



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS
DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MENGGUNAKAN
QUADRATIC PROGRAMMING**

Rasyid Wahyu Wijaya
NRP 2213 106 031

Dosen Pembimbing
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***HYDRO-THERMAL COORDINATION BASED ON
DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW USING
QUADRATIC PROGRAMMING***

Rasyid Wahyu Wijaya
NRP 2213 106 031

Advisor

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Dr. Ir. Soedibyso, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS
DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MENGGUNAKAN
QUADRATIC PROGRAMMING**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

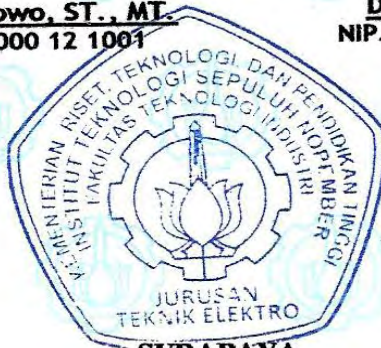


Dosen Pembimbing II,



Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001

Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 1955 12 07 1980 03 1004



**SURABAYA
JUNI 2016**

KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW* MENGUNAKAN *QUADRATIC PROGRAMMING*

Nama Mahasiswa : Rasyid Wahyu Wijaya
NRP : 2213106031
Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP : 195512071980031004

ABSTRAK

Untuk memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat, pembangkitan tenaga listrik direncanakan sesuai dengan kebutuhan tersebut. Sebagian besar bahan bakar yang digunakan pada pembangkit listrik di Indonesia adalah batubara, minyak dan gas. Semakin menurunnya jumlah energi fosil, mendorong pemerintah untuk meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pada pembangkit energi listrik. Pembangkit listrik hidro-termal merupakan salah satu alternatif dalam upaya penghematan bahan bakar yang tidak bisa diperbarui. Dengan mengkoordinasikan antara pembangkit hidro dan pembangkit termal diharapkan dapat mensuplay beban yang dinamis dengan memaksimalkan energi air dari pembangkit hidro dan meminimalkan bahan bakar pembangkit termal. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (*Dynamic Optimal Power Flow*) arus searah sebagai dasar pembuatan program. Program akan menentukan pembebanan unit hidro-termal yang tersambung sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis tiap waktu dengan memperhatikan *ramp rate* unit pembangkit dan aliran daya pada sistem transmisi. Selain itu dengan menggunakan *quadratic programming*, program akan membatasi sistem terhadap batasan (*equality constraint*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*). Simulasi dilakukan berbasis pada sistem IEEE 30 bus dengan menginisialisasikan pembangkit ke-6 sebagai unit hidro. Hasil dari simulasi dan analisa menunjukkan bahwa program mampu memenuhi semua batasan dan memaksimalkan penggunaan debit air dalam pembebanan selama 24 jam. Dengan penambahan unit hidro, biaya pembangkitan dapat ditekan.

Kata kunci : *Dynamic Optimal Power Flow* arus searah,
Koordinasi pembangkit Hidro-Termal,
Quadratic Programming, Biaya.

HYDRO-THERMAL COORDINATION BASED on DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW USING QUADRATIC PROGRAMMING

Nama Mahasiswa : Rasyid Wahyu Wijaya
NRP : 2213106031
Supervisor I : Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 197411292000121001
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP : 195512071980031004

ABSTRACT

To meet the demand for electricity continues to increase, the power generation is planned in accordance with those requirements. Most of the fuel used in power plants in Indonesia are coal, oil and gas. The decreasing amount of fossil energy, leads the government to develop the use of renewable energy as a source of energy in electrical energy generation. Hydro-thermal power plants is one of the alternatives in an effort to save unrennewable fuel. By coordinating between hydro and thermal units are expected to supply the dynamic load to maximize the water energy from hydro unit and minimize fuel of thermal generation. Based on dynamic optimal power flow analysis (Dynamic Optimal Power Flow) direct current to generate an approach. The approach will determine the hydro-thermal power generation which is connected to obtain economical generation cost each time consider to the ramp rate of generating units and power flow in the transmission system. The approach also considers equality and inequality constraints. The simulation was based on the IEEE 30 bus system that 6th unit as hydro unit. The results of simulation and analysis showed that the approach is able to fulfill all the constraints and maximize the use of water discharge in the load for 24 hours. Addition of hydro unit, the generation cost can be reduced.

Index terms : Dynamic Optimal Power Flow direct current,
Hydro-Thermal Coordination, Quadratic
Programing, Cost

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Permasalahan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
1.7 Relevansi.....	6
BAB 2 KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS <i>DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW</i> ARUS SEARAH.....	7
2.1 Sistem Pembangkitan.....	7
2.1.1 Karakteristik Pembangkit Termal	8
2.1.2 Karakteristik Pembangkit Hidro	9
2.1.3 Transmisi	11
2.1.4 Beban.....	11
2.2 Studi Aliran Daya.....	11
2.2.1 AC Power Flow	12
2.2.2 DC Power Flow	14
2.3 Optimasi Pembangkit.....	14
2.3.1 Optimal Power Flow.....	14
2.3.2 Optimal Power Flow Arus Searah.....	16
2.3.3 Dynamic Optimal Power Flow	18

2.4	<i>Ramp Rate</i>	18
2.5	<i>Quadratic Programming(QP)</i>	19
2.6	Koordinasi Pembangkit Hidro-Termal	20
BAB 3	KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS <i>DOPF</i> ARUS SEARAH MENGUNAKAN <i>QUADRATIC PROGRAMMING</i>	21
3.1	Algoritma	21
3.2	Quadratic Programming pada <i>MatPower</i>	23
3.3	Penerapan <i>QP</i> pada <i>DOPF</i> Arus Searah	24
3.3.1	<i>DOPF</i> Arus searah	24
3.3.2	<i>DOPF</i> Arus Searah Menggunakan <i>Quadratic Programming</i> pada Koordinasi Hidro-Termal	25
3.3.2.1	Pemodelan Matriks A	25
3.3.2.2	Pembentukan Vektor lb, ub	28
3.3.2.3	Pembentukan Matriks H	29
3.3.2.4	Pembentukan Vektor C	29
3.3.2.5	Pembentukan Vektor x, x_{\min} dan x_{\max}	29
3.3.2.6	Vektor x_0	30
BAB 4	SIMULASI DAN ANALISA	31
4.1	Simulasi dan Analisa Variabel	32
4.2	Validasi	33
4.2.1	Simulasi Pada Kondisi I	38
4.2.2	Simulasi Pada Kondisi II	42
4.2.3	Simulasi Pada Kondisi III	45
4.3	Total Biaya Sistem	48
BAB 5	PENUTUP	49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49
	DAFTAR PUSTAKA	xv
	RIWAYAT HIDUP	xvii
	LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva <i>input-output</i> pembangkit termal.....	8
Gambar 2.2	Kurva incremental pembangkit termal.....	9
Gambar 2.3	Karakteristik <i>input-output</i> pembangkit hidro.....	10
Gambar 2.4	Profil beban harian.....	11
Gambar 2.5	Diagram impedansi sistem 3 bus	12
Gambar 2.6	Diagram admitansi sistem 3 bus	12
Gambar 3.1	Algoritma pengerjaan Tugas Akhir	21
Gambar 3.2	Sistem 3 bus.....	26
Gambar 4.1	Profil beban yang digunakan	33
Gambar 4.2	Kurva pembebanan kondisi III	47
Gambar 4.3	Perbandingan total biaya sistem	48

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi I.....	33
Tabel 4.2	Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi I (lanjutan)	34
Tabel 4.3	<i>Ramp rate</i> pada kondisi 1	35
Tabel 4.4	<i>Ramp rate</i> pada kondisi 1 (lanjutan)	36
Tabel 4.5	Aliran daya pada kondisi I.....	36
Tabel 4.6	Aliran daya pada kondisi I (lanjutan)	37
Tabel 4.7	Daya yang dibangkitkan pada kondisi II	38
Tabel 4.8	Daya yang dibangkitkan pada kondisi II (lanjutan).....	39
Tabel 4.9	<i>Ramp rate</i> pada kondisi II	39
Tabel 4.10	<i>Ramp rate</i> pada kondisi II (lanjutan).....	40
Tabel 4.11	Aliran daya pada kondisi II	40
Tabel 4.12	Aliran daya pada kondisi II (lanjutan).....	41
Tabel 4.13	Daya yang dibangkitkan pada kondisi III.....	42
Tabel 4.14	Daya yang dibangkitkan pada kondisi III (lanjutan)	43
Tabel 4.15	Daya yang dibangkitkan unit hidro	43
Tabel 4.16	Daya yang dibangkitkan unit hidro (lanjutan).....	43
Tabel 4.17	<i>Ramp rate</i> pada kondisi III.....	44
Tabel 4.18	<i>Ramp rate</i> pada kondisi III (lanjutan)	45
Tabel 4.19	Aliran daya pada kondisi III.....	45
Tabel 4.20	Aliran daya pada kondisi III (lanjutan).....	46
Tabel 4.21	Total biaya sistem.....	48

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan energi primer yang dalam pengoperasiannya menggunakan suatu sistem untuk pembangkitan maupun penyalurannya. Permintaan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan kebijakan pemerintah dalam program pembangunan pembangkit listrik berkapasitas 35 GW selama periode 2015 hingga 2019. Berdasarkan Outlook Energi Indonesia tahun 2015, kebutuhan listrik Indonesia mengalami peningkatan yang cukup tinggi dengan laju pertumbuhan 8,4% per tahun. Berdasarkan hasil proyeksi kebutuhan listrik dari tahun 2003 s.d. 2020 yang dilakukan Dinas Perencanaan Sistem PT PLN (Persero) dan Tim Energi BPPT, terlihat bahwa selama kurun waktu tersebut, rata-rata kebutuhan listrik di Indonesia akan tumbuh sebesar 6,5% per tahun [1]. Sebagai akibat dari peningkatan permintaan energi listrik maka pemerintah harus mempertimbangkan energi yang tersedia sebagai bahan bakar pembangkitan. Dilihat dari segi pasokan bahan bakar, pembangkit berbahan bakar batubara dan gas mempunyai pangsa yang paling tinggi yaitu masing-masing sebesar 44% (20 GW) dan 26% (12 GW) kemudian diikuti dengan bahan bakar minyak sebesar 15% (6,8 GW). Masih tingginya pangsa pembangkit BBM diimbangi dengan makin meningkatnya pangsa pembangkit berbahan bakar energi terbarukan, seperti PLTP, dengan pangsa mendekati 3% (1,3 GW), serta PLTA dengan pangsa dikisaran 11% (5,1 GW). Disamping itu, pembangkit listrik EBT lainnya (PLTS, PLTB, PLTSa, PLTMH, PLTU Biomassa) juga sudah mulai banyak beroperasi dengan kapasitas total 148 MW [2].

Sebagai alternatif untuk menekan tingginya penggunaan bahan bakar fosil, maka pemerintah perlu mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan. Salah satu teknik pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi pembangkitan tenaga listrik ialah dengan mengkoordinasikan pembangkit listrik termal dan pembangkit listrik hidro. Pembangkit listrik hidro-termal adalah koordinasi pembangkit dengan mengatur pembebanan. Dimana pengoperasian unit hidro dilakukan semaksimal mungkin mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.

Penyediaan listrik harus memenuhi beban yang bersifat *continue* dan dinamis. Hal ini memerlukan manajemen operasi yang tertib agar didapatkan suatu pembebanan dan penyaluran yang optimal dan ekonomis. Digunakan analisa aliran daya optimal dinamis (*Dynamic Optimal Power Flow*) untuk melakukan pembagian pembebanan unit hidro-termal yang tersambung dengan sistem. Sehingga didapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis dengan memperhatikan batasan *ramp rate* unit pembangkit dan kapasitas saluran pada sistem transmisi [3]. *DOPF* merupakan perhitungan yang melibatkan studi aliran daya (*load flow*). Studi aliran daya meliputi sudut fasa tegangan masing masing bus lalu perhitungan magnitude dan aliran daya aktif maupun daya reaktif pada saluran [4]. Untuk studi aliran daya terbagi menjadi dua yaitu studi aliran daya arus searah dan studi aliran daya arus bolak balik. Dalam hal ini melakukan perhitungan aliran daya searah lebih cepat dibanding dengan perhitungan arus bolak balik [5][6].

Pada tugas akhir ini digunakan algoritma *quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan pembagian pembebanan dalam koordinasi pembangkit hidro-termal yang berbasis *DOPF*.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat program pembebanan ekonomis pembangkit hidro-termal berbasis *dynamic optimal power flow* arus searah dengan batasan kapasitas saluran, *ramp rate*
2. Mengetahui pembebanan ekonomis pembangkit hidro-termal menggunakan analisa *dynamic optimal power flow* arus searah dengan memperhitungkan batasan kapasitas saluran, *ramp rate*, dan batasan volume air pada unit hidro
3. Mengetahui pengaruh batasan batasan sistem terhadap daya terbangkit dan biaya pembangkitan.

1.3 Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan program pembebanan ekonomis pembangkit hidro-termal berbasis *dynamic optimal power flow* arus searah dengan batasan kapasitas saluran, *ramp rate*
2. Menentukan pembebanan ekonomis pembangkit hidro-termal menggunakan analisa *dynamic optimal power flow* arus searah dengan memperhitungkan batasan kapasitas saluran, *ramp rate*
3. Pengaruh batasan batasan sistem terhadap daya terbangkit dan biaya pembangkitan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Metode optimasi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah *quadratic programming* dan disimulasikan dengan *Matlab Matpower*
2. Studi aliran daya yang digunakan berupa aliran daya arus searah dengan hanya memperhatikan daya aktif
3. Beban dinamis selama 24 jam dengan selang waktu 1 jam.
4. Rugi-rugi pada jaringan diabaikan
5. Pembangkit mempunyai *ramp up* dan *ramp down* yang sama
6. Semua pembangkit diasumsikan selalu dalam keadaan beroperasi (unit hidro hanya dalam keadaan *discharge*)
7. Simulasi dilakukan dengan menginjeksikan daya *output* pada sistem IEEE 30 bus.

1.5 Metode Penelitian

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa berbasis *dynamic optimal power flow (DOPF)* arus searah dengan memperhatikan batasan *ramp rate* generator, batasan saluran. Dengan algoritma *quadratic programming* sebagai metode untuk menyelesaikan perhitungan *DOPF* arus searah. Data yang akan digunakan dalam simulasi ini meliputi debit air yang akan digunakan sebagai fungsi pembangkitan unit hidro, *cost function* generator, batasan daya yang dibangkitkan generator, *ramp rate*

dari masing-masing unit pembangkit, data saluran serta data beban yang dinamis selama 24 jam dengan selang waktu 1 jam.

Perhitungan optimal *DOPF* arus searah akan disimulasikan dalam program *M-file*. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperkuat pemahaman dan pengetahuan dasar mengenai permasalahan dan solusinya. Acuan dalam studi literatur ini meliputi referensi tugas akhir sebelumnya, jurnal ilmiah, dan buku. Dalam studi literatur ini akan dipelajari teori terkait dengan *DOPF* arus searah, koordinasi pembangkit hidrotermal, karakteristik pembangkit dan saluran beserta batasannya, dan penggunaan *Quadratic Programming* pada *Matlab Matpower* untuk perhitungan *DOPF* arus searah.

2. Pengumpulan data

Pemodelan didasarkan pada sistem IEEE 30 bus menjadi sebuah data untuk program koordinasi pembangkit hidrotermal. Data tersebut meliputi data debit air sebagai inisial pembangkitan unit hidro, data generator, data saluran, dan data beban. Data generator terdiri dari data *cost function*, kemampuan pembangkitan maksimum dan minimum generator, dan *ramp rate* per jam untuk masing masing generator. Data saluran terdiri dari data impedansi saluran dan kapasitas saluran. Data beban yaitu beban dinamis dalam rentang waktu 24 jam dengan interval waktu 1 jam.

3. Pembuatan program

Program dibuat dan disimulasikan menggunakan *MATLAB*. *MATLAB* dipilih karena dilengkapi dengan fungsi optimasi yang memudahkan dalam proses memodelkan sistem permasalahan optimasi dan menyelesaikan dalam bentuk program. *Script MatPower 5.0b1* digunakan untuk

memudahkan simulasi *DOPF* arus searah dengan *quadratic programming*.

4. Simulasi dan analisa

Simulasi dilakukan untuk mengetahui kinerja program dalam memenuhi batasan yang telah ditentukan. Simulasi dijalankan dalam 3 kondisi berbeda. Kondisi pertama menjalankan program *DOPF* arus searah dengan *quadratic programming* tanpa batasan *ramp rate* dan skema *charge-discharge* pada unit hidro. Kondisi kedua menambahkan *ramp rate* generator sebagai batasan. Kondisi ketiga menambahkan skema *charge-discharge* pada unit hidro sebagai injeksi daya pada sistem berdasarkan waktu yang ditentukan. Ketiga kondisi tersebut akan dianalisa untuk mengetahui pengaruh dari batasan batasan yang ada terhadap pembangkitan daya dan biaya total pembangkitan, serta analisa sistem yang paling optimal dan ekonomis.

5. Penulisan buku

Analisa dari permasalahan akan ditulis secara bertahap. Hasil analisa yang dilakukan dilaporkan dalam bentuk buku tugas akhir, kemudian akan dirangkum dalam bentuk jurnal ilmiah.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan buku tugas akhir disusun dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari penelitian.

Bab 2 : KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW* ARUS SEARAH

- Bab ini berisi mengenai dasar teori yang merupakan penjelasan mengenai sistem koordinasi pembangkit hidro-termal, *dynamic direct current optimal power flow*, dan sistem kelistrikan secara umum.
- Bab 3 : KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW* ARUS SEARAH MENGGUNAKAN *QUADRATIC PROGRAMMING*
Bab ini merupakan penjelasan mengenai penerapan *DOPF* arus searah dengan menggunakan *quadratic programming* pada sistem koordinasi pembangkit hidro-termal dengan batasan yang telah ditentukan.
- Bab 4 : SIMULASI DAN ANALISA
Bab ini berisi hasil simulasi dan analisa *DOPF* arus searah dengan memperhitungkan batasan batasan sistem dan penerapan batasan unit hidro menggunakan *quadratic programming* .
- Bab 5 : PENUTUP
Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil simulasi dan analisa serta saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi sebagai berikut:

1. Memberikan paparan perhitungan pertimbangan dalam menentukan titik koordinasi pembangkit hidro-termal
2. Menjadi landasan pengembangan energi baru dan terbarukan
3. Mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) di bidang optimasi pembangkitan tenaga listrik
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil tugas akhir dengan permasalahan serupa.

BAB 2

KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW* ARUS SEARAH

2.1 Sistem Pembangkitan

Secara umum sistem pembangkitan merupakan kumpulan dari unit pembangkit tenaga listrik yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti turbin dan generator. Pembangkit tenaga listrik digunakan untuk membangkitkan daya listrik yang kemudian didistribusikan kepada konsumen. Di dalam sebuah sistem pembangkit, beberapa generator dioperasikan secara paralel dan dihubungkan dengan bus dalam suatu sistem tenaga listrik guna menyediakan total daya yang diperlukan [4].

Pembangkit tenaga listrik dapat dibedakan menjadi beberapa jenis sesuai dengan bahan bakar yang digunakan. Salah satu diantaranya adalah pembangkit listrik tenaga panas atau termal. Pembangkit tipe ini merupakan pembangkit listrik yang mayoritas digunakan untuk memenuhi beban harian atau *base load*.

Setiap pembangkit memiliki karakteristik unit pembangkit masing-masing. Karakteristik unit pembangkit meliputi karakteristik *input-output* pembangkit, dan karakteristik *incremental rate* [5]. Karakteristik tersebut diperoleh dari data-data seperti: desain generator; pabrik pembuat generator; data historis pengoperasian generator; maupun data percobaan. Karakteristik unit pembangkit digunakan dalam perhitungan biaya pembangkitan dari tiap unit pembangkit sehingga dapat dicapai nilai ekonomis atau nilai optimum.

Karakteristik *input-output* dari pembangkit termal merupakan hubungan antara *input* berupa bahan bakar yang digunakan dengan *output* berupa daya yang dibangkitkan tiap pembangkit. *Input* bahan bakar dinyatakan dalam bentuk MBtu/h atau konsumsi energi sedangkan *output* daya dinyatakan dalam bentuk MW atau daya yang dibangkitkan.

Karakteristik *incremental rate* pembangkit termal merupakan hubungan antara perubahan daya pembangkitan yang dihasilkan dengan konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan. *Incremental rate* biasanya dinyatakan dengan satuan Btu/kWh.

Sedangkan pada pembangkit hidro karakteristik *input-output* adalah hubungan antara laju penggunaan air terhadap daya yang

dibangkitkan dalam hitungan waktu. *Input* sebagai energi pembangkit hidro dinyatakan dalam debit air rata-rata ($m^3/detik$).

Karakteristik *incremental water rate* pembangkit hidro merupakan laju pertambahan pemakaian air terhadap daya yang dibangkitkan.

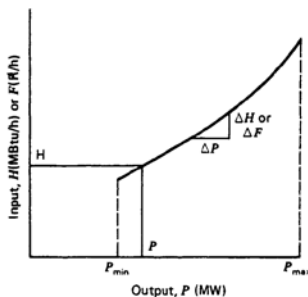
2.1.1 Karakteristik Pembangkit Termal

Ada banyak parameter dalam analisis pengaturan operasi sistem tenaga. Salah satunya pada pembangkit termal terdapat karakteristik *input-output*. Untuk menggambarkan karakteristik *input-output*, *input* merepresentasikan sebagai masukan total yang diukur dalam satuan biaya/jam dan *output* merupakan daya keluaran listrik yang disediakan oleh sistem pembangkit tenaga listrik. Dalam menggambarkan karakteristik unit turbin uap, akan menggunakan *termionologi* (2.1) dan (2.2) sebagai berikut:

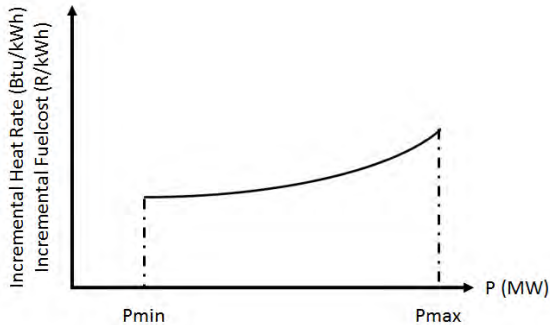
$$H = \frac{Mbtu}{jam} \quad (2.1)$$

$$F = \frac{R}{jam} \quad (2.2)$$

H dapat dinyatakan sebagai energi panas yang dibutuhkan tiap jam dan F dinyatakan sebagai biaya tiap jam. Ada kalanya R/jam biaya operasional suatu unit terdiri dari biaya operasional dan biaya pemeliharaan. Biaya karyawan akan dimasukkan sebagai bagian dari biaya operasi jika biaya ini dapat digambarkan secara langsung sebagai fungsi dari *output* unit. *Output* dari unit pembangkit dinyatakan dengan P dalam Megawatt. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2



Gambar 2.1 Kurva *input-output* pembangkit termal[5]



Gambar 2.2 Kurva incremental pembangkit termal[5]

Karakteristik *input-output* dari unit pembangkit termal yang ideal, digambarkan sebagai kurva nonlinear yang kontinyu. Data karakteristik input output diperoleh dari perhitungan desain atau. Pembangkit termal mempunyai batas operasi *minimum* (P_{min}) dan *maximum* (P_{max}). Batasan beban minimum biasanya disebabkan oleh kestabilan pembakaran dan masalah desain generator. Pada umumnya unit pembangkit thermal tidak dapat beroperasi dibawah 30% dari kapasitas desain.

Selanjutnya akan dibahas lebih lanjut tentang pemodelan karakteristik *input-output* maupun karakteristik *incremental rate*. Ada dua macam pendekatan dalam memodelkan karakteristik-karakteristik tersebut. Yang paling umum ditemui adalah pemodelan dengan fungsi polinomial. Namun disamping itu tidak jarang juga kita temui bentuk fungsi *piecewise*.

2.1.2 Karakteristik Pembangkit Hidro

Karakteristik *input-output* dari pembangkit listrik tenaga hidro merupakan hubungan antara jumlah air yang dialirkan untuk memutar turbin pada generator untuk menghasilkan daya dengan persamaan waktu. *Output* dari pembangkit listrik hidro adalah daya yang dikirim keluar yaitu *net output* generator dikurangi dengan daya untuk pemakaian sendiri seperti untuk pompa, pengisian baterai dan peralatan penunjang lainnya.

Daya *output* generator sebagai fungsi dari air tinggi air terjun dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_i = 9,8Q_i \cdot h \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (2.3)$$

Dimana:

P_i = output pembangkit (MW)

Q_i = debit air rata-rata (m^3/detik)

h = tinggi air (m)

η_T = efisiensi turbin

η_G = efisiensi generator

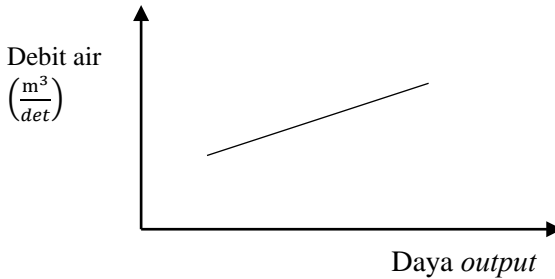
Suatu bentuk alternatif dari persamaan diatas dapat diperoleh dengan mendefinisikan variable efisiensi baru G sebagai berikut:

$$G = 9,8 \cdot \eta_T \cdot \eta \quad (2.4)$$

Sehingga menghasilkan persamaan

$$P_i G = Q \cdot h \quad (2.5)$$

Untuk ketinggian air yang konstan dapat digambarkan dengan karakteristik kurva seperti berikut:



Gambar 2.3 Karakteristik *input-output* pembangkit hidro

Oleh karena tinggi dari air terjun dianggap konstan maka, besar debit air sebagai fungsi daya output pembangkit akan didekati dengan persamaan polinomial orde dua yaitu:

$$Q_i = \alpha_i + \beta_i P_{hi} + \gamma_i P_{hi}^2 \quad (2.6)$$

Dimana:

Q_i = debit air rata-rata (m^3/detik)

P_{hi} = *output* pembangkit hidro (MW)

$\alpha_i, P_{hi}, \gamma_i$ = konstanta

Persamaan laju pertambahan pemakaian air (*incremental Water Rate*) diperoleh dari turunan persamaan *input-output*, yaitu:

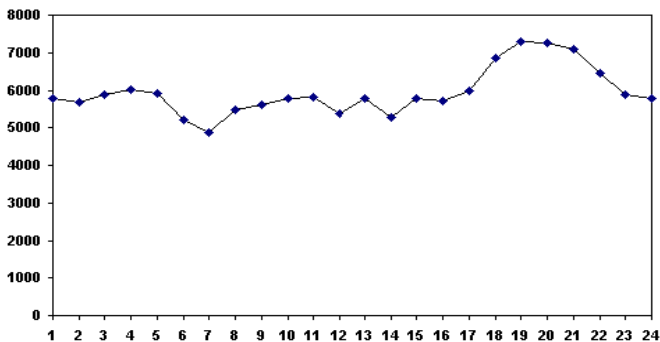
$$IWR = \beta_i + \gamma_i P_{hi} \quad (2.7)$$

2.1.3 Transmisi

Transmisi bertujuan menyalurkan energi listrik dari unit pembangkit menuju sistem distribusi untuk menyuplai beban [4]. Tegangan dari unit pembangkit akan dinaikkan terlebih dahulu sebelum masuk ke jaringan transmisi. Kemudian akan diturunkan kembali ketika masuk ke saluran distribusi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *loses*. Pada tugas akhir ini rugi – rugi pada jaringan transmisi diabaikan.

2.1.4 Beban

Dalam sistem tenaga listrik beban dikategorikan menjadi beberapa kategori yaitu industri, komersial, dan residensial. Kategori tersebut memiliki perbedaan besarnya kebutuhan dan juga perbedaan waktu permintaan listrik. Sehingga beban yang berubah – ubah dalam kurun waktu 24 jam akan membentuk sebuah profil beban harian seperti pada gambar berikut



Gambar 2.4 Profil beban harian

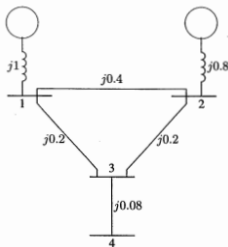
2.2 Studi Aliran Daya

Dalam perencanaan suatu sistem yang ekonomis studi aliran daya merupakan unsur yang sangat penting sebagai acuan. Adapun beberapa metode untuk menghitung aliran daya antara lain *Newton Rhapson*, *Gaus-Seidel*, dan metode *Fast Decouple*. Studi aliran daya bertujuan untuk mengetahui besarnya tegangan dan sudut phase pada setiap bus serta aliran daya pada tiap saluran [4,5]. Pada sistem tenaga terdapat tiga jenis bus, yaitu:

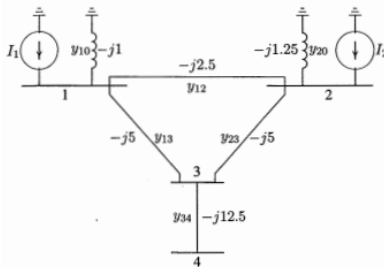
- *Swing* atau *slack bus*
 Nilai tegangan (V) dan sudut tegangan (Θ) adalah 0, dan nilainya tetap. *Swing bus* dijadikan sebagai referensi. Besaran yang dapat dihitung adalah daya aktif dan daya reaktif.
- *Generator bus (PV Bus)*
 Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan nilai tegangan generator (V). Dapat disebut juga dengan *voltage controlled bus* karena nilai tegangan pada bus ini nilainya konstan. Besaran yang dihitung yaitu daya reaktif (Q) dan sudut tegangan (Θ).
- *Load bus (PQ Bus)*
 Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). *Load bus* merupakan bus yang tidak terhubung dengan generator. Besaran yang dihitung yaitu nilai tegangan (V) dan sudut tegangan (Θ).

2.2.1 AC Power Flow [4,5]

Perhitungan *power flow* sistem 3 bus menggunakan matriks admitansi bus sebagai berikut:



Gambar 2.5 Diagram impedansi sistem 3 bus



Gambar 2.6 Diagram admitansi sistem 3 bus

Jaringan transmisi memiliki data impedansi dan admitansi tiap salurannya. Sebagai contoh yaitu jaringan AC dengan diagram impedansi dan admitansi pada gambar 2.5 dan 2.6. Dengan mengaplikasikan hukum KCL pada setiap node, didapatkan:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \\
 I_2 &= -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{13})V_2 - y_{13}V_3 \\
 0 &= -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\
 0 &= -y_{34}V_3 + y_{34}V_4
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Dengan admitansi

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= y_{10} + y_{12} + y_{13} \\
 Y_{22} &= y_{20} + y_{12} + y_{23} \\
 Y_{33} &= y_{13} + y_{23} + y_{34} \\
 Y_{44} &= y_{34} \\
 Y_{12} &= Y_{21} = -y_{12} \\
 Y_{13} &= Y_{31} = -y_{13} \\
 Y_{23} &= Y_{32} = -y_{23} \\
 Y_{34} &= Y_{43} = -y_{34}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Sehingga persamaan KCL pada setiap node dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\
 I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\
 I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \\
 I_4 &= Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Dengan mengasumsikan bus sistem sebanyak n , persamaan diatas dapat dibentuk dalam matriks

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \tag{2.12}$$

2.2.2 DC Power Flow

Dalam tugas akhir ini untuk lebih menyederhanakan perhitungan aliran daya, perhitungan daya reaktif dan magnitud tegangan dapat diabaikan. Sehingga perhitungan menjadi perhitungan aliran daya linear non-iterasi. Pada perhitungan aliran daya arus searah, magnitud tegangan diasumsikan bernilai 1.0 pu. Persamaan menjadi:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.3 Optimasi Pembangkit

Kebutuhan beban pada sistem harus dipenuhi oleh unit unit pembangkit yang ada. Permasalahan optimasi pada sistem tenaga yaitu mengenai total biaya minimal untuk membangkitkan permintaan beban. *Unit commitment* merupakan perhitungan optimal penjadwalan pembangkit untuk menentukan unit mana saja yang beroperasi dan tidak beroperasi untuk memenuhi permintaan beban [5]. *Economic dispatch* merupakan perhitungan optimal pembagian pembangkit untuk menentukan besarnya pembangkitan masing masing unit untuk memenuhi permintaan beban. Perhitungan menggunakan *economic dispatch (ED)* dilakukan tanpa memperhitungkan batasan aliran daya dan batasan sistem. Untuk optimasi pembagian pembangkit dengan memperhitungkan batasan batasan tersebut, maka dikembangkan metode *optimal power flow*. [7,8]

2.3.1 Optimal Power Flow

Optimal power flow (OPF) menggabungkan perhitungan *ED* dengan perhitungan aliran daya. Hasil dari perhitungan *OPF* yaitu berupa pembagian pembangkitan yang juga memperhitungkan aliran daya dengan total biaya minimal [5]. *OPF* memiliki peranan penting pada sistem operasi untuk perencanaan jangka panjang maupun penjadwalan harian [8].

Terdapat beberapa teknik optimasi untuk perhitungan *OPF*, antara lain metode Newton, Non-Linear Programming (NLP), quadratic programming, linear programming, dan metode dekomposisi. Namun metode metode tersebut hanya dapat mencapai nilai *local minima* dan gagal mencapai nilai *global minima*. Algoritma revolusioner kemudian digunakan untuk menyelesaikan *OPF*, seperti *differential evolution*, *modified differential evolution*, *tabu search*, *evolutionary programming*,

improved EP, ant colony optimization, simulated annealing, genetic algorithm, dan lain lain [9].

Terdapat variabel variabel pada batasan perhitungan *OPF* untuk mencari nilai optimal, yaitu daya aktif generator, tegangan atau daya reaktif generator, rasio tap transformator untuk menentukan sudut tegangan dan pergeseran fasa, dan *start-up* darurat serta pelepasan beban untuk kondisi tertentu. Variabel variabel ini disebut dengan variabel kontrol [8].

Fungsi objektif dari *OPF* yaitu mengenai total biaya minimal sistem. Operasi sistem yang optimal dari segi biaya dapat diperhitungkan dengan meminimalkan biaya produksi, dalam hal ini berkaitan dengan biaya bahan bakar, yang juga berkaitan dengan besarnya pembangkitan oleh masing masing pembangkit.

Perhitungan pada *OPF* mencakup:

- Fungsi objektif berupa total biaya pembangkitan (satuan mata uang/jam)
- *Inequality constraint* generator
- Pada setiap bus berlaku daya pada saluran merupakan pengurangan antara daya pembangkitan dengan beban.

Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

Fungsi objektif:

$$\min \sum_{i=1}^{N_{bus}} F_i(P_i) \quad (2.14)$$

Indeks nomor bus ditunjukkan oleh i , dan $F_i(P_i)$ merupakan fungsi biaya generator.

Inequality constraint generator:

$$P_{gen_i}^{min} \leq P_{gen_i} \leq P_{gen_i}^{max} \quad (2.15)$$

$$Q_{gen_i}^{min} \leq Q_{gen_i} \leq Q_{gen_i}^{max} \quad (2.16)$$

Untuk i dari 1 hingga sejumlah n bus

Aliran daya pada bus i :

$$P_{net_i} + Q_{net_i} = V_i \left(\sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_{ik} \right) \quad (2.17)$$

P_{net} dan Q_{net} adalah daya aktif dan daya reaktif saluran pada bus i . dapat juga dituliskan sebagai:

$$(P_{gen_i} - P_{load_i}) + j(Q_{gen_i} - Q_{load_i}) = V_i(\sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik}V_{ik}) \quad (2.18)$$

Dengan daya aktif saluran dan daya reaktif saluran dijabarkan sebagai berikut:

$$(P_{gen_i} - P_{load_i}) - Real\{V_i(\sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik}V_{ik})\} = 0 \quad (2.19)$$

$$(Q_{gen_i} - Q_{load_i}) - Imag\{V_i(\sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik}V_{ik})\} = 0 \quad (2.20)$$

Untuk perhitungan yang lebih mendekati keadaan *real* sistem, persamaan OPF dapat ditambahkan dengan batasan batasan lain, misalnya *inequality constraint* kapasitas saluran, *inequality constraint* tegangan pada bus, dan sebagainya.

Aliran daya arus searah dapat digunakan untuk mempermudah perhitungan OPF dengan batasan saluran. Hasil perhitungan OPF menggunakan aliran daya arus searah atau DCOPF memberikan hasil mendekati hasil perhitungan OPF menggunakan aliran daya arus bolak balik atau ACOPF, dan lebih cepat dari segi waktu perhitungan [5].

2.3.2 Optimal Power Flow Arus Searah

Menggunakan aliran daya arus searah didapatkan:

$$100[B_x]\theta = P_{gen} - P_{load} \quad (2.21)$$

Dengan B_x merupakan matriks $n_{bus} \times n_{bus}$ reaktansi saluran dalam satuan per unit, sudut tegangan merupakan matriks baris sejumlah n bus dalam satuan radian, $P_{gen} - P_{load}$ merupakan matriks baris sejumlah n bus dalam satuan MW, dan diasumsikan MVA base sistem 100 MVA. Dengan fungsi Lagrangian, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{i=1}^{N_{bus}} F_i(P_i) + \lambda^T (100[B_x]\theta - (P_{gen} - P_{load})) \\ & + \lambda_{N_{bus}+1} (\theta_{refbus} - 0) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Inequality constraints generator juga dapat ditambahkan pada persamaan sehingga fungsi Lagrangian DCOPT adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} F_i(P_i) + \lambda^T (100[B_x]\theta - (P_{gen} - P_{load})) + \lambda_{N_{bus}+1}(\theta_{refbus} - 0) + \mu^T [g(P_{gen}, P_{gen}^{min}, P_{gen}^{min})] \quad (2.23)$$

Dengan λ^T , $[B_x]$, θ , $(P_{gen} - P_{load})$ adalah sebagai berikut:

$$\lambda^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_n] \quad (2.24)$$

$$[B_x] = \begin{bmatrix} B_{x11} & \dots & B_{x1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{xn1} & \dots & B_{xnn} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$(P_{gen} - P_{load}) = \begin{bmatrix} P_{gen_1} - P_{load_1} \\ \vdots \\ P_{gen_n} - P_{load_n} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Indeks n merupakan jumlah bus pada sistem. Sehingga fungsi Lagrangian dapat dijabarkan sebagai:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) + \lambda_1 (100B_{x11}\theta_1 + \dots + 100B_{x1n}\theta_n - P_{gen_1} + P_{load_1}) + \dots + \lambda_n (100B_{xn1}\theta_1 + \dots + 100B_{xnn}\theta_n - P_{gen_n} + P_{load_n}) \quad (2.28)$$

Fungsi Lagrangian kemudian diselesaikan dengan turunan diferensial fungsi terhadap masing masing independen variabel pada persamaan. Independen variabel pada persamaan yaitu:

- P_1, \dots, P_n
 n merupakan indeks bus, sejumlah banyaknya bus yang terhubung dengan generator.
- $\theta_1, \dots, \theta_n$

- n merupakan indeks bus, sejumlah banyaknya bus pada sistem.
- $\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1}$
 n merupakan indeks bus, sejumlah banyaknya bus pada sistem. Jika terdapat m *inequality constraints* maka variabel bertambah sebanyak $\lambda_1, \dots, \lambda_m$.

Setelah didiferensialkan, maka didapatkan persamaan baru sejumlah independen variabel, yang kemudian disusun dan diselesaikan dengan matriks. Sehingga didapatkan nilai nilai variabel yang merupakan nilai optimal sistem.

2.3.3 Dynamic Optimal Power Flow

Pada kondisi real, beban sistem berubah ubah secara dinamis selama 24 jam. Pada penelitian ini diasumsikan beban berubah dengan selang waktu 1 jam. Dengan beban yang dinamis, penyelesaian *OPF* disebut juga dengan *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)*.

Untuk menyelesaikan permasalahan *DOPF*, perlu diperhatikan pula mengenai *ramp rate* pembangkit dan batasan lainnya. *Ramp rate* merupakan batasan kenaikan atau penurunan nilai pembangkitan pada generator. Hal ini untuk menjaga gradien temperatur dan tekanan generator dalam batasan aman sehingga mencegah kerusakan dan menjaga masa hidup generator [9].

Selain batasan generator, batasan saluran, batasan cadangan berputar, dengan adanya *ramp rate* maka batasan pada sistem akan bertambah.

2.4 Ramp Rate

Permintaan konsumsi listrik terus berubah, membuat variasi dan ketidakpastian karakteristik yang melekat pada sistem listrik. Akan tetapi generator sebagai penghasil listrik memiliki batasan tersendiri untuk menghasilkan daya yang optimal sesuai dengan perubahan beban. Dalam hal ini *ramp-rate* perlu diperhatikan sebagai batasan baru pembangkitan setiap unit generator.

Ramp-rate merupakan kemampuan generator untuk melakukan peningkatan (*up-rate*) atau penurunan (*down-rate*) generasi. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga membutuhkan fungsi tertentu untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Fungsi *ramp-rate* dapat dilihat dalam persamaan:

$$Pi(t - 1) - Pi(t) \leq DRi \quad (2.29)$$

$$Pi(t) - Pi(t - 1) \leq URi \quad (2.30)$$

Sehingga jika persamaan (2.29) dan (2.30) digabungkan akan mendapatkan batasan baru, yaitu:

$$Pi(t - 1) - DRi \leq Pi(t) \leq URi + Pi(t - 1) \quad (2.31)$$

Nilai dari batasan *ramp-rate* tersebut tetap harus memenuhi batasan pembebanan ekonomis dinamis pada tugas Akhir ini. Sehingga didapatkan syarat baru untuk perhitungan optimasi pada beban periode berikutnya.

Jika batasan *minimum ramp-rate* memiliki nilai yang didapatkan pada persamaan (2.32) maka akan didapatkan solusi (2.33).

$$Pi(t - 1) - DRi < Pi \text{ min} \quad (2.32)$$

$$Pi(t - 1) - DRi = Pi \text{ min} \quad (2.33)$$

Jika batasan *maximum ramp-rate* memiliki nilai yang didapatkan pada persamaan (2.34) maka akan didapatkan solusi (2.35)

$$URi + Pi(t - 1) > Pi \text{ max} \quad (2.34)$$

$$URi + Pi(t - 1) = Pi \text{ max} \quad (2.35)$$

2.5 **Quadratic Programming**

Salah satu metode perhitungan optimasi yaitu *quadratic programming*. *Quadratic programming* menyelesaikan permasalahan optimasi dengan fungsi objektif berupa persamaan kuadrat dan batasan batasan linear. Batasan linear dapat berupa persamaan atau *equality constraints* atau berupa *inequality constraints* [11]. Persamaan umum *quadratic programming* dapat dituliskan sebagai berikut:

Fungsi objektif :

$$F(x) = f + g^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad (2.36)$$

Inequality constraint:

$$lb \leq Ax \leq ub \quad (2.37)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.38)$$

Equality constraints:

$$lb = ub = b_{eq} \quad (2.39)$$

$$Ax = b_{eq} \quad (2.40)$$

Hasil perhitungan *quadratic programming* yaitu menentukan nilai x yang menghasilkan fungsi objektif dengan nilai minimum.

2.6 Koordinasi Pembangkit hidro-termal

Dengan berbasis pada DOPF arus searah maka akan didapatkan pembebanan pada unit termal dan hidro dalam interval waktu 24 jam. Pada unit hidro dimaksimalkan dengan membangkitkan daya sejumlah dengan debit air yang ada. Sehingga pembebanan pada unit termal akan ditekan. Dengan persamaan pembangkitan hidro sebagai berikut:

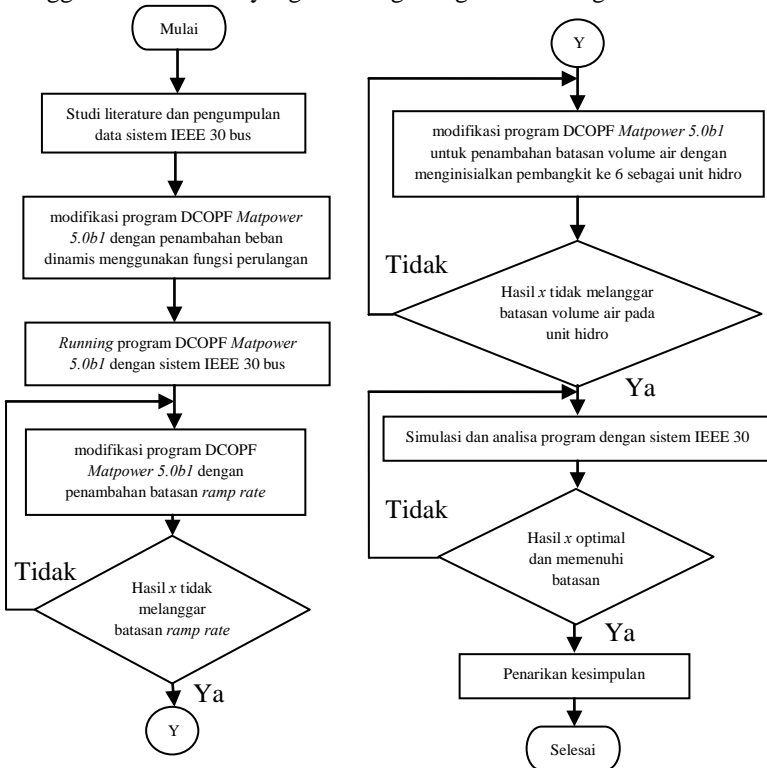
$$\sum_{i=1}^N Ph_i = Q \quad (2.41)$$

BAB 3

KOORDINASI PEMBANGKIT HIDRO-TERMAL BERBASIS *DOPF* MENGGUNAKAN *QUADRATIC PROGRAMMING*

3.1 Algoritma

Pada tugas akhir ini koordinasi pembangkit hidro-termal berbasis *DOPF* arus searah ini diselesaikan dengan metode *quadratic programming*. Metode dan sistem kelistrikan dimodelkan dengan *Matpower* dalam bentuk *m file* pada *MATLAB*. Simulasi dilakukan menggunakan variabel yang ada dengan algoritma sebagai berikut:



Gambar 3.1 Algoritma Pengerjaan Tugas Akhir

Langkah awal dalam mengerjakan tugas akhir ini dengan melakukan studi literatur mengenai sistem kelistrikan, *DOPF* arus searah, metode perhitungan dan *constraint* dari permasalahan. Berdasarkan studi literatur dilakukan pemodelan menggunakan case *m-file* IEEE 9 bus terlebih dahulu. Pemodelan tersebut bertujuan untuk mengoptimasi variabel kontrol berdasarkan batasan yang sudah ditetapkan. Pembuatan program *DOPF* arus searah dilakukan dengan beberapa tahap untuk melihat pengaruh batasan permasalahan pada sistem.

Tahap pertama yaitu menerapkan metode perhitungan *quadratic programming* pada *DOPF* arus searah. Dilakukan Validasi dengan memeriksa total daya pembangkitan generator dan total daya beban. Program bekerja benar jika total daya yang dibangkitkan oleh seluruh unit generator adalah sama dengan total daya beban. Apabila sesuai, dilanjutkan dengan tahap berikutnya.

Tahap kedua yaitu *DOPF* arus searah dengan mempertimbangkan batasan kapasitas saluran. Dilakukan validasi dengan memeriksa daya pada saluran. Program bekerja benar jika daya yang mengalir pada saluran tidak melampaui batas kapasitas saluran. Apabila masih dalam batas, kemudian menyusun program dengan batasan selanjutnya.

Tahap ketiga yaitu *DOPF* arus searah dengan mempertimbangkan batasan *ramp rate* pembangkit. Dilakukan validasi dengan memeriksa kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan. Program bekerja benar jika kenaikan dan penurunan daya pembangkitan tidak melampaui batasan *ramp rate* setiap satu jam pada seluruh unit. Apabila masih dalam batas, kemudian menyusun program dengan batasan selanjutnya.

Tahap terakhir yaitu menambahkan fungsi objektif pembangkitan hidro sebagai batasan unit hidro. Dilakukan validasi dengan memeriksa total daya terbangkit pada unit hidro. Program bekerja benar apabila total daya yang dibangkitkan unit hidro adalah sama dengan dilakukan dengan volume atau debit air.

Selanjutnya yaitu mengimplementasikan program pada sistem IEEE 30 bus. Hasil keluaran program pada sistem IEEE 30 bus untuk kemudian dianalisa. Setelah dilakukan analisa, maka didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini.

3.2 **Quadratic Programming pada Matpower**

Quadratic programming merupakan metode menyelesaikan permasalahan optimasi fungsi kuadrat pada *Matlab*. Dalam *Matpower* pemanggilan fungsi *quadratic programming* dilakukan menggunakan *qps_matpower*.

Sintaks input pada *qps_matpower* adalah sebagai berikut:

- A
Merupakan matriks yang menyatakan koefisien linear dari *equality constraint* dan *inequality constraint*.
- H
Merupakan matriks yang menyatakan bentuk kuadratik dari fungsi objektif.
- c
merupakan vektor yang menyatakan bentuk linear dari fungsi objektif
- l
merupakan vektor yang menyatakan batas atas dari persamaan *inequality constraint* dan *equality constraints*.
- u
merupakan vektor yang menyatakan batas bawah dari persamaan *inequality constraint* dan *equality constraints*.

Sintaks diatas merupakan input pada *qps_matpower* yang digunakan sebagai perintah untuk memanggil program sebagai berikut:

- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u)$
Meminimalkan vektor x terhadap *inequality* dan *equality constraint* $l \leq A*x \leq u$, H dan c merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.
- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u, \text{xmin}, \text{xmax})$
Meminimalkan vektor x terhadap *inequality* dan *equality constraint* $l \leq A*x \leq u$ dan terdapat batasan nilai x maksimal dan x minimal. H dan c merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.
- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u, \text{xmin}, \text{xmax}, x0)$
Menyelesaikan permasalahan *quadratic programming* dengan inialisasi nilai awal $x0$ untuk mempercepat proses pencarian.

3.3 Penerapan *Quadratic Programming* pada *DOPF* Arus Searah

Penerapan *quadratic programming* dilakukan dengan inisialisasi permasalahan *DOPF* arus searah. Inisialisasi terdiri dari dua komponen utama yaitu fungsi objektif dan *constraints*.

3.3.1. *DOPF* arus searah

Fungsi objektif :

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N F_i^t \right) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N k \Delta P_{Li}^t \quad (3.1)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (3.2)$$

Keterangan

- T : Jumlah rentang waktu beban
- N : Jumlah bus
- P_L : Daya pada *load bus*
- k : Konstanta yang menyatakan biaya pelepasan beban
- P_G : Daya pembangkitan generator
- $F_i(P_i)$: Fungsi biaya generator pada bus i .

Fungsi objektif berupa fungsi biaya unit pembangkit dan fungsi pembangkitan unit hidro.

Batasan sistem :

- *Equality Constraints*
- Active Power Balance*

$$P_{Li}^t - P_{Gi}^t + P_{INi}^t = 0 \quad (3.3)$$

$$P_{IN}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\delta_i - \delta_j] \quad (3.4)$$

Keterangan

- P_{IN} : Daya yang mengalir pada saluran dari bus i ke bus j ,
- δ : Sudut tegangan
- x : Reaktansi saluran

- *Inequality Constraints*

Ramp Rate

$$-\delta_i \leq P_{Gi}^{t+1} - P_{Gi}^t \leq \delta_i \quad (3.5)$$

Kapasitas Saluran Transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij} \quad (3.6)$$

Daya Pembangkitan

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (3.7)$$

Hidro *constraint*

$$\sum_{i=1}^N Ph_{Gi} = Q \quad (3.8)$$

3.3.2. *DOPF* Arus Searah Menggunakan *Quadratic Programming* pada Koordinasi Hidro-Termal

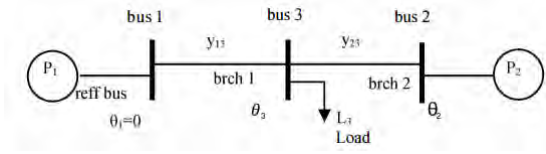
Berdasarkan inialisasi *DOPF* arus searah serta persamaan pada *quadratic programming*, maka *DOPF* arus searah pada koordinasi pembangkit hidro-thermal dapat diselesaikan dengan tahap sebagai berikut.

3.3.2.1. *Pemodelan Matriks A*

Matriks A merupakan koefisien orde satu variabel kontrol dari batasan permasalahan. Pada *quadratic programming*, persamaan 2.38 dimodelkan dalam matriks. Pada *DOPF* arus searah, matriks A terbentuk dari *equality constraint* (A_{eq}) dan *inequality constraint* (A_{ineq}). Untuk memudahkan penyusunan matriks, batasan yang tidak berubah terhadap waktu seperti *active power balance* dan kapasitas saluran disusun terlebih dahulu. *Constraint* yang berubah terhadap waktu seperti ramp rate disusun setelahnya.

$$A = \begin{bmatrix} A_{eq} \\ A_{ineq} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sebagai contoh, dapat digunakan sistem sederhana 3 bus seperti pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Sistem 3 bus

❖ A_{eq}

Persamaan *active power balance* sebagai A_{eq} dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} 0 - P_{G1}^1 + (y_{11}\theta_1 - y_{13}\theta_3)^1 &= 0 \\ 0 - P_{G2}^1 + (y_{22}\theta_2 - y_{23}\theta_3)^1 &= 0 \\ 0 - (-y_{13}\theta_1 - y_{23}\theta_2 + y_{33}\theta_3)^1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Matriks A_{eq} dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 \\ 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1 \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

nb
ng

Secara berurutan nb dan ng merupakan jumlah saluran dan jumlah pembangkit

❖ A_{ineq}

Inequality constraint batasan saluran dapat dijabarkan menjadi persamaan *from bus to branch* dan *to bus from branch*.

- *from bus to branch i*

$$P_{to\ branch\ 1} = y_{13}\theta_1 - y_{13}\theta_3 \quad (3.13)$$

$$P_{to\ branch\ 2} = y_{23}\theta_2 - y_{23}\theta_3 \quad (3.14)$$

- *to bus from branch i*

$$P_{from\ branch\ 1} = y_{13}\theta_3 - y_{13}\theta_1 \quad (3.15)$$

$$P_{from\ branch\ 2} = y_{23}\theta_3 - y_{23}\theta_2 \quad (3.16)$$

Matriks $A_{ineq\ branch}$ dituliskan sebagai:

$$A_{ineq\ branch} = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0 \\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0 \\ -y_{13} & 0 & y_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -y_{23} & y_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

nb
ng

Inequality constraint ramp rate diabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$-\delta_1 \leq P_{G1}^2 - P_{G1}^1 \leq \delta_1 \quad (3.18)$$

$$-\delta_2 \leq P_{G2}^2 - P_{G2}^1 \leq \delta_2 \quad (3.19)$$

Persamaan 3.18 dan 3.19 dapat dimasukkan pada matriks ng baris pada waktu t dan $t+1$ sebagai berikut:

$$RR = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Jam ke t
Jam ke $t+1$

Equality constraint untuk unit hidro per satu jam dijabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$15(P_H) + 300 = Q \quad (3.21)$$

$$15P_H = 300 \quad (3.22)$$

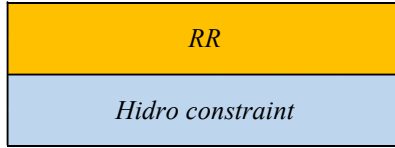
Sehingga, untuk sistem selama dua jam dapat dituliskan pada matriks:

$$hidro = \underbrace{[0 \ 0 \ 0 \ 0]}_{\text{jam ke-1 nb}} \underbrace{[15 \ 0 \ 0 \ 0]}_{\text{ng ke-2 nb}} \underbrace{[0 \ 0 \ 0 \ 15]}_{\text{ng}} \quad (3.23)$$

Dalam hal ini pembangkit ke-2 adalah unit hidro.

Matriks A selama dua jam secara utuh dapat dituliskan sebagai:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline A_{eq}^1 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline A_{ineq\ branch}^1 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline A_{eq}^2 \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline A_{ineq\ branch}^2 \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \end{array}$$



3.3.2.2. Pembentukan Vektor lb , ub

Vektor lb dan ub merupakan batasan yang membatasi hasil dari kali dari matriks A dengan (x) sesuai persamaan 2.38. Vektor lb dan ub mempunyai panjang seperti panjang matriks A .

$$lb = \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ 0^1 \\ -inf \\ -inf \\ -inf \\ -inf \\ 0^2 \\ \vdots \\ -inf \\ \delta_1^{12} \\ \delta_2^{12} \\ Qtot \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} b_{eq} \text{ power balance jam 1} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ kapasitas saluran jam 1} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} b_{eq}, b_{ineq} \text{ power balance dan} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{kapasitas saluran jam 2} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ ramp rate jam 1-2} \\ \left. \begin{array}{l} \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ Volume air yang harus di} \end{array} \quad (3.24)$$

$$ub = \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ 0^1 \\ P_{13}^1 \max \\ P_{23}^1 \max \\ P_{31}^1 \max \\ P_{32}^1 \max \\ 0^2 \\ \vdots \\ P_{32}^2 \max \\ \delta_1^{12} \\ \delta_2^{12} \\ Qtot \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} b_{eq} \text{ power balance jam 1} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ kapasitas saluran} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} b_{eq}, b_{ineq} \text{ power balance dan} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{kapasitas saluran jam 2} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ ramp rate jam 1-2} \\ \left. \begin{array}{l} \end{array} \right\} b_{ineq} \text{ Volume air yang harus di} \end{array} \quad (3.25)$$

3.3.2.3. Pembentukan Matriks H

Matriks H merupakan koefisien orde dua variabel kontrol dari fungsi objektif. Berdasarkan persamaan fungsi objektif *quadratic programming* 2.37, matriks H dikalikan dengan x^T dan x (variabel kontrol), maka besarnya matriks H adalah matriks simetris $n \times n$, dengan n sejumlah variabel kontrol. Matriks H dengan periode 1 jam pada sistem 3 bus seperti diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_1^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_2^1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

nb
ng

Untuk matriks H dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks H saat $t+1$ disusun secara diagonal dibawah matriks H saat t jam.

3.3.2.4. Pembentukan Matriks C

Matriks C merupakan koefisien linear orde satu variabel kontrol dari fungsi objektif (b_{it}). Matriks C^T dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{11} \\ b_{21}^1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Untuk matriks C dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks C saat $t+1$ disusun secara vertikal dibawah matriks C saat t jam.

3.3.2.5. Pembentukan Vektor x , x_{min} dan x_{max}

Vektor x merupakan nilai yang akan dioptimasi yang harus memenuhi batasan yang sudah ditentukan. Vektor x_{min} dan x_{max} merupakan batas atas dan batas bawah dari variabel kontrol. Dengan persamaan *quadratic programming* 2.39, maka x_{min} dan x_{max} untuk satu jam dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \theta_1^1 \min \\ \theta_2^1 \min \\ \theta_2^1 \min \\ P_{G1}^1 \min \\ P_{G2}^1 \min \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_2^1 \\ P_{G1}^1 \\ P_{G2}^1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{nb} \\ \\ \\ \text{ng} \end{array} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^1 \max \\ \theta_2^1 \max \\ \theta_2^1 \max \\ P_{G1}^1 \max \\ P_{G2}^1 \max \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Untuk vektor x_{min} dan x_{max} dengan periode lebih dari satu jam, maka vektor x_{min} dan x_{max} saat $t+1$ disusun secara vertikal dibawah vektor x_{min} dan x_{max} saat t jam.

3.3.2.6. Vektor x_0

Vektor x_0 merupakan nilai variabel optimasi awal yang dapat di ubah – ubah sesuai inisiasi pemrogram. x_0 merupakan vektor dengan jumlah baris sesuai dengan matriks x .

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Simulasi dan Analisa Variabel

Berdasarkan program yang telah disusun dilakukan analisa dari variabel yang didapatkan. Program dibentuk dalam *m file*, sedangkan data yang akan diolah dimodelkan dalam bentuk *case file*. Berikut adalah tahapan analisa dari variabel yang didapatkan :

1. Menjalankan program
Sebelum menjalankan program, terlebih dahulu menentukan *case file* dalam Matpower. *Case file* berisikan data-data yang diperlukan meliputi data bus, saluran, kapasitas pembangkit, *ramp rate* pembangkit, dan fungsi biaya pembangkitan. Selanjutnya adalah menjalankan program untuk dilihat variabel yang didapat dalam *command window*.
2. Analisa variabel
Berdasarkan batasan dan metode yang digunakan didapatkan variabel (A, H, C). Variabel tersebut dimodelkan dalam bentuk matriks. Dalam hal ini penambahan variabel *ramp rate* dan *hidro constraint* disusun pada matriks A . Analisa variabel ditentukan untuk memeriksa penyusunan matriks. Karena hasil perhitungan dari variabel yang dioptimasi (x) dipengaruhi oleh penyusunan matriks A . Apabila dalam penyusunan tidak sesuai maka dilakukan evaluasi terhadap program.
3. Analisa matriks l dan u
Matriks l dan u merupakan matriks yang menyatakan batas bawah dan batas atas dari variabel matriks A untuk mendapatkan variabel optimasi (x) sesuai dengan persamaan (2.59). matriks l dan u beturut-turut terbentuk oleh batasan beban aktif yang diminta (P_{Li}), kapasitas daya antar saluran antar bus (P_{ij}), *ramp rate* tiap pembangkit (δ), dan batas volume air yang harus dihabiskan untuk pembangkitan unit hidro (Q). Nilai (P_{Li}), (P_{ij}), dan (δ), didapatkan dari *case file* sedangkan untuk batasan volume air dimasukkan manual pada program.
4. Analisa hasil variabel optimasi (x)
Variabel optimasi (x) dimodelkan dalam matriks yang berturut-turut tersusun oleh sudut tegangan tiap bus (θ_i) dan daya aktif

yang dibangkitkan tiap unit (P_{Gi}). Untuk sudut tegangan setiap bus (θ_i) tidak terdapat batasan yg tertentu ($inf \leq \theta \leq inf$). sedangkan (P_{Gi}) dibatasi oleh daya aktif minimal dan maksimal yang dibangkitkan dari tiap unit generator. Total aya yang dibangkitkan oleh pembangkit pada jam tertentu dibatasi oleh (P_{Li}). untuk batasan sudut tegangan ($inf \leq \theta \leq inf$) dituliskan manual dalam program. Sedangkan batasan (P_{Gi}) didapatkan dari data pada *case file* pada *Matpower*.

5. Analisa *ramp rate* dan Unit Hidro

Analisa *ramp rate* dilakukan dengan memeriksa hasil matriks *ramp rate* yang telah ditambahkan pada matriks A. Matriks *ramp rate* dibuat diperiksa dengan acuan persamaan *ramp rate*. Sedangkan analisa untuk unit hidro dilakukan untuk memeriksa apakah volume air unit hidro sama dengan total debit air yang digunakan pada setiap jam-nya.

Pada simulasi ini dilakukan dalam 3 kondisi untuk mengetahui validasi program dalam memenuhi batasan yang sudah ditetapkan. Kondisi tersebut adalah sebagai berikut :

1. Kondisi I

DOPF arus searah tanpa batasan *ramp rate* (δ) pembangkit dan batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

2. Kondisi II

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* (δ) tanpa batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

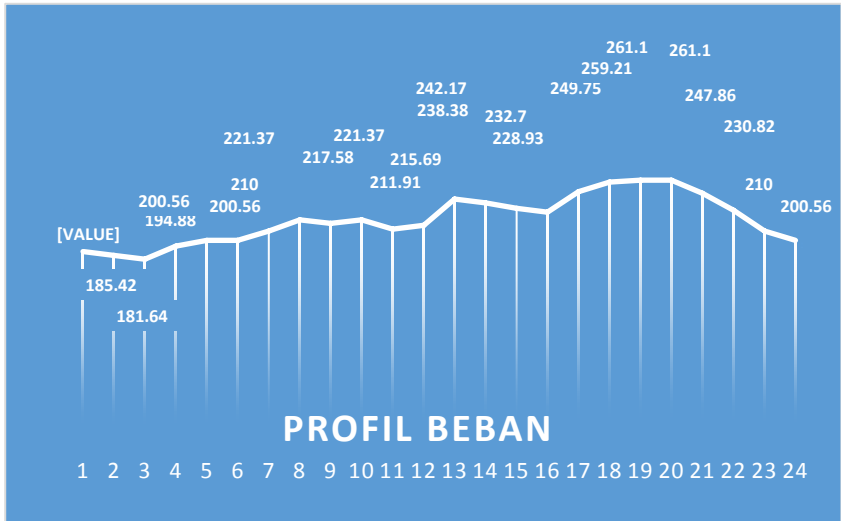
3. Kondisi III

DOPF arus searah dengan batasan *ramp rate* (δ) dan batasan volume air pada unit hidro yang harus dihabiskan.

4.2 Validasi

Validasi dilakukan terhadap program menggunakan *case file* IEEE 30 bus, yang terdiri oleh 6 pembangkit dan 30 saluran. Pembangkit ke-6 pada *case file* tersebut diinisialkan sebagai pembangkit hidro. Data beserta ilustrasi single line diagram terdapat pada lampiran.

Pada simulasi sistem yang dinamis, beban berubah ubah setiap interval waktu 1 jam selama 24 jam. Berbasis pada *case file* IEEE 30 bus mengikuti profil beban harian, beban terbesar berada pada jam 19.00 dengan 261.1 MW. Sedangkan beban terendah terdapat pada jam 03.00 dengan 181.64 MW. Berikut adalah profil beban yang dibuat :



Gambar 4.1 Profil beban yang digunakan

Total beban selama 24 jam adalah 5312.75 MW.

4.2.1 Simulasi Pada Kondisi I

Kondisi I menjalankan simulasi *DOPF* arus searah tanpa mempertimbangkan batasan *ramp rate* dan volume air pada unit hidro. Berikut adalah daya aktif yang dibangkitkan oleh tiap unit selama 24 jam :

Tabel 4.1 Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi I

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1	44.73	58.26	15.78	22.31	15.78	32.33
2	44.14	57.59	15.32	22.13	15.32	30.92
3	43.56	56.92	14.85	21.94	14.85	29.52
4	45.61	59.27	16.49	22.59	16.49	34.43
5	46.49	60.27	17.19	22.88	17.19	36.54
6	46.49	60.27	17.19	22.88	17.19	36.54

Tabel 4.2 Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi I (lanjutan)

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
7	47.95	61.94	18.36	23.34	18.36	40.05
8	49.71	63.95	19.77	23.91	19.77	44.26
9	49.12	63.28	19.3	23.72	19.3	42.86
10	49.71	63.95	19.77	23.91	19.77	44.26
11	48.24	62.28	18.6	23.44	18.6	40.75
12	48.83	62.95	19.06	23.63	19.06	42.16
13	53.88	68.71	23.7	25.63	24.28	45.97
14	53.11	67.83	22.97	25.31	23.45	45.71
15	51.96	66.52	21.88	24.83	22.19	45.32
16	51.2	65.65	21.16	24.51	21.35	45.06
17	55.41	70.46	25.15	26.27	25.96	46.5
18	46.68	60.1	39.85	32.74	27.93	51.91
19	43.84	56.71	46.03	32.12	29.06	53.34
20	43.84	56.71	46.03	32.12	29.06	53.34
21	55.03	70.02	24.79	26.11	25.54	46.37
22	51.58	66.09	21.52	24.67	21.77	45.19
23	47.95	61.94	18.36	23.34	18.36	40.05
24	46.49	60.27	17.19	22.88	17.19	36.54
Total	1165.55	1501.94	540.31	597.21	497.82	1009.92
	5312.75					

Dari hasil simulasi diatas dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan tiap unit tidak melebihi kapasitas maksimal dari setiap unit pembangkit. Hal ini membuktikan bahwa hasil simulasi memenuhi ($P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max}$). Selain itu, hasil tersebut juga membuktikan bahwa total pembangkitan daya aktif sama dengan beban daya aktif sesuai persamaan *power balance*. Namun hasil tersebut tidak memenuhi batasan *ramp rate* tiap pembangkit yang sebesar $-5 \text{ MW} \leq \bar{\delta} \leq 5 \text{ MW}$.

Rampe rate merupakan selisih daya yang dibangkitkan oleh satu unit pembangkit dalam interval waktu 1 jam. Dengan waktu yg dimaksud (t) dengan waktu berikutnya ($t + 1$). Batasan *ramp rate* merupakan batasan yang dibuat berkaitan dengan keandalan dan keamanan fisik dari pembangkit. Pembangkit yang membangkitkan daya melebihi batasan *ramp rate* akan mengakibatkan keausan dan penurunan umur pembangkit.

Tabel 4.3 *Ramp rate* pada kondisi I

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1	2	0.59	0.67	0.46	0.18	0.46	1.41
2	3	0.58	0.67	0.47	0.19	0.47	1.4
3	4	-2.05	-2.35	-1.64	-0.65	-1.64	-4.91
4	5	-0.88	-1	-0.7	-0.29	-0.7	-2.11
5	6	0	0	0	0	0	0
6	7	-1.46	-1.67	-1.17	-0.46	-1.17	-3.51
7	8	-1.76	-2.01	-1.41	-0.57	-1.41	-4.21
8	9	0.59	0.67	0.47	0.19	0.47	1.4
9	10	-0.59	-0.67	-0.47	-0.19	-0.47	-1.4
10	11	1.47	1.67	1.17	0.47	1.17	3.51
11	12	-0.59	-0.67	-0.46	-0.19	-0.46	-1.41
12	13	-5.05	-5.76	-4.64	-2	-5.22	-3.81
13	14	0.77	0.88	0.73	0.32	0.83	0.26
14	15	1.15	1.31	1.09	0.48	1.26	0.39
15	16	0.76	0.87	0.72	0.32	0.84	0.26
16	17	-4.21	-4.81	-3.99	-1.76	-4.61	-1.44
17	18	8.73	10.36	-14.7	-6.47	-1.97	-5.41
18	19	2.84	3.39	-6.18	0.62	-1.13	-1.43
19	20	0	0	0	0	0	0
20	21	-11.19	-13.31	21.24	6.01	3.52	6.97

Tabel 4.4 Ramp rate pada kondisi I (lanjutan)

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
21	22	3.45	3.93	3.27	1.44	3.77	1.18
22	23	3.63	4.15	3.16	1.33	3.41	5.14
23	24	1.46	1.67	1.17	0.46	1.17	3.51

Berdasarkan dari tabel *ramp rate* pada kondisi I diketahui bahwa seluruh unit pembangkit melanggar batasan *ramp rate*. Pelanggaran *ramp rate* tertinggi terjadi oleh unit 3 pada $t=20$ sebesar 21.24 MW. Hal ini terjadi karena kenaikan dan penurunan beban yang signifikan.

Lain hal dengan batasan *ramp rate* yang terlanggar, dari hasil simulasi didapatkan daya yang mengalir pada saluran transmisi memenuhi dari kapasitas saluran. Berikut adalah aliran daya dengan sampel waktu tertentu:

Tabel 4.5 Aliran daya pada kondisi I

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	Daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
1	1	2	130	23.1667	27	25
2	1	3	130	21.5789	24.2105	18.8421
3	2	4	65	20.4706	22.5882	15.9412
4	3	4	130	19.25	21.5	15.75
5	2	5	130	28.45	31.85	25.8
6	2	6	65	23.8889	26.3889	20.3333
7	4	6	90	20.5	22.75	23.75
8	5	7	70	15.3333	17.4167	15.4167
9	6	7	130	7.5	10.25	16
10	6	8	32	24.25	28.75	32
11	6	9	65	9.14286	10.2381	4
12	6	10	32	5.23214	5.85714	2.28571
13	9	11	65	0	0	0
14	9	10	65	9.18182	10.2727	4

Tabel 4.6 Aliran daya pada kondisi I (lanjutan)

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	Daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
15	4	12	65	11.7692	11.8077	2.96154
16	12	13	65	15.7857	21.1429	46.0714
17	12	14	32	4.61538	5.38462	6.5
18	12	15	32	6.76923	7.46154	9.84615
19	12	16	32	5	6.65	11.25
20	14	15	16	1.6	2.15	2.05
21	16	17	16	1.52632	2.42105	6.47368
22	15	18	16	6.72727	8.72727	12.4545
23	18	19	16	3.53846	4.92308	8
24	19	20	32	5.85714	6.57143	5
25	10	20	32	8.19048	9.28571	8.14286
26	10	17	32	7.5	8.375	6
27	10	21	32	2.85714	3.71429	7.85714
28	10	22	32	4.06667	5.06667	7.93333
29	21	22	32	20.5	25	32
30	15	23	16	9.8	13.4	16
31	22	24	16	2.22222	5.33333	7.77778
32	23	24	16	2.81481	4.11111	8.62963
33	24	25	16	8.15152	11.7576	11.1818
34	25	26	16	3.5	4.23684	4.84211
35	25	27	16	11.619	16	16
36	28	27	65	7.7	13.325	19.4
37	27	29	16	6.04762	7.30952	8.33333
38	27	30	16	6.96667	8.41667	9.61667
39	29	30	16	3.64444	4.4	5.04444
40	8	28	32	5.5	7.5	9.4
41	6	28	32	2.16667	5.83333	10

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa program telah memenuhi batas kapasitas saluran. Dimana aliran daya mencapai batas maksimal pada kapasitas saluran terdapat pada saluran ke-30 jam ke-19 dan saluran ke-35 jam ke-16,19. Perbedaan daya yang mengalir pada saluran bergantung pada beban disetiap bus. Selain itu daya yang mengalir pada saluran menyesuaikan dengan jumlah beban yang ada untuk memenuhi batasan *power balance*.

4.2.2 Simulasi Pada Kondisi II

Pada kondisi II simulasi dijalankan dengan menambahkan program batasan *ramp rate*. Pada kondisi II ini merupakan perbandingan dengan kondisi I untuk mengetahui program berjalan dengan benar. Simulasi ini menggunakan batasan *ramp rate* sebesar $-5 \leq \bar{g} \leq 5$ MW dengan profil beban yang sama dengan kondisi I. Berikut adalah daya yang dibangkitkan oleh setiap unit pada kondisi II :

Tabel 4.7 Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi II

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1	44.73	58.26	15.78	22.31	15.78	32.33
2	44.14	57.59	15.32	22.13	15.32	30.92
3	43.56	56.92	14.85	21.94	14.85	29.52
4	45.61	59.27	16.49	22.6	16.49	34.43
5	46.49	60.27	17.19	22.88	17.19	36.54
6	46.49	60.27	17.19	22.88	17.19	36.54
7	47.95	61.94	18.36	23.34	18.36	40.05
8	49.12	63.28	19.3	23.72	19.3	42.86
9	49.71	63.95	19.77	23.91	19.77	44.26
10	49.71	63.95	19.77	23.91	19.77	44.26
11	48.24	62.28	18.6	23.44	18.6	40.75
12	48.88	63.36	18.93	23.57	19.24	41.71
13	53.88	68.36	23.92	25.73	24.24	46.04

Tabel 4.8 Daya yang dibangkitkan setiap unit pada kondisi II (lanjutan)

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
14	53.11	67.83	22.97	25.31	23.45	45.71
15	50.82	65.22	26.02	24.33	20.86	45.47
16	49.05	63.21	31.02	23.7	19.24	42.71
17	51.12	65.11	36.02	26.46	23.38	47.64
18	46.31	60.11	41.02	31.46	28.38	51.91
19	44.09	56.46	46.02	32.12	29.06	53.34
20	44.37	56.18	46.02	32.12	29.06	53.34
21	46.74	60.56	41.02	27.12	24.06	48.34
22	47.61	61.56	36.02	23.24	19.06	43.34
23	44.6	58.11	31.02	22.27	15.68	38.34
24	44.76	58.3	26.02	22.32	15.81	33.34
Total	1141.09	1472.35	618.64	592.81	484.14	1003.69
	5312.72					

Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa dengan profil beban yang sama, total daya yang dibangkitkan tidak ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi I. Berikut adalah nilai *ramp rate* tiap unit pembangkit dengan interval waktu 1 jam pada kondisi II:

Tabel 4.9 *Ramp rate* pada kondisi II

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
1	2	0.59	0.67	0.46	0.18	0.46	1.41
2	3	0.58	0.67	0.47	0.19	0.47	1.4
3	4	-2.05	-2.35	-1.64	-0.66	-1.64	-4.91
4	5	-0.88	-1	-0.7	-0.28	-0.7	-2.11
5	6	0	0	0	0	0	0
6	7	-1.46	-1.67	-1.17	-0.46	-1.17	-3.51
7	8	-1.17	-1.34	-0.94	-0.38	-0.94	-2.81
8	9	-0.59	-0.67	-0.47	-0.19	-0.47	-1.4

Tabel 4.10 Ramp rate pada kondisi II (lanjutan)

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit 6
9	10	0	0	0	0	0	0
10	11	1.47	1.67	1.17	0.47	1.17	3.51
11	12	-0.64	-1.08	-0.33	-0.13	-0.64	-0.96
12	13	-5	-5	-4.99	-2.16	-5	-4.33
13	14	0.77	0.53	0.95	0.42	0.79	0.33
14	15	2.29	2.61	-3.05	0.98	2.59	0.24
15	16	1.77	2.01	-5	0.63	1.62	2.76
16	17	-2.07	-1.9	-5	-2.76	-4.14	-4.93
17	18	4.81	5	-5	-5	-5	-4.27
18	19	2.22	3.65	-5	-0.66	-0.68	-1.43
19	20	-0.28	0.28	0	0	0	0
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5

Dari tabel diatas diketahui bahwa program mampu membatasi kenaikan maupun penurunan daya yang dibangkitkan dalam $-5 \leq \delta \leq 5$ MW.

Sedangkan daya yang mengalir pada saluran dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.11 Aliran daya pada kondisi II

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
1	1	2	130	23.167	26.167	25.167
2	1	3	130	21.579	22.842	18.895
3	2	4	65	20.471	21	15.941
4	3	4	130	19.25	20	15.75
5	2	5	130	15.3	16.9	15.45
6	2	6	65	23.889	25.278	20.333
7	4	6	90	20.5	24.5	23.75
8	5	7	70	15.333	16.833	15.417

Tabel 4.12 Aliran daya pada kondisi II (anjutan)

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
9	6	7	130	7.5	10.625	16
10	6	8	32	24.25	29	32
11	6	9	65	9.1429	9.3333	4
12	6	10	32	5.2321	5.3393	2.2857
13	9	11	65	0	0	0
14	9	10	65	9.1818	9.3636	4
15	4	12	65	11.769	7.5	2.9615
16	12	13	65	15.786	31	46.071
17	12	14	32	4.6154	6.1538	6.5
18	12	15	32	6.7692	10.231	9.8462
19	12	16	32	5	8.55	11.3
20	14	15	16	1.6	1.35	2.05
21	16	17	16	1.5263	4.3684	6.4211
22	15	18	16	6.7273	9.5909	12.455
23	18	19	16	3.5385	5.7692	8
24	19	20	32	5.8571	5.8571	5
25	10	20	32	8.1905	8.381	8.1429
26	10	17	32	7.5	6.5	6
27	10	21	32	2.8571	2.8571	7.7143
28	10	22	32	4.0667	4.5333	7.8667
29	21	22	32	0.0082	24	32
30	15	23	16	9.8	10.65	16
31	22	24	16	2.2222	4.7778	7.8333
32	23	24	16	2.8148	4.7407	8.6296
33	24	25	16	8.1515	10.606	11.182
34	25	26	16	3.5	4.2368	4.8421
35	25	27	16	11.619	14.81	8.4
36	28	27	65	7.7	12.15	19.4
37	27	29	16	6.0476	7.3095	8.3571
38	27	30	16	6.9667	8.4167	9.6167
39	29	30	16	3.6444	4.4	5.0222
40	8	28	32	5.5	7.3	9.4
41	6	28	32	2.1667	5	10

Berdasarkan tabel aliran daya program masih berjalan dengan baik. Karena daya yang mengalir masih berada dalam batas saluran. Daya mengalir pada kapasitas saluran maksimal terdapat pada saluran ke-30, jam ke-19. Dari 3 variabel yang di analisa daya yang dibangkitkan, *ramp rate*, kapasitas saluran program mampu mendapatkan hasil yang diinginkan.

4.2.3 Simulasi Pada Kondisi III

Simulasi pada kondisi III merupakan simulasi terakhir dr program dengan menambahkan batasan pada unit hidro. Batasan tersebut berupa volume air yang harus dihabiskan unit hidro selama 24 jam. Dalam hal ini pembangkit ke-6 pada case IEEE 30 bus di inisialisasi sebagai unit hidro dengan menganggap *cost function* = 0. Berikut adalah daya yang di bangkitkan pada kondisi ke III :

Tabel 4.13 Daya yang dibangkitkan pada kondisi III

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	Unit hidro
1	50.59	64.96	20.47	24.19	20.47	8.53
2	50	64.29	20	24	20	7.13
3	49.41	63.62	19.53	23.81	19.53	5.73
4	51.47	65.96	21.17	24.47	21.17	10.64
5	52.34	66.96	21.87	24.75	21.87	12.75
6	52.34	66.96	21.87	24.75	21.87	12.75
7	53.81	68.64	23.05	25.22	23.05	16.26
8	54.98	69.98	23.98	25.59	23.98	19.07
9	55.56	70.64	24.45	25.78	24.45	20.47
10	55.56	70.64	24.45	25.78	24.45	20.47
11	52.4	67.03	21.92	24.77	21.92	23.87
12	51.9	66.46	21.53	24.61	22.31	28.87
13	56.16	71.3	26.52	27.02	27.31	33.87
14	56.94	72.22	25.55	26.22	25.55	31.91
15	53.52	68.31	26.02	25.13	22.82	36.91

Tabel 4.14 Daya yang dibangkitkan pada kondisi III (lanjutan)

jam	Daya yang dibangkitkan MW					
	unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	Unit hidro
16	49.3	63.48	31.02	23.78	19.44	41.91
17	51.26	65.16	36.02	26.46	23.92	46.91
18	46.26	60.16	41.02	31.46	28.38	51.91
19	44.08	56.47	46.02	32.12	29.06	53.34
20	44.37	56.18	46.02	32.12	29.06	53.34
21	46.74	60.56	41.02	27.12	24.06	48.34
22	47.61	61.56	36.02	23.24	19.06	43.34
23	44.6	58.11	31.02	22.27	15.68	38.34
24	44.76	58.3	26.02	22.32	15.81	33.34
Total	1215.96	1557.95	676.56	616.98	545.22	700
	5312.67					

Berdasarkan hasil yang dibangkitkan pada kondisi ke III daya yang terbangkit tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan kondisi II pada profil beban yang sama. Selanjutnya adalah analisa unit hidro dimana total daya yang dibangkitkan harus sama dengan volume air hidro. Sesuai dengan persamaan :

$$15_{ph} + 300 = Q$$

Dalam hal ini volume air untuk membangkitkan unit hidro adalah sebesar 17700 acre-feet. Berikut adalah daya yang dibangkitkan oleh unit hidro:

Tabel 4.15 Daya yang dibangkitkan unit hidro

jam	daya MW	persamaan	Q (acre-feet)
1	8.53	15ph +300	427.95
2	7.13	15ph +300	406.95
3	5.73	15ph +300	385.95
4	10.64	15ph +300	459.6

Tabel 4.16 Daya yang dibangkitkan unit hidro (lanjutan)

jam	daya MW	persamaan	Q (acre-feet)
5	12.75	15ph +300	491.25
6	12.75	15ph +300	491.25
7	16.26	15ph +300	543.9
8	19.07	15ph +300	586.05
9	20.47	15ph +300	607.05
10	20.47	15ph +300	607.05
11	23.87	15ph +300	658.05
12	28.87	15ph +300	733.05
13	33.87	15ph +300	808.05
14	31.91	15ph +300	778.65
15	36.91	15ph +300	853.65
16	41.91	15ph +300	928.65
17	46.91	15ph +300	1003.65
18	51.91	15ph +300	1078.65
19	53.34	15ph +300	1100.1
20	53.34	15ph +300	1100.1
21	48.34	15ph +300	1025.1
22	43.34	15ph +300	950.1
23	38.34	15ph +300	875.1
24	33.34	15ph +300	800.1
Total			17700

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa total daya yang di bangkitkan sama dengan jumlah debit air yang dihabiskan.

Berikut adalah hasil dari *ramp rate* pada kondisi III:

Tabel 4.17 *Ramp rate* pada kondisi III

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro
1	2	0.59	0.67	0.47	0.19	0.47	1.4
2	3	0.59	0.67	0.47	0.19	0.47	1.4

Tabel 4.18 Ramp rate pada kondisi III (lanjutan)

t	t+1	Ramp Rate pembangkit (MW/jam)					
		unit 1	unit 2	unit 3	unit 4	unit 5	unit hidro
3	4	-2.06	-2.34	-1.64	-0.66	-1.64	-4.91
4	5	-0.87	-1	-0.7	-0.28	-0.7	-2.11
5	6	0	0	0	0	0	0
6	7	-1.47	-1.68	-1.18	-0.47	-1.18	-3.51
7	8	-1.17	-1.34	-0.93	-0.37	-0.93	-2.81
8	9	-0.58	-0.66	-0.47	-0.19	-0.47	-1.4
9	10	0	0	0	0	0	0
10	11	3.16	3.61	2.53	1.01	2.53	-3.4
11	12	0.5	0.57	0.39	0.16	-0.39	-5
12	13	-4.26	-4.84	-4.99	-2.41	-5	-5
13	14	-0.78	-0.92	0.97	0.8	1.76	1.96
14	15	3.42	3.91	-0.47	1.09	2.73	-5
15	16	4.22	4.83	-5	1.35	3.38	-5
16	17	-1.96	-1.68	-5	-2.68	-4.48	-5
17	18	5	5	-5	-5	-4.46	-5
18	19	2.18	3.69	-5	-0.66	-0.68	-1.43
19	20	-0.29	0.29	0	0	0	0
20	21	-2.37	-4.38	5	5	5	5
21	22	-0.87	-1	5	3.88	5	5
22	23	3.01	3.45	5	0.97	3.38	5
23	24	-0.16	-0.19	5	-0.05	-0.13	5

Dari data diatas dapat diketahui bahwa program masih memenuhi batasan berupa *ramp rate* maupun volume air pada unit hidro. Sedangkan untuk aliran daya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.18 Aliran daya pada kondisi III

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
1	1	2	130	26	26.333	25.166
2	1	3	130	24.578	23	18.894

Tabel 4.19 Aliran daya pada kondisi III (lanjutan)

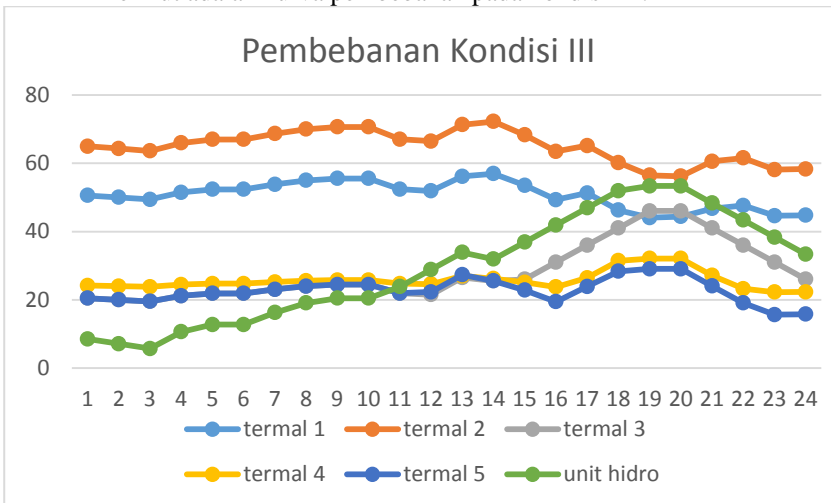
	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
3	2	4	65	23.529	21.117	15.88235
4	3	4	130	22.25	20	15.5
5	2	5	130	17.35	16.95	15.45
6	2	6	65	28.388	25.388	20.333
7	4	6	90	27.75	24.5	24
8	5	7	70	17.333	16.916	15.416
9	6	7	130	5.5	10.625	16
10	6	8	32	27.25	29.25	32
11	6	9	65	9.285	9.380	4
12	6	10	32	5.303	5.357	2.285
13	9	11	65	0	0	0
14	9	10	65	9.272	9.363	4
15	4	12	65	10.192	7.5	2.923
16	12	13	65	20.5	31	0.460
17	12	14	32	4.923	6.153	6.5
18	12	15	32	7.923	10.231	9.846
19	12	16	32	6.55	8.6	11.25
20	14	15	16	1.25	1.35	2.05
21	16	17	16	3.105	4.368	6.473
22	15	18	16	7.681	9.636	12.45
23	18	19	16	4.461	2.692	8
24	19	20	32	5.142	5.714	5
25	10	20	32	7.190	8.428	8.142
26	10	17	32	5.875	6.5	6
27	10	21	32	1.428	2.714	7.857
28	10	22	32	3.133	4.466	7.933
29	21	22	32	18.5	24	32
30	15	23	16	9.2	10.65	16
31	22	24	16	2.277	4.666	7.777

Tabel 4.20 Aliran daya pada kondisi III (lanjutan)

	dari bus	ke bus	kapasitas saluran (MW)	daya mengalir (MW)		
				jam 1	jam 16	jam 19
32	23	24	16	8.074	4.888	8.629
33	24	25	16	1.666	10.24	11.18
34	25	26	16	3.5	4.236	4.842
35	25	27	16	1.857	14.52	16
36	28	27	65	6.3	11.675	19.4
37	27	29	16	6.047	7.309	8.333
38	27	30	16	6.966	8.416	9.616
39	29	30	16	3.644	4.4	5.044
40	8	28	32	2.7	7.2	9.4
41	6	28	32	9.166	4.5	10

Dengan penambahan unit hidro pada kondisi ke III ini aliran daya masih berada dalam batasan kapasitas saluran. Aliran daya pada saluran ke 29,30,35 pada jam ke-19 mencapai batasan maksimal kapasitas saluran.

Berikut adalah kurva pembebanan pada kondisi III:



Gambar 4.2 Kurva pembebanan kondisi III

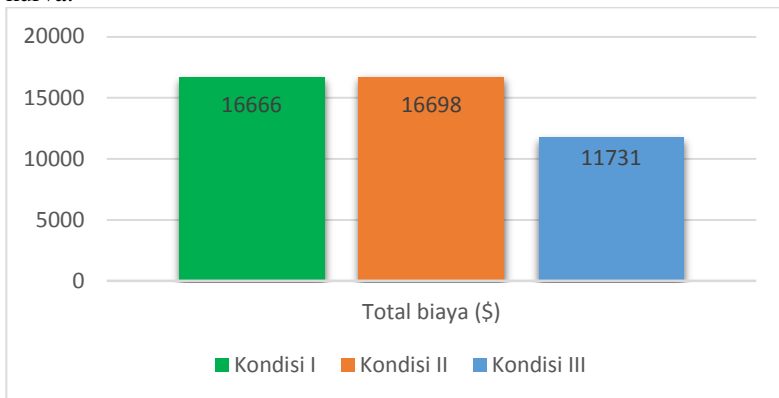
4.3 Total Biaya Sistem

Berdasarkan dari hasil simulasi pada 3 kondisi yang telah dilakukan, didapatkan total biaya yang berbeda. Berikut adalah total biaya pada setiap kondisi:

Tabel 4.21 Total biaya sistem

Kondisi	Program	Total Biaya (\$)
I	<i>DOPF</i> arus searah tanpa batasan <i>ramp rate</i>	16666
II	<i>DOPF</i> arus searah dengan batasan <i>ramp rate</i>	16698
III	<i>DOPF</i> arus searah dengan batasan <i>ramp rate</i> , dan penambahan unit hidro	11731

Berikut apabila perbandingan digambarkan dalam bentuk kurva:



Gambar 4.3 Perbandingan total biaya sistem

Dari perbandingan diatas dapat dilihat bahwa selisih biaya pada kondisi I dengan kondisi II yaitu penambahan batasan *ramp rate* hanya sedikit. Sedangkan saat penambahan unit hidro pada kondisi II biaya dapat ditekan. Mengingat biaya pembangkitan unit hidro yang sangat murah.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Batasan *power balance* dan batasan kapasitas saluran merupakan hal utama yang dapat dipenuhi program *DOPF* arus searah pada tugas akhir ini.
2. *Ramp rate* merupakan batasan yang berkaitan dengan kapasitas fisik dari pembangkit, yang apabila tidak terpenuhi akan mengganggu kinerja pembangkit dalam kurun waktu tertentu. Program *DOPF* arus searah yang dibuat dapat memenuhi batasan *ramp rate* tersebut.
3. Berdasarkan program yang telah dibuat, unit hidro mampu menghabiskan volume air yang tersedia dalam pembangkitan selama 24 jam.
4. Dengan penambahan satu unit hidro, total biaya pembangkitan dapat ditekan.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang operasi sistem tenaga berdasarkan hasil simulasi dan analisa pada penelitian ini, yaitu:

1. Mempertimbangkan rugi-rugi saluran transmisi yang terjadi dalam sistem sehingga mendekati permasalahan di lapangan.
2. Menambahkan inisial *charging* dan *discharging* pada volume unit hidro.
3. Mengembangkan *DOPF* arus searah pada sistem koordinasi pembangkit hidro-termal yang *real*.

- *Halaman ini sengaja dikosongkan* -

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muchlis, Moch., Adhi Darma Permana. "Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN", Jakarta, 2004.
- [2] Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi (PTPSE), "OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2015", Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Jakarta, 2015
- [3] Wibowo, Rony Seto, Nursidi, IGN Satriyadi H, Uman DF P, Adi Adi Soeprijanto, and Ontoseno Ontoseno Penangsang. "Dynamic DC Optimal Power Flow Using Quadratic Programming", *978-1-4799-0425-9/13 ©2013 IEEE*. Surabaya, 2013.
- [4] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [5] Wood, Allen J, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [6] Momoh James, A., El-Hawary, M.E, Adapa, R., "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part II: Newton, Linear Programming, and Interior Point Methods", *IEEE Trans, Power Sys.*, 1999, vol.14, pp.105-111, Januari, 1999.
- [7] Cain, Mary B., O'Neill, Richard P., Castillo, Anya, "History of Optimal Power Flow and Formulations", Desember 2012
- [8] Carpentier, J, "Optimal Power Flows" Paris, IPC Business Press, Vol 1, No 1, April, 1979 .
- [9] T Nikman, MR Narimani, J Ahgei, S Tabatabaei, M Nayeripour, Modified Honey Bee Mating Optimization to Solve Dynamic Optimal Power Flos Considering Generator Constraints, *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol.5, No.10, pp.989-1002, Januari 2011.
- [10] Jensen, Paul A., Bard, Jonathan F., "Operations Research Models and Methods", Wiley, 2002.
- [11] Simoes Costa A, Uturbey W, "Dynamic Optimal Power Flow Approach to Account for Consumer Response in Short term hydrothermal coordination studies" *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2007.
- [12] Ameli, Mohammad Taghi, Moslehpour, Saeid, Golnadsadat, Mahdaviikhah, "Determining the Spinning Reserve In Power Systems By Corrected Recursove PJM Method", *Proc. of the 2008 IAJC-IJME International Conference*, 2008.



Penulis memiliki nama lengkap Rasyid Wahyu Wijaya, biasa dipanggil Rasyid. Penulis yang lahir di kota Klaten pada tanggal 12 Oktober 1992 merupakan anak terakhir dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan dasar selama 6 tahun di SDN 2 Somopuro, Kabupaten Klaten, menempuh pendidikan sekolah menengah pertama selama 3 tahun di SMPN 1 Prambanan, kemudian menempuh pendidikan sekolah menengah atas selama 3 tahun di SMAN 2 Klaten. Kemudian penulis menyelesaikan program diploma tiga (D3) di Universitas

Gadjah Mada dengan jurusan teknik elektro dan program studi teknik listrik. Dan saat ini tengah menempuh program strata satu (S1) di Institut Teknologi Sepuluh November dengan jurusan teknik elektro, bidang studi teknik sistem tenaga.

Email: rasyidww@gmail.com