisa dan Pembahasan Preventive Maintenance

Preventive maintenance PLTA PT Vale Indonesia hasil simulasi optimasi pada sub bab (4.3) – (4.4) menunjukkan bahwa PLTA Larona dan Balambano dapat dilakukan preventive maintenance dengan jadwal terpisah dengan jadwal preventive maintenance pada smelting furnace. Sementara pada PLTA Karelbe (Pg6 dan Pg7) kurang efisien dilakukan preventive maintenance yang terpisah dengan jadwal preventive maintenance pada *smelting furnace*, karena beberapa m³/detik debit air terbuang percuma ke Laut

Malili tampa membangkitkan daya listrik dalam rangka pemenuhan kebutuhan daya listrik.

4.5.1 Jadwal Preventive Maintenance Furnace

Pada smelting furnace memiliki dua jenis jadwal preventive maintenance. Kedua jenis jadwal itu adalah jadwal Preventive maintenance lamanya 4 Jam dan jadwal preventive maintenance lamanya 10 jam. Dalam 1 tahun kalender operasi PT. Vale Indonesia adalah 52 weeks. Preventive maintenance lamanya 4 jam itu per 6 weeks kalender dan lamanya 10 jam itu pe 12 weeks kalender *cicle schedule* nya. Sehingga masing-masing generator pembangkit listrik tenaga air dilakukan Preventive maintenance sebanyak 12 kali dalam satu tahun yakni 8 kali preventive maintenance lamanya 4 jam dan 4 kali preventive maintenance lamanya 10 jam.

4.5.2 Energi Saving for PLTA Preventive Maintenance Independent

Selanjutnya untuk mengetahui dampak ekonomi yang dapat diperoleh sesuai hasil studi kami dengan melakukan preventive maintenance independent pada PLTA di PT Vale Indonesia yakni dengan menggunakan persamaan (3.13) – (3.15) yang telah dibahas pada sub bab 3.5. Besarnya nilai saving energi dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Energi Saving PLTA PT Vale Indonesia

ENERGI SAVING PLTA PT VALE INDONESIA PREVENTIVE MAINTENANCE INDEPENDENT						
PLTA Generator	Kapasitas Generator	PLTA Beban	Preventive Maintenance Durasi 4 jam per tahun	Preventive Maintenance Durasi 10 jam per tahun	MWatt	m3/detik
Pg1	65	65	32	40	4680	12118.23
Pg2	65	65	32	40	4680	
Pg3	85	75	32	40	5400	
Pg4	68.5	65	32	40	4680	12030.85
Pg5	68.5	65	32	40	4680	
Pg6	60	60	0	0	0	0.00
Pg7	60	60	0	0	0	
					24120	24149.07

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil penelitian ini, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai realisasi beban adalah 325 MWatt.
2. Generator pada PLTA Larona dan Balambano dapat dilakukan preventive maintenance dengan jadwal terpisah dengan jadwal preventive maintenance pada smelting furnace. Sementara pada PLTA Karebbe (Pg6 dan Pg7) kurang efisien dilakukan preventive maintenance yang terpisah dengan jadwal preventive maintenance pada *smelting furnace*, karena beberapa m³/detik air harus dilepas ke Laut Malili untuk mencapai pemenuhan kebutuhan daya listrik.
3. Saat Preventive Maintenance pada PLTA Larona (Pg1, Pg2, Pg3) dan Balambano (Pg4, Pg5) Inflow optimum yang direkomendasikan adalah 135 m³/detik.
4. Energy saving sebesar 24120 MWhours atau flow rate 24149.07 m³/detik untuk operasi per tahun.

5.2 Rekomendasi

Hasil studi ini agar memberikan dampak bagi perusahaan, maka penulis:

1. Diharapkan managemen PT. Vale Indonesia khususnya yang membawahi langsung Hydropower plant mencoba meng-implementaskan hasil studi ini, sehingga dapat melakukan Predictive Maintenance yang akan semakin memperpanjang live time peralatan-peralatan hydropower plant.
2. Predictive maintenance yang bagus akan secara implisit mengurangi down time pembangkit listrik tenaga air, dan secara explisit mengurangi dampak biaya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ibrahim, Y., "Hydropower for sustainable water and energy development". Renewable Sustainable Energy Rev. 14, page 462–469, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.025.G>.
- [2] Urbaniak, M., Kiedrzynska, E., Zalewski, M., "The role of a lowland, reservoir in the transport of micropollutants, nutrients and the suspended particulate matter along the river continuum". Hydrol. Res. 43, 400–411, 2012. <http://dx.doi.org/>
- [3] Yipin Wu, Ji Chen, "Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: A case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China". Agricultural Water Management Vol. 116, 110-121, January 2013. <http://doi.org/10.1016/j.aqwat.2012.10.016>
- [4] Liping Wang, Boquan Wang, Pu Zhang, Minghao Liu, Chuangang Li "Study on optimization of the short-term operation of cascade hydropower stations by considering output error". Journal of Hydrology 549, 326–339. ,2017
- [5] A. Bensalem, A. Bouhentala, A. El-Maouhab "Deterministic optimal management strategy of hydroelectric power plant". Energy Procedia 18 225 – 234, 2012.
- [6] Olawale O. E. Ajibola, Olamede S. Ajala, James O. Akanmu and Oluwaseyi J. Baloun, "Optimizing hyroelectric power generation: The case of Shiroro Dam," Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol I, 978-988, 2017.
- [7] Xiao-lin Ge, Li-zi Zhang, Jun Shu, Nai-fan Xu, "Short-term hydropower optimal scheduling considering the optimization of water time delay". Elsevier, Electric Power Systems Research 110, page 188-197, 2014.
- [8] C.G. Baslis, A.G. Bakirtzis, "Mid-term stochastic scheduling of a price-maker hydro producer with pumped storage". IEEE Transactions on Power Systems 26, page 1856-1865, November 2011.
- [9] Winasis, Hari Prasetijo, Giri Angga Setia, "Optimizing Hyroelectric Power generation: The Case of Shiroro Dam," Medium-term optimization of hydropower to attention water available used linear programming" JNTETI, Vol. 3, 152-156, May 2014.
- [10] Ahmed Bensalem*, Abdallah Miloudi**Salah Eddine Zouzou*** — Belgacem Mahdad***Abdelmalik Bouhentala*, Optimal short term hydro scheduling of large power system with discretized horizon," Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 58, NO. 4, 214–219, 2007.
- [11] A. Bensalem, A. S. Bennagoune, M.S. Benbouza, A. El-Maouhab "Optimal management of hydropower systems". Physisc Procedia 54, 138-143, 2014.
- [12] Ju-Hwan Yoo "Maximization of hydropower generation through the application of a linear proramming model". Elsevier, 182-187, 2009.
- [13] Yulianus Rombe Pasalli, Adelhard Beni Rehiara, "Design planning of microhydro power plant in Hink River". Procedia Environmental Science 20, 55-63, 2014.
- [14] Matt Davison, Guangzhi Zhao, "Optimal control of Two-dam hydro facility". System Engineering Procedia 3, 1-12, 2012.
- [15] G.E.J. Toreh, M. Tuegeh, M. Pakiding, L. Patras, "Peramalan beban listrik untuk penjadwalan sistem pembangkit". E-Jurnal Teknik Elektro dan Komputer-FT. UNSTRAT, 2013.

- [16] Lu, Z.Y., Meng, L.L., Wang, Y., et al., "Optimal reinsurance under VaR and TvaR risk measures in the presence of reinsurer's risk limit". Insurance Math. Econ. 68, 92–100. 2016. 03.001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.insmatheco>.
- [17] Lani Rohaeni, Deni Saepuddin, aniq atlqi Rohmawati, "Aplication Genetic Algorithm for optimization water discharge of hydropower systems". Proceeding : Vol 3, 3961, 2016.

LAMPIRAN

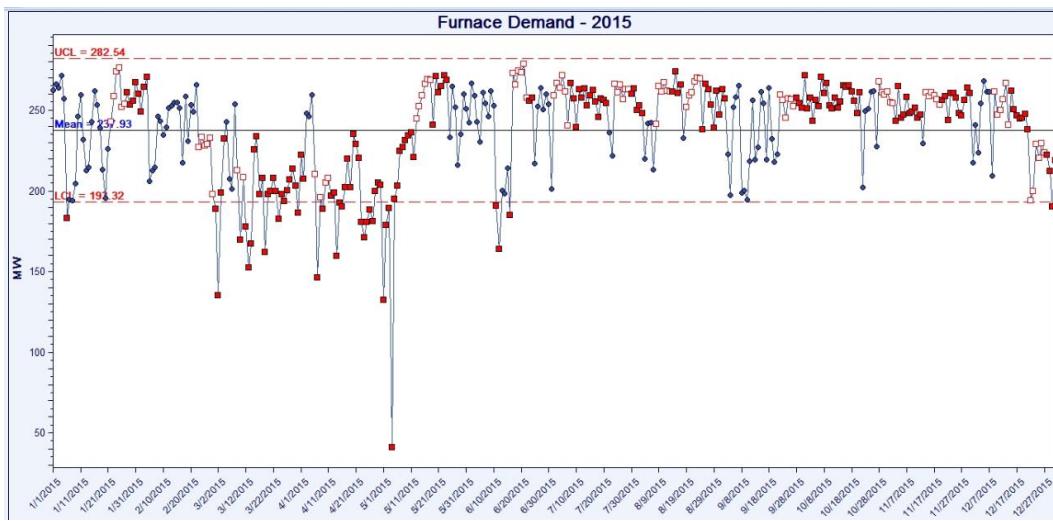
A.1 Biaya Pembangkitan Daya Listrik (Ref: Utilities operation overview report tahun 2015)

Unit Cost Power Generation													
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	YTD 2015
Auxiliary Power													
Production (MWh)	192,779	200,830	246,811	236,346	405,166	411,790	87,571	236,331	201,991	30,791	5,190	3,395	2,964
Tot. Cost	\$ 13,655,268	\$ 15,030,875	\$ 22,609,065	\$ 32,961,133	\$ 62,177,521	\$ 107,387,168	\$ 14,684,596	\$ 45,267,627	\$ 46,313,007	\$ 8,911,847	\$ 2,316,885	\$ 4,718,875	\$ 2,447,820
Cost/MWh	78.83	74.84	91.60	139.46	153.08	260.78	167.69	191.64	229.28	289.43	446.42	1389.75	825.71
Steam Turbine Gen.													
Production (MWh)	115,733	114,168	141,552	93,223	81,177	78,076	33,575	98,788	69,904	23,083	-	542	-
Tot. Cost	\$ 9,095,574	\$ 8,508,092	\$ 13,355,922	\$ 12,890,727	\$ 10,734,171	\$ 22,851,300	\$ 5,758,535	\$ 20,280,313	\$ 17,283,357	\$ 6,095,611	\$ -	\$ 2,755,933	\$ 1,227,246
Cost/MWh	78.69	74.62	94.35	138.28	132.23	292.68	171.61	205.29	247.24	264.07	#DIV/0!	6084.76	#DIV/0!
MBDG													
Production (MWh)	77,046	86,662	105,259	143,123	182,606	160,191	42,834	108,784	122,733	7,352	4,248	2,853	2,653
Tot. Cost	\$ 4,559,694	\$ 6,522,793	\$ 9,253,143	\$ 20,070,406	\$ 27,261,301	\$ 40,024,638	\$ 6,640,501	\$ 19,653,941	\$ 26,442,673	\$ 2,345,951	\$ 1,708,986	\$ 1,530,812	\$ 931,796
Cost/MWh	59.18	75.27	87.91	140.23	149.29	249.86	155.03	180.67	216.45	319.10	402.33	836.47	361.16
New Diesel													
Production (MWh)	-	-	-	-	-	142,383	173,523	11,162	28,758	9,353	356	942	-
Tot. Cost	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 24,162,048	\$ 44,511,230	\$ 2,285,559	\$ 5,333,373	\$ 2,506,976	\$ 470,285	\$ 607,099	\$ 432,130
Cost/MWh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	169.84	266.52	204.76	185.46	276.58	1320.43	645.19	#DIV/0!
Hydro													
Production (MWh)	1,980,645	2,053,757	2,111,980	1,962,325	1,890,568	1,834,068	1,964,313	2,064,513	1,966,773	2,626,863	2,419,316	2,530,310	1,904,161
Tot. Cost	\$ 3,920,115	\$ 3,652,651	\$ 2,976,403	\$ 3,406,353	\$ 2,419,733	\$ 2,316,602	\$ 2,329,514	\$ 2,535,240	\$ 2,546,918	\$ 6,230,865	\$ 6,446,278	\$ 3,566,080	\$ 2,123,766
Cost/MWh	1.98	1.78	1.41	1.74	1.28	1.26	1.19	1.23	1.29	2.37	2.66	1.41	1.12
Blended													
Production (MWh)	2,173,424	2,254,507	2,358,791	2,198,671	2,296,734	2,246,858	2,051,804	2,300,844	2,168,763	2,667,654	2,424,506	2,533,705	1,907,125
Tot. Cost	\$ 11,757,383	\$ 18,683,726	\$ 25,585,468	\$ 36,367,486	\$ 64,597,254	\$ 109,703,770	\$ 17,614,110	\$ 47,802,868	\$ 48,859,924	\$ 15,142,712	\$ 8,763,163	\$ 8,274,954	\$ 4,571,386
Cost/MWh	8.09	8.29	10.85	16.54	28.13	48.85	8.29	20.78	22.53	5.70	3.61	3.27	2.40
Average Price Fuel													
HSD (litres)	0.21	0.24	0.33	0.56	0.60	0.91	0.56	0.63	0.85	0.88	0.85	0.89	0.60
HSFO (\$/barl)	25.90	28.40	41.73	52.27	57.25	89.14	59.55	75.25	81.25	100.70	100.79	98.45	62.99

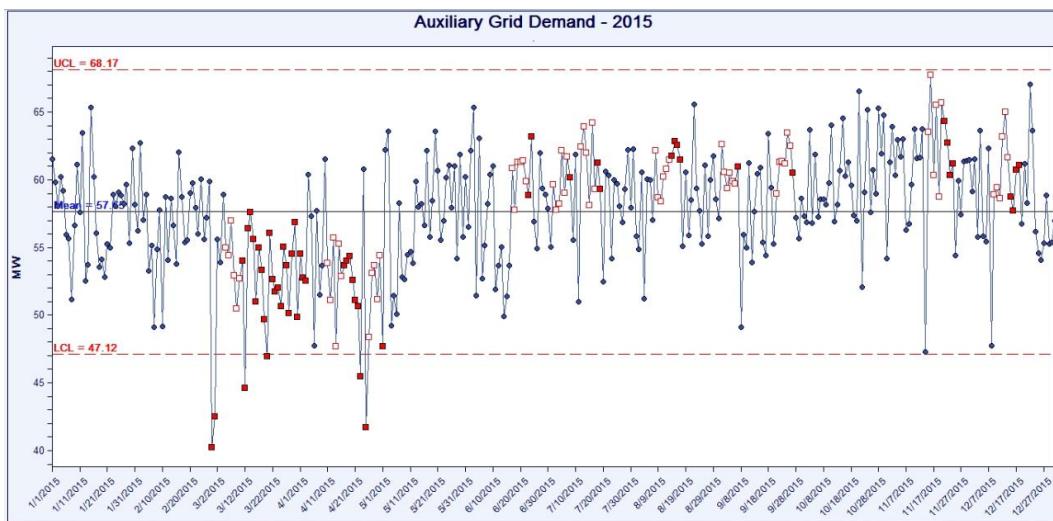
A.2 Biaya Pembangkit Daya Listrik Periode (2008) – (2012) PT Vale Indonesia

TAHUN	Cost for Generated Power (Cost per MWatt/Jam)			
	PLTA	STEAM TURBINE	MBDG	CAT DIESEL
2008	1.26	292.68	249.86	169.84
2009	1.19	171.51	155.03	256.52
2010	1.23	205.29	180.67	204.76
2011	1.29	247.24	215.45	185.46
2012	1.37	264.07	319.1	276.58
	1.268	236.158	224.022	218.632

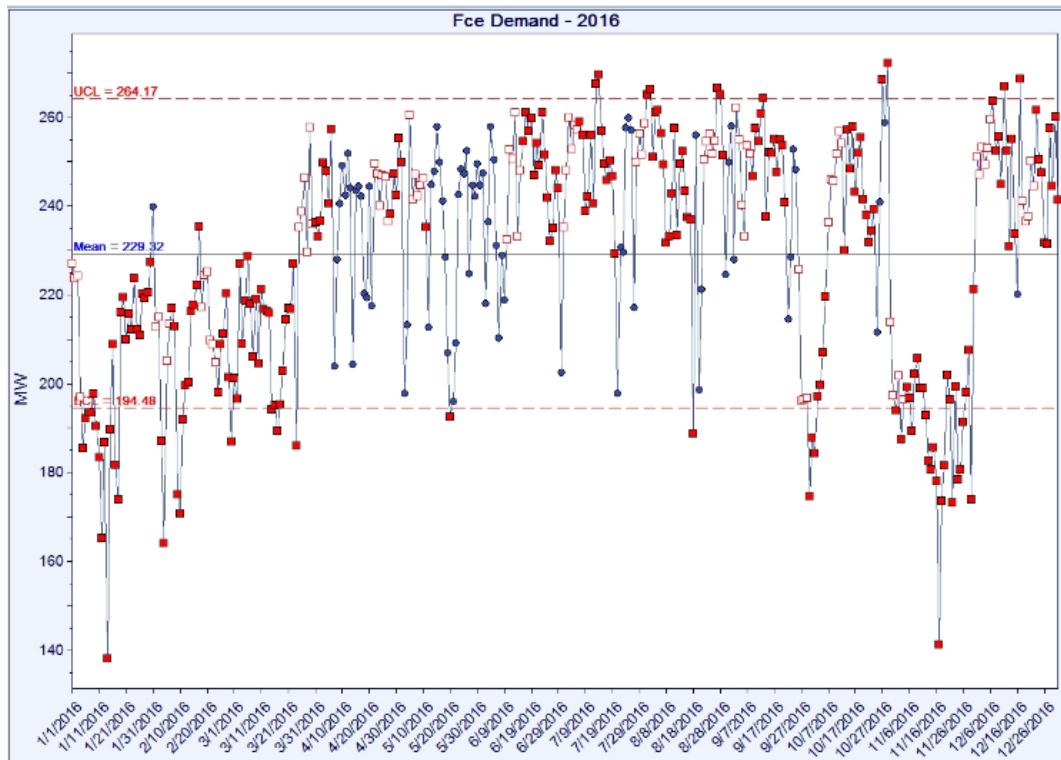
B. Grafik Control Beban PLTA



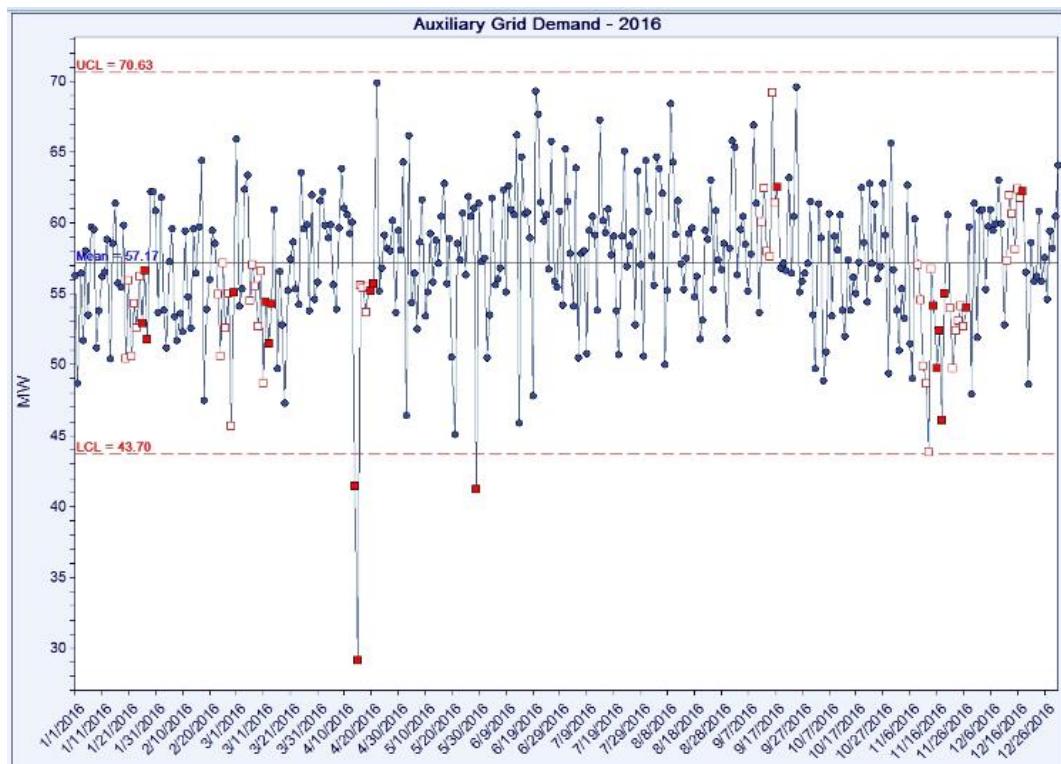
B. 1 Gambar Beban Smelting Furnace Tahun 2015



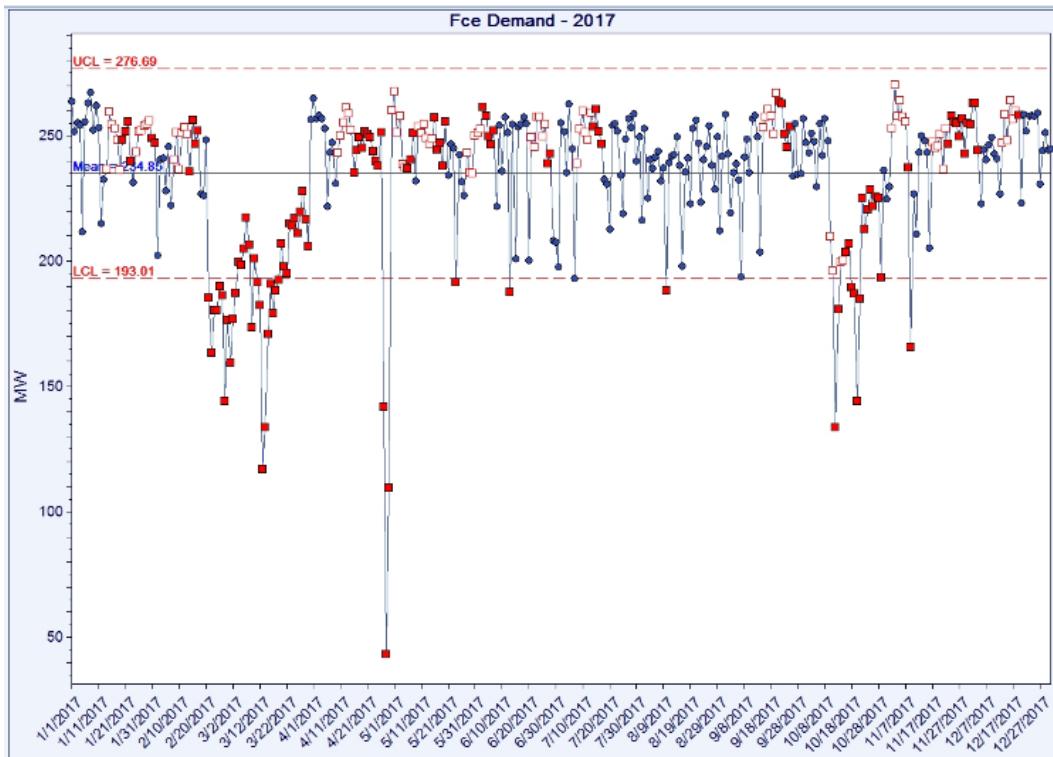
B. 2 Gambar Beban Auxiliary Tahun 2015



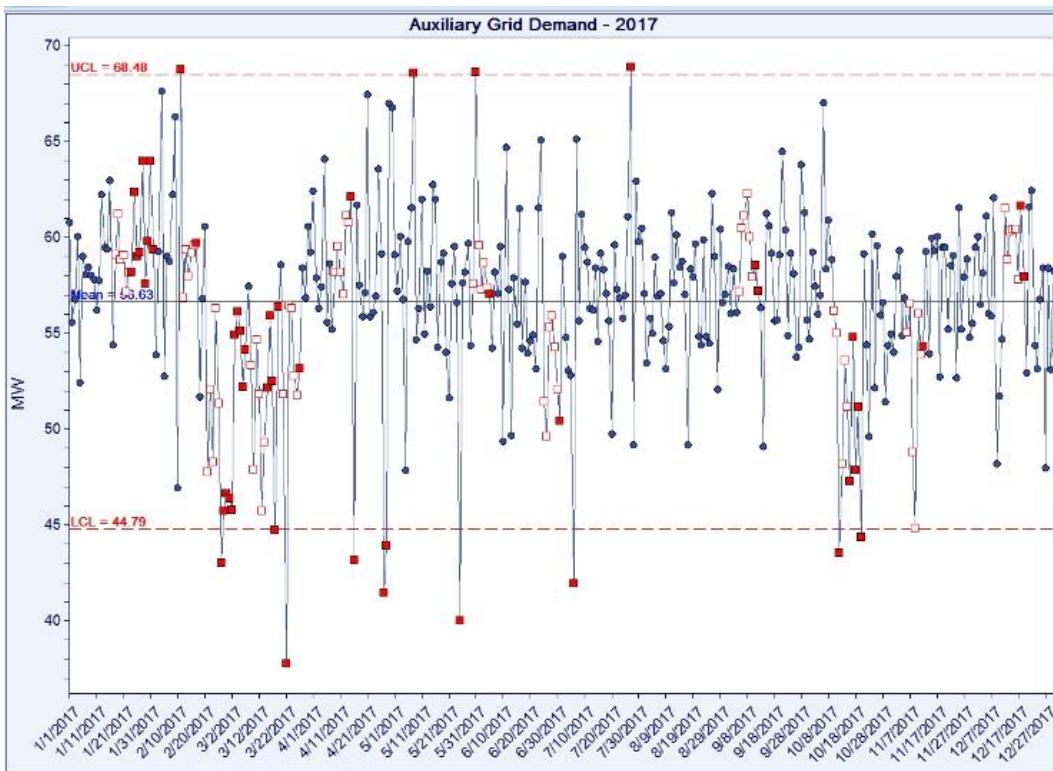
B. 3 Gambar Beban Smelting Furnace Tahun 2016



B. 4 Gambar Beban Auxiliary Tahun 2016



B. 5 Gambar Beban Smelting Furnace Tahun 2017



B. 6 Gambar Beban Auxiliary Tahun 2017

C. Persamaan Matrix

$$\left[\begin{array}{ccccccc} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.717 & 0.717 & 0.717 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.315 & 1.315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.613 & 1.613 \end{array} \right] \begin{matrix} Pg1 \\ Pg2 \\ Pg3 \\ Pg4 \\ Pg5 \\ Pg6 \\ Pg7 \end{matrix} = \begin{matrix} -325 \\ 65 \\ 65 \\ 85 \\ 68.5 \\ 68.5 \\ 102.675 \\ 125 \\ 125 \end{matrix}$$

C. 1 Persamaan Matrix simulasi inflow 120 m³/detik

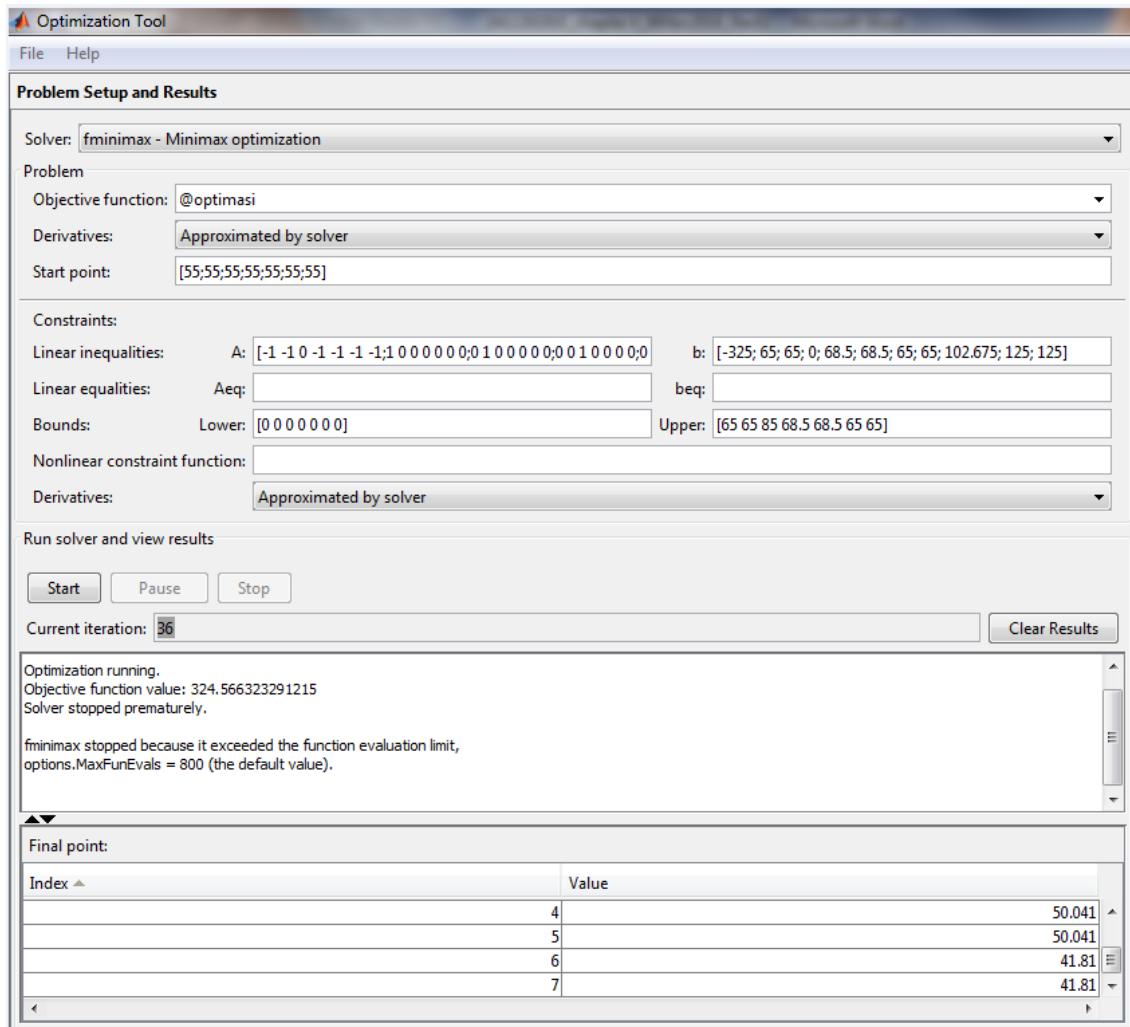
$$\left[\begin{array}{ccccccc} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.717 & 0.717 & 0.717 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.315 & 1.315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.613 & 1.613 \end{array} \right] \begin{matrix} Pg1 \\ Pg2 \\ Pg3 \\ Pg4 \\ Pg5 \\ Pg6 \\ Pg7 \end{matrix} = \begin{matrix} -325 \\ 65 \\ 65 \\ 85 \\ 68.5 \\ 68.5 \\ 112.675 \\ 135 \\ 135 \end{matrix}$$

C. 2 Persamaan Matrix simulasi inflow 130 m³/detik

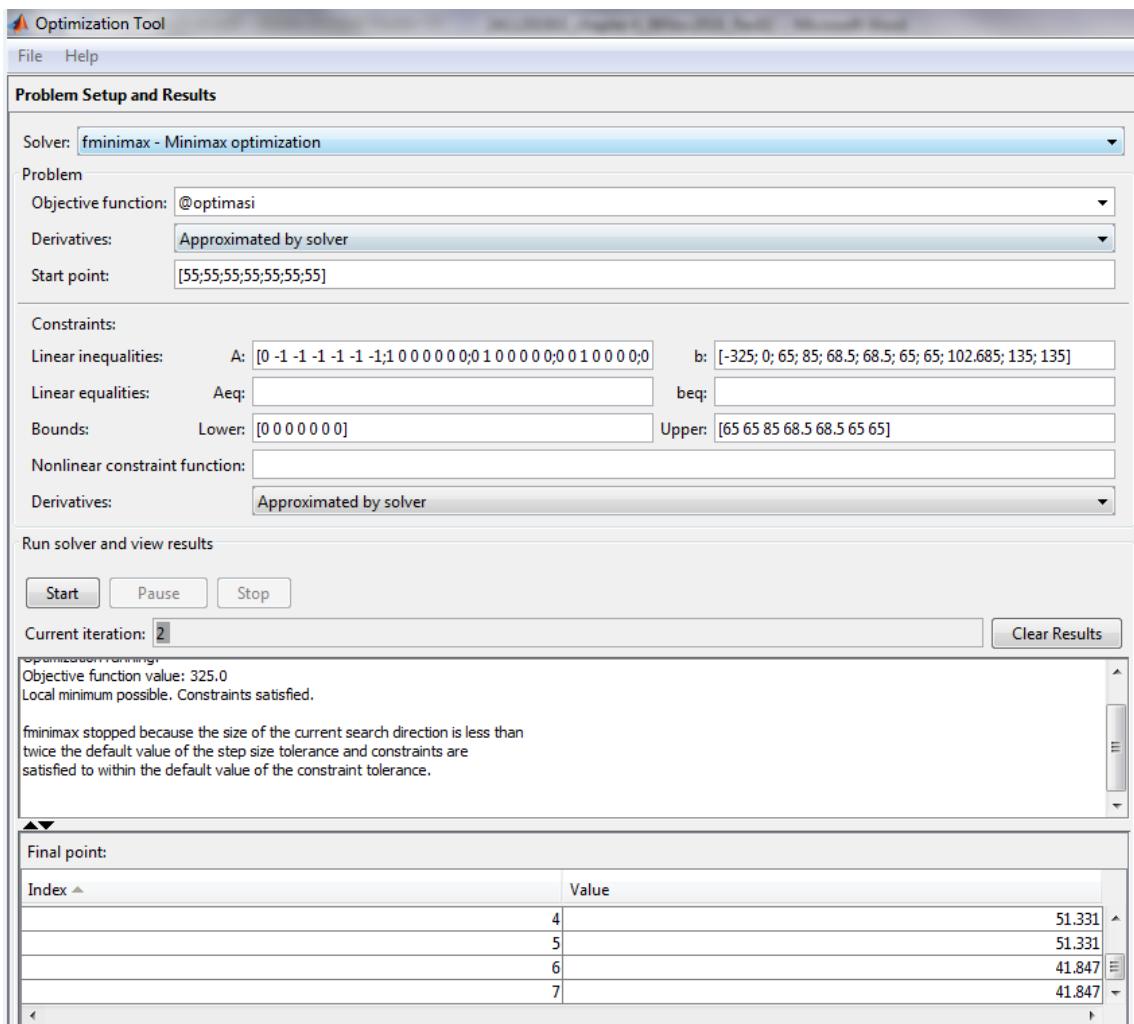
$$\left[\begin{array}{ccccccc} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.717 & 0.717 & 0.717 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.315 & 1.315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.613 & 1.613 \end{array} \right] \begin{bmatrix} Pg1 \\ Pg2 \\ Pg3 \\ Pg4 \\ Pg5 \\ Pg6 \\ Pg7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -325 \\ 65 \\ 65 \\ 85 \\ 68.5 \\ 68.5 \\ 65 \\ 65 \\ 122.675 \\ 145 \\ 145 \end{bmatrix}$$

C. 3 Persamaan Matrix simulasi inflow 140 m³/detik

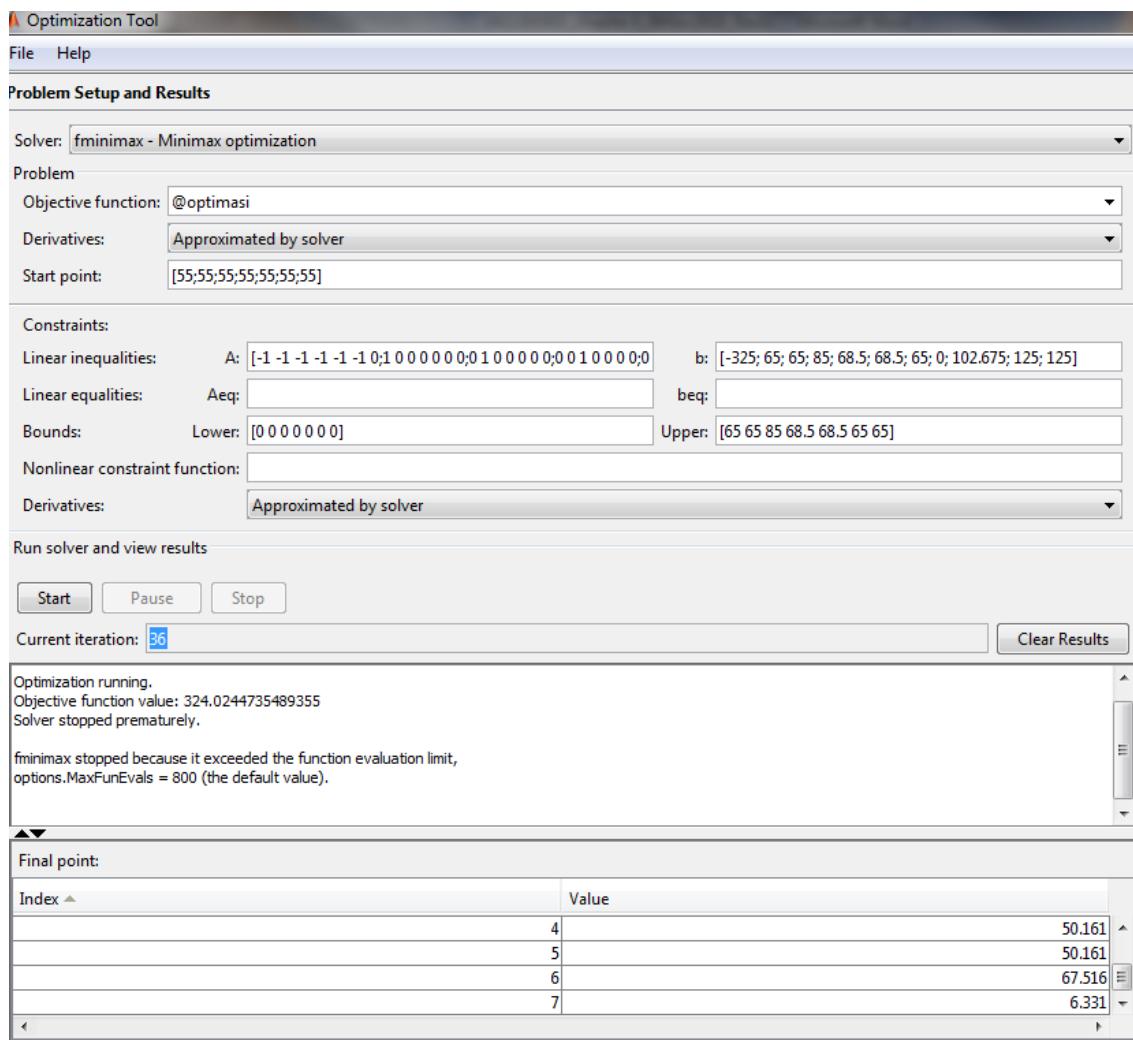
D. Simulasi MATLAB



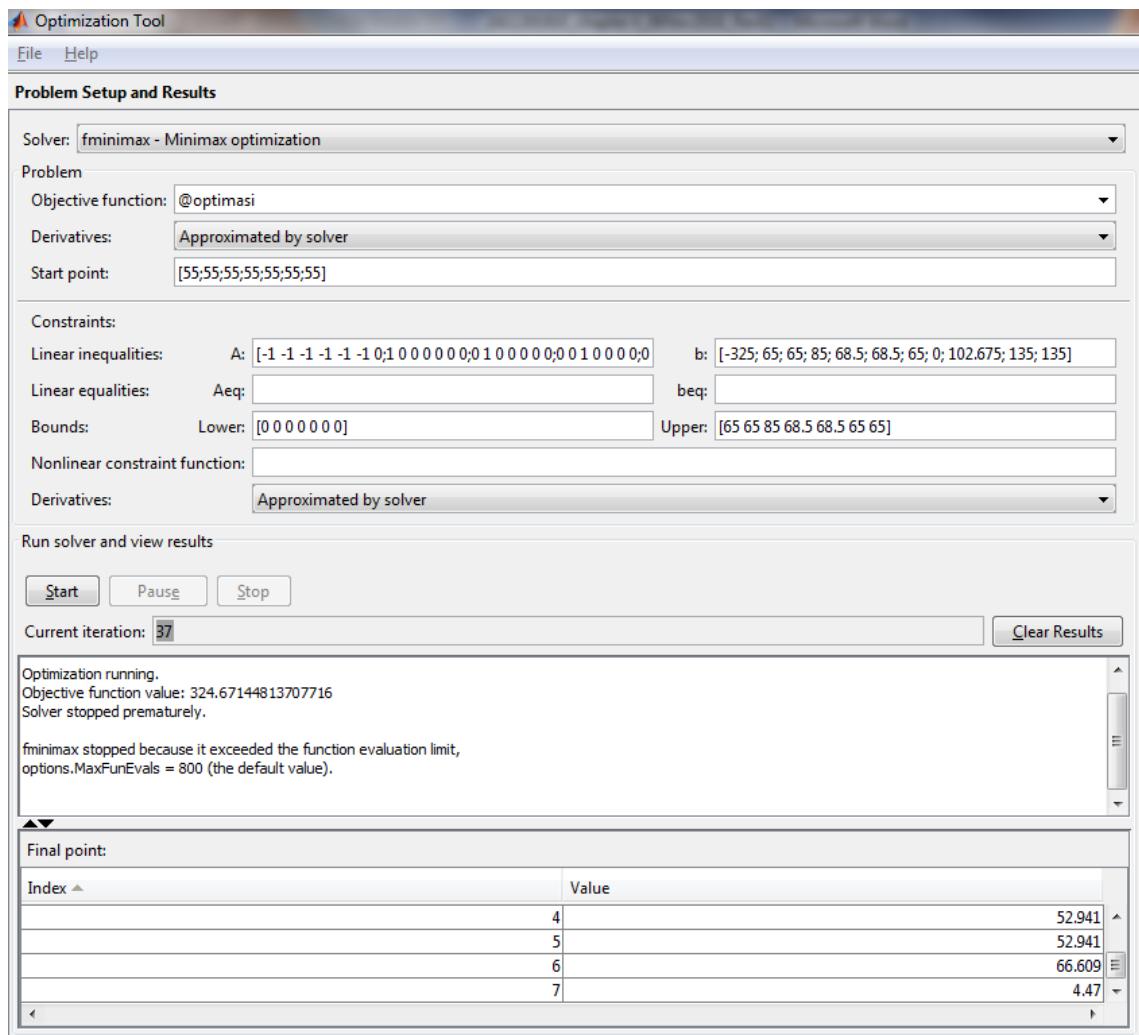
D. 1 Optimasi MATLAB Pg3 Preventive Maintenance



D. 2 Optimasi MATLAB Pg1 Preventive Maintenance



D. 3 Optimasi MATLAB Pg7 Preventive Maintenance



D. 4 Optimasi MATLAB Pg7 Preventive Maintenance

E. Cara atau Langkah Menghitung Optimasi Inflow 120 m3/detik

E. 1 Hasil Optimasi MATLAB

Qin	Qout	Hydropower	Pg1_Off (MW)	Pg2_Off (MW)	Pg3_Off (MW)	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)	Pg6_Off (MW)	Pg7_Off (MW)
120.000	120.000	Pg1	1.402	65.645	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg2	65.645	1.402	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg3	79.064	79.064	6.335	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646	50.041	10.084	72.150	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646	50.041	72.150	10.084	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	6.331	67.516
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	67.516	6.331
		Totally	323.934	323.934	324.566	323.506	323.506	324.024	324.024
130.000	130.000	Pg1	0.000	65.000	65.837	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg2	65.000	0.000	65.837	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	130.000	Pg3	73.643	73.643	2.872	50.709	50.709	49.237	49.237
130.000	135.000	Pg4	51.331	51.331	52.259	8.639	71.510	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg5	51.331	51.331	52.259	71.510	8.639	52.941	52.941
130.000	135.000	Pg6	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	4.470	66.609
130.000	135.000	Pg7	41.847	41.847	43.073	45.841	45.841	66.609	4.470
		Totally	325.000	325.000	325.211	323.960	323.960	324.671	324.671
140.000	140.000	Pg1	0.000	62.420	62.420	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg2	62.420	0.000	62.420	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	140.000	Pg3	62.420	62.420	0.000	50.112	50.112	48.518	48.518
140.000	145.000	Pg4	55.133	55.133	55.133	6.768	70.979	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg5	55.133	55.133	55.133	70.979	6.768	55.806	55.806
140.000	145.000	Pg6	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	2.679	65.644
140.000	145.000	Pg7	44.947	44.947	44.947	47.927	47.927	65.644	2.679
		Totally	325.000	325.000	325.000	323.939	323.939	325.491	325.491

E. 2 Hasil Optimasi MATLAB Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off (MW)	Pg2_Off (MW)	Pg3_Off (MW)	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)	Pg6_Off (MW)	Pg7_Off (MW)
120.000	120.000	Pg1	1.402	65.645	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg2	65.645	1.402	67.265	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg3	79.064	79.064	6.335	51.256	51.256	49.952	49.952
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646	50.041	10.084	72.150	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646	50.041	72.150	10.084	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	6.331	67.516
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265	41.810	43.752	43.752	67.516	6.331
		Totally	323.934	323.934	324.566	323.506	323.506	324.024	324.024

E. 3 Hasil belum Terkoreksi saat Pg1 atau Pg2 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	
120.000	120.000	Pg1	1.402	65.645	1.402
120.000	120.000	Pg2	65.645	1.402	5.645
120.000	120.000	Pg3	79.064	79.064	9.064
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646	16.112
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646	13.232
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265	
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265	
		Total	323.934	323.934	

E. 4 Hasil Terkoreksi Pg1 atau Pg2 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
120.000	120.000	Pg1	0.000	60.000
120.000	120.000	Pg2	60.000	0.000
120.000	120.000	Pg3	70.000	70.000
120.000	125.000	Pg4	48.646	48.646
120.000	125.000	Pg5	48.646	48.646
120.000	125.000	Pg6	40.265	40.265
120.000	125.000	Pg7	40.265	40.265
		Total	307.823	307.823

E. 5 Konversi Outflow dan MWatt PLTA Larona, Balambano & Karebbe

Inflow (m3/detik)	Daya (Mwatt)		
Larona Canal	Larona	Balambano	Karebbe
1	1.218	0.778	0.644
2	2.435	1.557	1.288
3	3.653	2.335	1.933
4	4.870	3.113	2.577
5	6.088	3.892	3.221
6	7.306	4.670	3.865
7	8.523	5.448	4.510
8	9.741	6.227	5.154
9	10.958	7.005	5.798
10	12.176	7.783	6.442

E. 6 Peningkatan Daya PLTA Balambano & Karebbe saat Pg1 atau Pg2 Preventive Maintenance

Daya (Mwatt)	
Balambano	Karebbe
48.646	40.265
49.425	40.909
50.203	41.554
50.981	42.198
51.760	42.842
52.538	43.486
53.316	44.130
54.095	44.775
54.873	45.419

E. 7 Peningkatan Daya saat Pg1 & Pg2 Preventive Maintenance

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off
			(MW)	(MW)
121.00	121.00	Pg1	0.000	60.000
121.00	121.00	Pg2	60.000	0.000
121.00	121.00	Pg3	70.000	70.000
121.00	126.00	Pg4	49.425	49.425
121.00	126.00	Pg5	49.425	49.425
121.00	126.00	Pg6	40.909	40.909
121.00	126.00	Pg7	40.909	40.909
		Total	310.668	310.668

N	Calculate		
1	120	121	

E. 8 Outflow Saat Pg1 & Pg2 Preventive Maintenance inflow 120 m3/detik

Flow yang di lewatkan pada bypass LGS#1 atau LGS#2		
Outflow Hasil Koreksi	Larona Canal	Outflow bypass
13.232	1	14.232
	2	
	3	
	4	
	5	

E. 9 Hasil belum Terkoreksi Pg3 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg3_Off	
m3/sec	m3/sec		(MW)	
120.000	120.000	Pg1	67.265	7.265
120.000	120.000	Pg2	67.265	7.265
120.000	120.000	Pg3	6.335	6.335
120.000	125.000	Pg4	50.041	20.865
120.000	125.000	Pg5	50.041	17.136
120.000	125.000	Pg6	41.810	
120.000	125.000	Pg7	41.810	
		Total	324.566	

E. 10 Hasil Terkoreksi saat Pg3 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg3_Off	
m3/sec	m3/sec		(MW)	
120.000	120.000	Pg1	60.000	
120.000	120.000	Pg2	60.000	
120.000	120.000	Pg3	0.000	
120.000	125.000	Pg4	50.041	
120.000	125.000	Pg5	50.041	
120.000	125.000	Pg6	41.810	
120.000	125.000	Pg7	41.810	
		Total	303.701	

E. 11 Peningkatan Daya PLTA Balambano & Karebbe saat Pg3 Preventive Maintenance

<i>Daya (Mwatt)</i>	
Balambano	Karebbe
50.041	41.810
50.819	42.454
51.597	43.098
52.376	43.742
53.154	44.387
53.932	45.031
54.711	45.675
55.489	46.319
56.268	46.964

E. 12 Peningkatan Daya saat Pg3 Preventive Maintenance

Qin	Qout	PLTA	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)
125.00	125.000	Pg1	60.000
125.00	125.000	Pg2	60.000
125.00	125.000	Pg3	0.000
125.00	130.000	Pg4	53.932
125.00	130.000	Pg5	53.932
125.00	130.000	Pg6	45.031
125.00	130.000	Pg7	45.031
		Total	317.927

N	Calculate
5	120 125

E. 13 Outflow Saat Pg3 Preventive Maintenance inflow 120 m3/detik

Flow yang di lewatkan pada bypass LGS#1 atau LGS#2		
Outflow Hasil Koreksi	Larona Canal	Outflow bypass
17.136	1	22.136
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

E. 14 Hasil belum Terkoreksi Pg4 atau Pg5 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off	
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	
120.000	120.000	Pg1	51.256	51.256	
120.000	120.000	Pg2	51.256	51.256	
120.000	120.000	Pg3	51.256	51.256	
120.000	125.000	Pg4	10.084	72.150	10.084
120.000	125.000	Pg5	72.150	10.084	12.150
120.000	125.000	Pg6	43.752	43.752	22.235
120.000	125.000	Pg7	43.752	43.752	28.567
		Total	323.506	323.506	

E. 15 Hasil Terkoreksi saat Pg4 atau Pg5 Preventive Maintenance Inflow 120 m3/detik

Qin m3/sec	Qout m3/sec	PLTA	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)
			51.256	51.256
120.000	120.000	Pg1	51.256	51.256
120.000	120.000	Pg2	51.256	51.256
120.000	120.000	Pg3	51.256	51.256
120.000	125.000	Pg4	0.000	60.000
120.000	125.000	Pg5	60.000	0.000
120.000	125.000	Pg6	43.752	43.752
120.000	125.000	Pg7	43.752	43.752
		Total	301.272	301.272

E. 16 Peningkatan Daya PLTA Balambano & Karebbe saat Pg4 atau Pg5 Preventive Maintenance

<i>Daya (Mwatt)</i>		
Larona	Balambano	Karebbe
51.256	60.000	43.752
52.473	60.778	44.396
53.691	61.557	45.041
54.909	62.335	45.685
56.126	63.113	46.329
57.344	63.892	46.973
58.561	64.670	47.618
59.779	65.448	48.262
60.997	66.227	48.906

E. 17 Peningkatan Daya saat Pg4 atau Pg5 Preventive Maintenance

Qin m3/sec	Qout m3/sec	PLTA	Pg4_Off (MW)	Pg5_Off (MW)
			57.344	57.344
125.00	125.000	Pg1	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg2	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg3	57.344	57.344
125.00	130.000	Pg4	0.000	60.000
125.00	130.000	Pg5	60.000	0.000
125.00	130.000	Pg6	46.973	46.973
125.00	130.000	Pg7	46.973	46.973
		Total	325.978	325.978
N		Calculate		
5	120	125		

E. 18 Outflow Saat Pg4 atau Pg5 Preventive Maintenance inflow 120 m³/detik

Penambahan Flow di release Pada Larona Canal menambah beban Larona, dan air dilewatkan di Spillway Balambano untuk selanjutnya menambah Daya di Karebbe		
Outflow Hasil Koreksi	Larona Canal	Outflow bypass
28.567	1	33.567
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	

E. 19 Hasil belum Terkoreksi Pg6 atau Pg7 Preventive Maintenance Inflow 120 m³/detik

Qin m ³ /sec	Qout m ³ /sec	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off	
			(MW)	(MW)	
120.000	120.000	Pg1	49.952	49.952	
120.000	120.000	Pg2	49.952	49.952	
120.000	120.000	Pg3	49.952	49.952	
120.000	125.000	Pg4	50.161	50.161	
120.000	125.000	Pg5	50.161	50.161	
120.000	125.000	Pg6	6.331	67.516	6.331
120.000	125.000	Pg7	67.516	6.331	12.516
		Total	324.024	324.024	18.847
					29.255

E. 20 Hasil Terkoreksi Pg6 atau Pg7 Preventive Maintenance Inflow 120 m³/detik

Qin m ³ /sec	Qout m ³ /sec	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
			(MW)	(MW)
120.000	120.000	Pg1	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg2	49.952	49.952
120.000	120.000	Pg3	49.952	49.952
120.000	125.000	Pg4	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg5	50.161	50.161
120.000	125.000	Pg6	0.000	55.000
120.000	125.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	305.177	305.177

E. 21 Peningkatan Daya PLTA Laronao & Karembe saat Pg6 atau Pg7 Preventive Maintenance

Daya (Mwatt)	
Larona	Balambano
49.952	50.161
51.169	50.940
53.604	51.718
57.257	52.496
62.128	53.275

E. 22 Peningkatan Daya saat Pg6 atau Pg7 Preventive Maintenance

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
123.00	123.00	Pg1	57.257	57.257
123.00	123.00	Pg2	57.257	57.257
123.00	123.00	Pg3	57.257	57.257
123.00	128.00	Pg4	52.496	52.496
123.00	128.00	Pg5	52.496	52.496
123.00	128.00	Pg6	0.000	55.000
123.00	128.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	331.764	331.764

N	Calculate		
3	120	123	

E. 23 Outflow Saat Pg6 atau Pg7 Preventive Maintenance inflow 120 m3/detik

Penambahan Flow di release Pada Larona Canal menambah beban Larona dan Balambano, dan air dilewatkan di Spillway Karembe		
Outflow Hasil Koreksi	Larona Canal	Outflow bypass
29.255	1	32.255
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	

F. Hasil Optimasi Strategi Pengaturan Air PLTA unit Preventive Maintenance

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
121.00	121.00	Pg1	0.000	60.000	60.000
121.00	121.00	Pg2	60.000	0.000	60.000
121.00	121.00	Pg3	70.000	70.000	0.000
121.00	126.00	Pg4	49.425	49.425	50.819
121.00	126.00	Pg5	49.425	49.425	50.819
121.00	126.00	Pg6	40.909	40.909	42.454
121.00	126.00	Pg7	40.909	40.909	42.454
		Total	310.668	310.668	306.546

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
122.00	122.00	Pg1	0.000	60.000	60.000
122.00	122.00	Pg2	60.000	0.000	60.000
122.00	122.00	Pg3	70.000	70.000	0.000
122.00	127.00	Pg4	50.203	50.203	51.597
122.00	127.00	Pg5	50.203	50.203	51.597
122.00	127.00	Pg6	41.554	41.554	43.098
122.00	127.00	Pg7	41.554	41.554	43.098
		Total	313.513	313.513	309.391

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
125.00	125.00	Pg1	0.000	60.000	60.000
125.00	125.00	Pg2	60.000	0.000	60.000
125.00	125.00	Pg3	70.000	70.000	0.000
125.00	130.00	Pg4	52.538	52.538	53.932
125.00	130.00	Pg5	52.538	52.538	53.932
125.00	130.00	Pg6	43.486	43.486	45.031
125.00	130.00	Pg7	43.486	43.486	45.031
		Total	322.049	322.049	317.927

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
121.00	121.000	Pg1	52.473	52.473
121.00	121.000	Pg2	52.473	52.473
121.00	121.000	Pg3	52.473	52.473
121.00	126.000	Pg4	0.000	60.000
121.00	126.000	Pg5	60.000	0.000
121.00	126.000	Pg6	44.396	44.396
121.00	126.000	Pg7	44.396	44.396
		Total	306.213	306.213

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
122.00	122.000	Pg1	53.691	53.691
122.00	122.000	Pg2	53.691	53.691
122.00	122.000	Pg3	53.691	53.691
122.00	127.000	Pg4	0.000	60.000
122.00	127.000	Pg5	60.000	0.000
122.00	127.000	Pg6	45.041	45.041
122.00	127.000	Pg7	45.041	45.041
		Total	311.154	311.154

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
123.00	123.000	Pg1	54.909	54.909
123.00	123.000	Pg2	54.909	54.909
123.00	123.000	Pg3	54.909	54.909
123.00	128.000	Pg4	0.000	60.000
123.00	128.000	Pg5	60.000	0.000
123.00	128.000	Pg6	45.685	45.685
123.00	128.000	Pg7	45.685	45.685
		Total	316.095	316.095

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
124.00	124.000	Pg1	56.126	56.126
124.00	124.000	Pg2	56.126	56.126
124.00	124.000	Pg3	56.126	56.126
124.00	129.000	Pg4	0.000	60.000
124.00	129.000	Pg5	60.000	0.000
124.00	129.000	Pg6	46.329	46.329
124.00	129.000	Pg7	46.329	46.329
		Total	321.037	321.037

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
125.00	125.000	Pg1	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg2	57.344	57.344
125.00	125.000	Pg3	57.344	57.344
125.00	130.000	Pg4	0.000	60.000
125.00	130.000	Pg5	60.000	0.000
125.00	130.000	Pg6	46.973	46.973
125.00	130.000	Pg7	46.973	46.973
		Total	325.978	325.978

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
121.00	121.00	Pg1	51.169	51.169
121.00	121.00	Pg2	51.169	51.169
121.00	121.00	Pg3	51.169	51.169
121.00	126.00	Pg4	50.940	50.940
121.00	126.00	Pg5	50.940	50.940
121.00	126.00	Pg6	0.000	55.000
121.00	126.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	310.387	310.387

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
122.00	122.00	Pg1	53.604	53.604
122.00	122.00	Pg2	53.604	53.604
122.00	122.00	Pg3	53.604	53.604
122.00	127.00	Pg4	51.718	51.718
122.00	127.00	Pg5	51.718	51.718
122.00	127.00	Pg6	0.000	55.000
122.00	127.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	319.249	319.249

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
123.00	123.00	Pg1	57.257	57.257
123.00	123.00	Pg2	57.257	57.257
123.00	123.00	Pg3	57.257	57.257
123.00	128.00	Pg4	52.496	52.496
123.00	128.00	Pg5	52.496	52.496
123.00	128.00	Pg6	0.000	55.000
123.00	128.00	Pg7	55.000	0.000
		Total	331.764	331.764

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
131.000	131.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
131.000	131.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
131.000	131.000	Pg3	70.000	70.000	0.000
131.000	136.000	Pg4	52.109	52.109	53.037
131.000	136.000	Pg5	52.109	52.109	53.037
131.000	136.000	Pg6	42.492	42.492	43.717
131.000	136.000	Pg7	42.492	42.492	43.717
		Total	319.202	319.202	313.509

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
132.000	132.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
132.000	132.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
132.000	132.000	Pg3	70.000	70.000	0.000
132.000	137.000	Pg4	52.887	52.887	53.816
132.000	137.000	Pg5	52.887	52.887	53.816
132.000	137.000	Pg6	43.136	43.136	44.361
132.000	137.000	Pg7	43.136	43.136	44.361
		Total	322.047	322.047	316.354

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
133.000	133.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
133.000	133.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
133.000	133.000	Pg3	70.000	70.000	0.000
133.000	138.000	Pg4	53.666	53.666	54.594
133.000	138.000	Pg5	53.666	53.666	54.594
133.000	138.000	Pg6	43.780	43.780	45.005
133.000	138.000	Pg7	43.780	43.780	45.005
		Total	324.892	324.892	319.199

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
134.000	134.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
134.000	134.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
134.000	134.000	Pg3	70.000	70.000	0.000
134.000	139.000	Pg4	54.444	54.444	55.373
134.000	139.000	Pg5	54.444	54.444	55.373
134.000	139.000	Pg6	44.424	44.424	45.650
134.000	139.000	Pg7	44.424	44.424	45.650
		Total	327.737	327.737	322.044

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
131.000	131.000	Pg1	51.927	51.927
131.000	131.000	Pg2	51.927	51.927
131.000	131.000	Pg3	51.927	51.927
131.000	136.000	Pg4	0.000	60.000
131.000	136.000	Pg5	60.000	0.000
131.000	136.000	Pg6	46.486	46.486
131.000	136.000	Pg7	46.486	46.486
		Total	308.75	308.75

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
133.000	133.000	Pg1	54.362	54.362
133.000	133.000	Pg2	54.362	54.362
133.000	133.000	Pg3	54.362	54.362
133.000	138.000	Pg4	0.000	60.000
133.000	138.000	Pg5	60.000	0.000
133.000	138.000	Pg6	47.774	47.774
133.000	138.000	Pg7	47.774	47.774
		Total	318.63	318.63

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
134.000	134.000	Pg1	55.580	55.580
134.000	134.000	Pg2	55.580	55.580
134.000	134.000	Pg3	55.580	55.580
134.000	139.000	Pg4	0.000	60.000
134.000	139.000	Pg5	60.000	0.000
134.000	139.000	Pg6	48.418	48.418
134.000	139.000	Pg7	48.418	48.418
		Total	323.58	323.58

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
131.000	131.000	Pg1	50.454	50.454
131.000	131.000	Pg2	50.454	50.454
131.000	131.000	Pg3	50.454	50.454
131.000	136.000	Pg4	53.720	53.720
131.000	136.000	Pg5	53.720	53.720
131.000	136.000	Pg6	0.000	55.000
131.000	136.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	313.802	313.802

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
132.000	132.000	Pg1	51.672	51.672
132.000	132.000	Pg2	51.672	51.672
132.000	132.000	Pg3	51.672	51.672
132.000	137.000	Pg4	54.498	54.498
132.000	137.000	Pg5	54.498	54.498
132.000	137.000	Pg6	0.000	55.000
132.000	137.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	319.011	319.011

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
133.000	133.000	Pg1	52.889	52.889
133.000	133.000	Pg2	52.889	52.889
133.000	133.000	Pg3	52.889	52.889
133.000	138.000	Pg4	55.276	55.276
133.000	138.000	Pg5	55.276	55.276
133.000	138.000	Pg6	0.000	55.000
133.000	138.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	324.221	324.221

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
141.000	141.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
141.000	141.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
141.000	141.000	Pg3	62.420	62.420	0.000
141.000	146.000	Pg4	55.911	55.911	55.911
141.000	146.000	Pg5	55.911	55.911	55.911
141.000	146.000	Pg6	45.592	45.592	45.592
141.000	146.000	Pg7	45.592	45.592	45.592
		Total	325.426	325.426	323.006

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
142.000	142.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
142.000	142.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
142.000	142.000	Pg3	62.420	62.420	0.000
142.000	147.000	Pg4	56.690	56.690	56.690
142.000	147.000	Pg5	56.690	56.690	56.690
142.000	147.000	Pg6	46.236	46.236	46.236
142.000	147.000	Pg7	46.236	46.236	46.236
		Total	328.271	328.271	325.851

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)
143.000	143.000	Pg1	0.000	60.000	60.000
143.000	143.000	Pg2	60.000	0.000	60.000
143.000	143.000	Pg3	62.420	62.420	0.000
143.000	148.000	Pg4	57.468	57.468	57.468
143.000	148.000	Pg5	57.468	57.468	57.468
143.000	148.000	Pg6	46.880	46.880	46.880
143.000	148.000	Pg7	46.880	46.880	46.880
		Total	331.116	331.116	328.696

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
141.000	141.000	Pg1	51.330	51.330
141.000	141.000	Pg2	51.330	51.330
141.000	141.000	Pg3	51.330	51.330
141.000	146.000	Pg4	0.000	60.000
141.000	146.000	Pg5	60.000	0.000
141.000	146.000	Pg6	48.572	48.572
141.000	146.000	Pg7	48.572	48.572
		Total	311.133	311.133

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
142.000	142.000	Pg1	52.547	52.547
142.000	142.000	Pg2	52.547	52.547
142.000	142.000	Pg3	52.547	52.547
142.000	147.000	Pg4	0.000	60.000
142.000	147.000	Pg5	60.000	0.000
142.000	147.000	Pg6	49.216	49.216
142.000	147.000	Pg7	49.216	49.216
		Total	316.074	316.074

Qin	Qout	PLTA	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
143.000	143.000	Pg1	53.765	53.765
143.000	143.000	Pg2	53.765	53.765
143.000	143.000	Pg3	53.765	53.765
143.000	148.000	Pg4	0.000	60.000
143.000	148.000	Pg5	60.000	0.000
143.000	148.000	Pg6	49.860	49.860
143.000	148.000	Pg7	49.860	49.860
		Total	321.015	321.015

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
141.000	141.000	Pg1	49.736	49.736
141.000	141.000	Pg2	49.736	49.736
141.000	141.000	Pg3	49.736	49.736
141.000	146.000	Pg4	56.584	56.584
141.000	146.000	Pg5	56.584	56.584
141.000	146.000	Pg6	0.000	55.000
141.000	146.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	317.376	317.376

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
142.000	142.000	Pg1	50.954	50.954
142.000	142.000	Pg2	50.954	50.954
142.000	142.000	Pg3	50.954	50.954
142.000	147.000	Pg4	57.363	57.363
142.000	147.000	Pg5	57.363	57.363
142.000	147.000	Pg6	0.000	55.000
142.000	147.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	322.586	322.586

Qin	Qout	PLTA	Pg6_Off	Pg7_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)
143.000	143.000	Pg1	52.171	52.171
143.000	143.000	Pg2	52.171	52.171
143.000	143.000	Pg3	52.171	52.171
143.000	148.000	Pg4	58.141	58.141
143.000	148.000	Pg5	58.141	58.141
143.000	148.000	Pg6	0.000	55.000
143.000	148.000	Pg7	55.000	0.000
		Total	327.795	327.795

Qin	Qout	PLTA	Pg1_Off	Pg2_Off	Pg3_Off	Pg4_Off	Pg5_Off
m3/sec	m3/sec		(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
135.000	135.000	Pg1	0.000	60.000	60.000	56.797	56.797
135.000	135.000	Pg2	60.000	0.000	60.000	56.797	56.797
135.000	135.000	Pg3	70.000	70.000	0.000	56.797	56.797
135.000	140.000	Pg4	55.223	55.223	56.151	0.000	60.000
135.000	140.000	Pg5	55.223	55.223	56.151	60.000	0.000
135.000	140.000	Pg6	45.069	45.069	46.294	49.063	49.063
135.000	140.000	Pg7	45.069	45.069	46.294	49.063	49.063
		Total	330.582	330.582	324.890	328.52	328.52

G. Istilah dan Definisi

1. Debit aliran, adalah volume air yang mengalir melalui penampang melintang sungai atau saluran dalam satuan waktu tertentu.
2. Kapasitas tampungan, adalah kemampuan suatu bendungan menampung sejumlah air sampai pada tinggi normal.
3. Tampungan efektif, adalah suatu wadah yang muka airnya terletak antara TMA normal dengan TMA minimum.
4. Tampungan mati, adalah suatu wadah atau tempat yang terletak dibawah TMA minimum. Wadah tersebut direncanakan sebagai kantong Lumpur.
5. Tinggi Muka Air (TMA), adalah tinggi muka air bendungan yang dapat diketahui dengan cara melihat pada alat ukur ketinggian yang terpasang pada tepi bendungan. TMA bendungan biasanya berkaitan/dihubungkan dengan volume atau luas permukaan bendungan atau danau.
6. Tinggi minimum, adalah elevasi muka air terendah dari suatu bendungan. Pada elevasi ini bendungan sudah tidak dapat dioperasikan lagi. Satuan yang umum dipakai adalah meter (m).
7. Tinggi normal, adalah elevasi muka air sampai elevasi mercu (m).
8. Volume bendungan, adalah sejumlah volume air yang tertampung dalam suatu bendungan pada TMA tertentu. Satuan yang dipergunakan biasanya dalam juta meter kubik (10^6 m^3).
9. Kurva TMA-luas permukaan bendungan, adalah garis lengkung yang menggambarkan hubungan antara TMA bendungan dengan luas permukaan bendungan.
10. Kurva TMA-volume tampungan, adalah garis lengkung yang menggambarkan hubungan antara TMA bendungan dengan volume bendungan.
11. Luas genangan, adalah luas permukaan air yang tergenang dalam suatu bendungan.
12. Tahun normal, adalah debit air masuk merupakan debit rata-rata dari data pengamatan yang terjadi, yang deviasinya berkisar antara nilai rata-rata+ σ

sampai $-y\sigma$ suatu ambang dimana nilai σ adalah standar deviasinya dan y adalah suatu besaran yang tergantung dari resiko dan tingkat akurasi yang diinginkan.

13. Tahun basah, adalah debit air masuk pada tahun basah dinyatakan dengan besarnya debit diatas nilai rata-rata ditambah dengan τ y.
14. Tahun kering, adalah debit air masuk pada tahun kering dinyatakan dengan besarnya debit dibawah nilai rata-rata dikurangi dengan τ