



TUGAS AKHIR - TE141599

***DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MEMPERTIMBANGKAN
VALVE-POINT EFFECT MENGGUNAKAN MODIFIED HONEY
BEE MATING OPTIMISATION***

Hilmy Kharisma
NRP 2213100168

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE141599

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING VALVE-
POINT EFFECT USING MODIFIED HONEY BEE MATING
OPTIMISATION**

Hilmy Kharisma
NRP 2213100168

Advisors
Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “***DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MEMPERTIMBANGKAN VALVE-POINT EFFECT MENGGUNAKAN MODIFIED HONEY BEE MATING OPTIMISATION***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Hilmy Kharisma

NRP. 2213 100 168

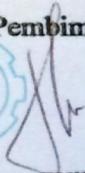
**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MEMPERTIMBANGKAN
VALVE-POINT EFFECT MENGGUNAKAN MODIFIED HONEY
BEE MATING OPTIMISATION**

TUGAS AKHIR

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

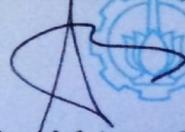
Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 19741129 200012 1 001

Dosen Pembimbing 2



Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 19630725 199003 1 002



Dynamic Optimal Power Flow Mempertimbangkan Valve-Point Effect Menggunakan Modified Honey Bee Mating Optimisation

Nama : Hilmy Kharisma
Pembimbing I : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

Saat ini kebutuhan tenaga listrik tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia. Seiring berjalannya waktu, permintaan akan daya listrik semakin meningkat yang diimbangi dengan perbaikan kualitas dan keandalan dari daya listrik. Selain permintaan beban yang terus bertambah, perubahan level beban pada setiap jam menyebabkan perlu adanya metode optimasi pada pembangkitan tenaga listrik. *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) merupakan metode penjadwalan keluaran pembangkit dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti batasan fisik, pengoperasian, analisis aliran daya dan sebagainya. Salah satu faktor yang memengaruhi adalah efek *valve-point*. Efek *Valve-point* merupakan pembukaan katup uap pada pembangkitan thermal yang membuat kurva biaya pembangkitan menjadi tidak mulus sehingga perhitungan biaya menjadi tidak linear.

Tugas akhir ini membahas DOPF dengan mempertimbangkan *valve-point effect* menggunakan metode *Modified Honey Bee Mating Optimisation* (MHBMO). Simulasi dilakukan dengan dua bagian. Bagian pertama melihat pengaruh efek *valve-point* dalam OPF, sedangkan bagian kedua melihat performa MHBMO dalam menyelesaikan DOPF dengan efek *valve-point* yang dibandingkan dengan metode PSO. Hasil simulasi bagian pertama menunjukkan total biaya yang dihasilkan akibat efek *valve-point* lebih mahal 178.6466 \$/h dibandingkan tanpa efek *valve-point*. Hasil simulasi bagian kedua menunjukkan bahwa dalam menyelesaikan DOPF dengan efek *valve-point* metode MHBMO menghasilkan biaya pembangkitan lebih murah 19.618 \$/h daripada metode PSO.

Kata kunci: aliran daya, *dynamic optimal power flow*, efek *valve-point*, *modified honey bee mating optimisation*.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

Dynamic Optimal Power Flow Considering Valve-Point Effect Using Modified Honey Bee Mating Optimisation

Name : Hilmy Kharisma
Advisor I : Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Advisor II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

Lately, the need for electric power can not be separated from human life. As time passes, demand for electric power is increasing, so does the need for improvements in the quality and reliability of electrical power. In addition to the growing demand for loads, changes in load levels on an hourly basis needs an optimization method for power generation. Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) is a method of scheduling the power output of the plant by considering factors such as physical constraints, operation, power flow analysis, etc. One of those factors is the valve-point effect. Valve-point effect is the opening of the steam valve at the thermal generation which makes the generating cost curve to be non-seamless so the cost calculation becomes nonlinear.

This final project discusses DOPF by considering the valve-point effect using Modified Honey Bee Mating Optimisation (MHBMO) method. The simulation is done with two parts. The first part observe the effect of the valve-point effect in OPF, while the second part observe the performance of MHBMO in completing the DOPF with the valve-point effect. The first part simulation results show that the total cost with valve-point effect is 178.6466 \$/h more expensive than without valve-point effect. The second part simulation results also show that in solving DOPF with valve-point effect MHBMO method obtain generating cost 19.618 \$/h cheaper than the PSO method.

Keywords: *dynamic optimal power flow, modified honey bee mating optimisation, power flow, valve-point effect.*

---Halaman ini sengaja dikosongkan---dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, penulis ucapkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunianya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul : ***Dynamic Optimal Power Flow Mempertimbangkan Valve-Point Effect Menggunakan Modified Honey Bee Mating Optimisation.***

Dalam proses penyusunannya penulis telah banyak dibantu oleh berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT karena telah memberikan kelancaran dalam melaksanakan Tugas Akhir ini, dan semoga diberikan keberkahan atas apa yang telah dilalui.
2. Kedua orang tua dan kedua kakak saya yang tidak pernah putus untuk selalu mendoakan keberhasilan studi saya.
3. Bapak Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT. dan Ir. Sjamsjul Anam, MT. selaku pembimbing yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman-teman Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik yang telah membantu dan memberikan support untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman Kabinet HIMATEKTRO SUPER 2015/2016 yang selalu memotivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman Eclus & Nagasobung yang selalu menemani dan menghibur ketika penulis mengalami kesulitan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman asisten LIPIST dan Lab Tegangan Tinggi yang sudah berbagi ilmu masing-masing.
8. Teman-teman Barajuang yang tidak pernah berhenti memberikan inspirasi untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Elektro yang sudah memberikan ilmunya kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di

masa yang akan datang. Semoga buku Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Mei 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	3
1.6 Relevansi atau Manfaat	4
BAB 2 DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Sistem Pembangkitan	5
2.1.2 Sistem Transmisi	6
2.1.3 Sistem Distribusi	6
2.1.4 Beban	6
2.2 Studi Aliran Daya	7
2.2.1 Persamaan Aliran Daya	7
2.2.2 Metode Newton-Rhapson	9
2.3 Optimal Power Flow	13
2.4 Modified Honey Bee Mating Optimisation	15
BAB 3 PENERAPAN <i>MODIFIED HONEY-BEE MATING</i> <i>OPTIMISATION</i> PADA <i>DYNAMIC OPTIMAL POWER</i> <i>FLOW</i>	17
3.1 Sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus	17
3.1.1 Data Beban dan Saluran IEEE 9 Bus	18
3.1.2 Data Beban dan Saluran IEEE 30 Bus	20

3.2	Efek <i>Valve-Point</i>	24
3.3	Simulasi Algoritma MHBMO untuk Menyelesaikan DOPF dengan <i>Valve-Point Effect</i>	25
3.3.1	Inisialisasi Awal.....	26
3.3.2	Penentuan <i>Queen</i> dan <i>Drone</i>	26
3.3.3	Proses Perkawinan.....	27
3.3.4	Proses <i>Breeding</i>	27
3.3.5	Mutasi	27
3.3.6	Memperbarui <i>Queen</i> dan <i>Drone</i>	28
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.....		29
4.1	Sistem Standar IEEE 9 Bus	29
4.1.1	Perbandingan Tegangan	29
4.1.2	Perbandingan Aliran Daya Setiap Saluran.....	30
4.1.3	Perbandingan Daya Terbangkitkan.....	31
4.1.4	Kurva Konvergensi.....	31
4.1.5	Perbandingan Biaya Pembangkitan	32
4.2	Sistem Standar IEEE 30 Bus	33
4.2.1	Perbandingan Tegangan	34
4.2.2	Perbandingan Aliran Daya Setiap Saluran.....	36
4.2.3	Perbandingan Perubahan Daya Terbangkitkan	41
4.2.4	Perbandingan Daya Terbangkitkan.....	42
4.2.5	Perbandingan Biaya.....	43
BAB 5 PENUTUP		45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran	45
DAFTAR PUSTAKA		47
LAMPIRAN		49
BIOGRAFI PENULIS		53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem tenaga listrik	5
Gambar 2.2	Gambaran bus secara umum.....	8
Gambar 2.3	Proses perkawinan lebah madu	15
Gambar 3.1	<i>Single line diagram</i> sistem IEEE 9 bus	17
Gambar 3.2	<i>Single line diagram</i> sistem IEEE 30 bus	18
Gambar 3.3	Kurva biaya bahan bakar	24
Gambar 3.4	Diagram alir metode MHBMO	25
Gambar 4.1	Perbandingan tegangan pada setiap bus (IEEE 9 bus)....	30
Gambar 4.2	Perbandingan aliran daya pada setiap saluran (IEEE 9 bus)	30
Gambar 4.3	Perbandingan biaya pembangkitan (IEEE 9 bus)	33
Gambar 4.4	Grafik konvergensi OPF tanpa fungsi biaya tidak mulus (efek <i>valve-point</i>).....	31
Gambar 4.5	Grafik konvergensi OPF dengan fungsi biaya tidak mulus (efek <i>valve-point</i>).....	32
Gambar 4.6	Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 1-3	34
Gambar 4.7	Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 4-6	34
Gambar 4.8	Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 7-9	35
Gambar 4.9	Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 10-12 ...	35
Gambar 4.10	Perbandingan biaya pembangkitan MHBMO dan PSO .	44

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data bus dan beban sistem IEEE 9 bus	19
Tabel 3.2	Data saluran sistem IEEE 9 bus	19
Tabel 3.3	Fungsi biaya sistem IEEE 9 bus	19
Tabel 3.4	Batasan kemampuan generator IEEE 9 bus	20
Tabel 3.5	Data bus dan beban sistem IEEE 30 bus	20
Tabel 3.6	Data saluran sistem IEEE 30 bus	21
Tabel 3.7	Fungsi biaya sistem IEEE 30 bus	23
Tabel 3.8	Batasan kemampuan generator sistem IEEE 30 bus	23
Tabel 4.1	Daya terbangkitkan pada setiap generator (IEEE 9 bus)	31
Tabel 4.2	Perbandingan biaya pembangkitan (IEEE 9 bus)	32
Tabel 4.3	Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 1-4	36
Tabel 4.4	Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 5-8	37
Tabel 4.5	Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 9-12	39
Tabel 4.6	Perubahan daya pembangkitan setiap jam	41
Tabel 4.7	Data ramp rate setiap generator	42
Tabel 4.8	Daya terbangkitkan menggunakan MHBMO	42
Tabel 4.9	Daya terbangkitkan menggunakan PSO	43
Tabel 4.10	Perbandingan biaya pembangkitan MHBMO dan PSO	43

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tenaga listrik saat ini telah menjadi kebutuhan utama dan memainkan peran yang vital bagi kehidupan sehari-hari. Seiring berjalannya waktu, permintaan daya listrik yang disuplai oleh pembangkit semakin meningkat. Perubahan beban yang terjadi perlu mempertimbangkan batasan-batasan yang dimiliki oleh generator. Selain itu, biaya bahan bakar semakin meningkat sehingga menyebabkan biaya pembangkitan juga semakin meningkat. Sehingga perlu adanya optimasi untuk menghasilkan pembangkitan yang sesuai permintaan beban dengan biaya paling minimum namun tetap memerhatikan batasan-batasan yang ada.

Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) adalah metode untuk menjadwalkan keluaran generator sesuai permintaan beban sesuai rentang waktu tertentu dengan memenuhi batasan generator dan saluran, sehingga sistem dapat dioperasikan secara ekonomis. Di dalam DOPF, studi aliran daya dan harga pembangkitan adalah dua factor yang sangat penting. Studi aliran daya digunakan untuk mengetahui kesesuaian pembangkitan dengan batasan saluran. Sedangkan harga pembangkitan digunakan untuk mengetahui biaya pembangkitan yang dimiliki oleh masing-masing generator sehingga dapat ditentukan biaya pembangkitan paling minimum. Dalam proses pembangkitan ada yang dinamakan kurva biaya *non-smooth*. Kurva biaya *non-smooth* terjadi karena adanya pembukaan katup uap yang bertujuan untuk menambah putaran turbin. Pengaruh dari pembukaan katup ini yang disebut dengan efek *valve-point* di mana perhitungan konvensional menjadi sulit diterapkan. Oleh karena itu, diperlukan metode yang mampu menyelesaikan permasalahan DOPF dengan mempertimbangkan efek *valve-point*, yaitu *Modified Honey Bee Mating Optimisation (MHBMO)*.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik aliran daya optimal dengan mempertimbangkan efek *valve-point*?
2. Bagaimana hasil perhitungan MHBMO dalam mencari biaya pembangkitan paling minimum ?

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini terdapat batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Analisis aliran daya optimal menggunakan sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus
2. Analisis yang dilakukan mempertimbangkan kurva biaya non-smooth karena efek *valve-point*, batasan daya pembangkitan, batasan tegangan, *ramp rate* dan kapasitas saluran

1.3 Tujuan

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

1. Mengetahui dampak efek *valve-point* terhadap biaya pembangkitan.
2. Mendapatkan biaya pembangkitan minimum dengan mempertimbangkan *ramp rate* dan kapasitas saluran.
3. Menerapkan metode MHBMO pada perhitungan DOPF dengan efek *valve-point*.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam pelaksanaan pada penelitian dan penyelesaian tugas akhir ini mengikuti pola sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan buku serta referensi yang berhubungan *Dynamic Optimal Power Flow*, *Valve-Point Effect* serta *Modified Honey Bee Mating Optimisation*. Referensi berguna untuk menjadi pedoman dasar dalam mengerjakan tugas akhir ini.
2. Pengumpulan Data
Mengumpulkan data-data yang dibutuhkan mengenai sitem kelistrikan pada sistem IEEE 30 Bus serta *Valve-Point Effect*. Data ini dibutuhkan untuk proses selanjutnya, yaitu proses simulasi di mana data yang didapat akan digunakan dalam perhitungan DOPF.

3. Simulasi

Sistem ini akan disimulasikan berdasarkan data-data yang didapat menggunakan *software* MATLAB. Pada proses ini metode *modified honey bee mating optimization* akan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan DOPF dengan mempertimbangkan pengaruh dari *valve-point*.

4. Analisis Simulasi

Hasil yang didapatkan dari simulasi sebelumnya digunakan untuk mencari biaya paling minimum setelah mempertimbangkan *valve-point effect*. Pada analisis ini akan didapatkan hasil perhitungan menggunakan metode MHBMO dalam menyelesaikan permasalahan DOPF.

5. Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai biaya minimum yang didapatkan serta memberikan saran untuk studi lebih lanjut mengenai *Dynamic Optimal Power Flow* dengan mempertimbangkan pengaruh dari *valve-point*.

1.5 Sistematika

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima bab yang berisi tentang:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika dan relevansi atau manfaat penulisan tugas akhir.

BAB II : *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW*

Pada bagian ini dibahas secara umum tentang landasan teori dari tugas akhir. Teori tersebut berkaitan dengan studi aliran daya, aliran daya optimal dan kurva biaya *non-smooth karena valve-point effect*.

BAB III : PENERAPAN *MODIFIED HONEY-BEE MATING OPTIMISATION* PADA *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW*

Pada bagian ini dijelaskan proses pengambilan data dengan peralatan yang digunakan dan metode yang digunakan untuk pengolahan data.

BAB IV : SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bagian ini dijelaskan hasil dan analisis dari metode *Modified Honey Bee Mating Optimisation* pada sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus.

BAB V : PENUTUP

Pada bagian ini berisi kesimpulan atas hasil yang diperoleh dari pelaksanaan tugas akhir serta saran untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya.

1.6 Relevansi atau Manfaat

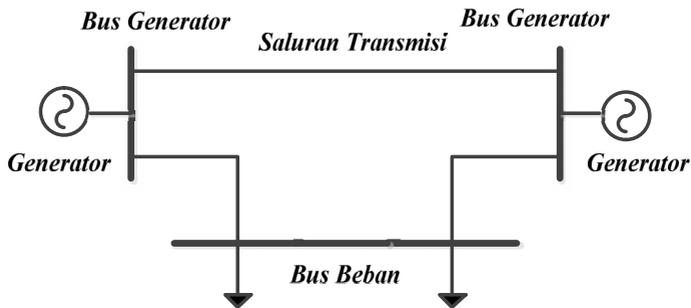
Manfaat yang dapat diperoleh dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal dengan kurva biaya *non-smooth* akibat efek *valve-point*.
2. Mendapatkan pembangkitan dengan biaya minimum menggunakan metode MHBMO.
3. Dapat menjadi referensi bagi peneliti yang membahas topik yang serupa.
4. Dapat menjadi referensi bagi perusahaan listrik untuk mengatasi masalah monitoring transformator distribusi dan pemeliharaannya.
5. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil topik yang serupa.

BAB 2 DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Kebutuhan energy listrik telah menjadi kebutuhan yang penting bagi manusia. Sistem tenaga listrik adalah sistem yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Sistem tenaga listrik terdiri atas komponen-komponen tenaga listrik yang membentuk tiga sistem, yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Sistem pembangkitan berfungsi untuk membangkitkan energy listrik dari berbagai sumber daya yang ada. Sistem transmisi digunakan untuk menyalurkan energy listrik dari sistem pembangkitan ke sistem distribusi. Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan energy listrik ke beban (industry, komersil, dan perumahan) [1]. Gambaran sistem tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem tenaga listrik

2.1.1 Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan merupakan sistem yang digunakan untuk membangkitkan energy listrik dari berbagai sumber daya yang ada. Sumber daya tersebut dapat berasal dari energy fosil maupun energy baru terbarukan. Sistem pembangkitan terdiri atas berbagai komponen-komponen tenaga listrik, seperti turbin, generator, dan sebagainya. Generator AC sinkron 3 fasa merupakan generator yang sering digunakan. Setiap generator memiliki fungsi biaya masing-masing sehingga akan menghasilkan biaya pembangkitan yang berbeda untuk

masing-masing generator. Di dalam sistem tenaga listrik generator akan bekerja secara parallel untuk memenuhi permintaan beban.

2.1.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi merupakan sistem penyaluran energy listrik dari sistem pembangkitan ke sistem distribusi. Pada sistem ini, daya listrik akan disalurkan pada tegangan yang sangat tinggi (lebih dari 60 kV) untuk mengurangi rugi-rugi panas yang diakibatkan hantaran arus yang besar pada tegangan rendah. Pada sistem transmisi yang modern, sistem transmisi akan terinterkoneksi antara satu dengan yang lain untuk meningkatkan keandalan dan efektivitas dari suatu sistem tenaga listrik.

2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi berfungsi sebagai sistem yang menyalurkan daya listrik dari sistem transmisi ke konsumen. Sistem distribusi yang penyaluran daya listriknya di atas tanah disebut dengan *overhead*, sedangkan distribusi daya listrik di bawah tanah disebut dengan *underground*. Berdasarkan tipe konsumen maka sistem distribusi dapat dibagi menjadi dua, yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder.

Sistem distribusi primer digunakan untuk melayani konsumen berkapasitas besar seperti sector industry dan beroperasi pada tegangan 4 kV-34.5 kV. Sedangkan sistem distribusi sekunder digunakan untuk melayani konsumen berkapasitas kecil seperti perumahan atau komersil. Sistem distribusi sekunder menyuplai tegangan pada beberapa level tegangan, yaitu level tegangan 240/120 V (fasa tunggal dengan tiga kawat), level tegangan 208/120 V (tiga fasa dengan empat kawat), dan level tegangan 480/277 V (tiga fasa dengan empat kawat).

2.1.4 Beban

Beban dalam sistem tenaga listrik terdiri atas skala industry, skala komersil, dan skala perumahan. Untuk mengetahui beban yang berasal dari penggunaan listrik dapat dilihat dari kurva beban harian. Beban terbesar dalam periode 24 jam disebut dengan beban puncak atau maksimum. Beban dapat berupa beban statis seperti pencahayaan atau pendinginan serta beban dinamis seperti motor induksi.

Untuk industry dengan beban yang besar, maka daya listrik akan disuplai langsung dari sistem transmisi melalui jaring subtransmisi. Pada skala industry, terdapat beban komposit yang merupakan gabungan

beban statis dan motor induksi yang mengkonsumsi daya reaktif dalam jumlah besar. Sedangkan untuk skala komersil dan perumahan, beban pada umumnya berupa pencahayaan, pemanasan dan pendinginan sehingga tidak memengaruhi nilai daya reaktif maupun frekuensi.

2.2 Studi Aliran Daya

Sistem tenaga listrik terdiri atas node dan cabang dengan nilai impedansi yang dinyatakan dalam per unit dari MVA base. Untuk menganalisis sistem tenaga listrik, pada umumnya digunakan metode bus tegangan. Saat arus pada titik tersebut diketahui, maka persamaan tersebut dapat diselesaikan. Namun dalam sistem tenaga listrik, daya lebih dikenal daripada arus. Persamaan hasil dalam bentuk persamaan daya atau yang lebih sering disebut dengan *power flow equation*. Studi aliran daya merupakan studi yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik yang digunakan dalam perencanaan, operasi, dan *economic scheduling* [1].

Dalam menyelesaikan perhitungan aliran daya, sistem diasumsikan dalam kondisi seimbang dan menggunakan model satu fasa. Terdapat empat besaran yang digunakan pada setiap bus, yaitu tegangan, sudut fasa, daya aktif, dan daya reaktif. Terdapat tiga tipe bus[1], yaitu :

1. *Slack bus*
Slack bus atau *swing bus* merupakan bus referensi yang nilai dan sudut fasa tegangan ditentukan. Bus ini sebagai penyuplai kekurangan daya yang dibangkitkan oleh generator lain akibat rugi-rugi pada saluran.
2. *Load bus*
Load bus atau bus beban merupakan bus di mana terdapat beban sehingga nilai P dan Q ditentukan, tapi nilai dan sudut fasa tegangan bus tidak diketahui.
3. *Regulated bus*
Regulated bus adalah bus generator yang sering juga disebut *voltage-controlled buses* atau *P-V buses*. Nilai P dan Q ditentukan, sedangkan sudut fasa tegangan dan daya reaktif akan ditentukan. Batasan daya reaktif juga ditentukan.

2.2.1 Persamaan Aliran Daya

Berdasarkan hukum Kirchoff arus, persamaan titik tegangan dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$I_b = Y_b V_b \quad (2.1)$$

keterangan

- I_{bus} = arus pada bus
- Y_{bus} = admitansi pada bus
- V_{bus} = tegangan pada bus

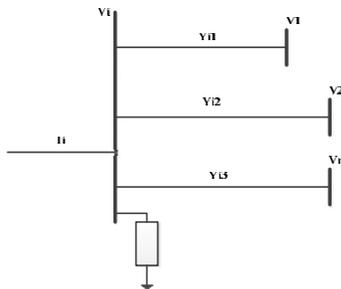
Persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk matriks admitansi seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_2 & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

keterangan

- n = jumlah total bus
- I_i = arus fasor yang mengalir ke bus i
- Y_{11} = admitansi sendiri dari bus i
- Y_{21} = mutual admitansi dari bus i dan j
- V_i = tegangan fasor pada bus i

Penggambaran secara umum bus pada sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.2 Gambaran bus secara umum

Penerapan hukum Kirchoff arus pada sistem tersebut menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
I_i &= y_0 V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\
&= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 + \dots + y_{in}V_n
\end{aligned} \quad (2.3)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.4)$$

Untuk daya aktif dan reaktif pada bus i ditunjukkan pada persamaan berikut ini.

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.5)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.6)$$

Berdasarkan persamaan 2.4 dan 2.6, maka substitusi nilai I_i menghasilkan persamaan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.7)$$

Perhitungan aliran daya tersebut diselesaikan dengan proses pengulangan (iterasi). Pada proses tersebut ditetapkan nilai perkiraan untuk tegangan bus yang tidak diketahui, kemudian menghitung nilai baru untuk setiap tegangan bus berdasarkan nilai perkiraan bus yang lain. Proses tersebut akan terus berlangsung hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus sesuai dengan batasan yang ditentukan.

2.2.2 Metode Newton-Rhapson

Metode yang paling sering digunakan untuk menyelesaikan persamaan aljabar nonlinear adalah metode Newton-Rhapson. Metode Newton-Rhapson adalah metode pendekatan berdasarkan estimasi awal yang tidak diketahui dengan menggunakan uraian deret Taylor [2]. Metode ini dapat menyelesaikan persamaan dengan dua variable atau lebih.

Berikut ini akan dijelaskan mengenai perhitungan menggunakan metode Newton-Rhapon dengan N variabel yang merupakan pengembangan dari Newton-Rhapon satu variable. Untuk metode Newton-Rhapon N diperlukan analogi dimensi N dari turunan pertama dengan menggunakan matriks Jacobian. Setiap elemen matriks Jacobian merupakan turunan parsial salah satu persamaan nonlinear dari sistem. Untuk memudahkan pemahaman, asumsikan $N = 2$ dengan dua persamaan F_1 dan F_2 . Maka,

$$F_1(x_1, x_2) = K_1 \quad (2.8)$$

$$F_2(x_1, x_2) = K_2 \quad (2.9)$$

Pada persamaan 2.8 dan 2.9, variabel K_1 dan K_2 merupakan suatu konstanta. Jika $x_1(0)$ dan $x_2(0)$ adalah estimasi awal untuk solusi, $\Delta x_1(0)$ dan $\Delta x_2(0)$ adalah deviasi dari solusi yang tepat, maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut.

$$K_1 = F_1(x_1, x_2) = F_1[x_1(0) + \Delta x_1(0) + x_2(0) + \Delta x_2(0)] \quad (2.10)$$

$$K_2 = F_2(x_1, x_2) = F_2[x_1(0) + \Delta x_1(0) + x_2(0) + \Delta x_2(0)] \quad (2.11)$$

Kemudian persamaan 2.10 dan 2.11 diuraikan ke dalam deret Taylor seperti berikut.

$$K_1 = F_1[x_1(0), x_2(0)] + \Delta x_1(0) \frac{\partial}{\partial x_1} \Big|_0 + \Delta x_2(0) \frac{\partial}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots \quad (2.12)$$

$$K_2 = F_2[x_1(0), x_2(0)] + \Delta x_1(0) \frac{\partial}{\partial x_1} \Big|_0 + \Delta x_2(0) \frac{\partial}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots \quad (2.13)$$

Asumsikan error $\Delta x_1(0)$ dan $\Delta x_2(0)$ sangat kecil, sehingga orde yang lebih tinggi dapat diabaikan. Kemudian persamaan 2.12 dan 2.13 dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} K_1 - F_1[x_1(0), x_2(0)] \\ K_2 - F_2[x_1(0), x_2(0)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(0) \\ \Delta x_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Matriks turunan parsial pada persamaan 2.14 disebut dengan matriks Jacobian yang menunjukkan solusi awal $x_1(0)$ dan $x_2(0)$

digunakan untuk menghitung turunan parsial. Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1(0) \\ \Delta K_2(0) \end{bmatrix} = J(0) \begin{bmatrix} \Delta x_1(0) \\ \Delta x_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Koreksi pertama pada sistem persamaan linear ditambahkan ke variabel iterasi awal untuk mendapatkan nilai iterasi selanjutnya.

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Secara umum penyelesaian metode Newton-Rhapson dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta K^{h-1} = [J^{h-1}][\Delta x^{h-1}] \quad (2.17)$$

$$x^h = x^{h-1} + \Delta x^{h-1} \quad (2.18)$$

Melalui metode Newton-Rhapson, perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan perhitungan arus pada transmisi dan daya keluar masuk bus seperti berikut.

$$P_i - jQ_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j + \delta_j) \quad (2.19)$$

Kemudian bagian riil dan imajiner dipisahkan, sehingga persamaan 2.18 menjadi seperti berikut.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \delta_j) \quad (2.20)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \delta_j) \quad (2.21)$$

Persamaan tersebut disederhanakan dalam bentuk matriks Jacobian. Elemen matriks Jacobian terdiri atas turunan parsial yang dievaluasi pada $\Delta \delta$ dan $\Delta |V|$, sehingga menjadi seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Elemen untuk J_1 adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial i}{\partial \theta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_i| \sin(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_i| \sin(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.24)$$

Elemen untuk J_2 adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_i|c_{\theta_i} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_i| \cos(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_i| \cos(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.26)$$

Elemen untuk J_3 adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial i}{\partial \theta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_i| \cos(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_i| \cos(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.28)$$

Elemen untuk J_4 adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_i|s_{\theta_i} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_i| s_{(\theta_i - \delta_i + \delta_j)} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_i| \sin(\theta_i - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.30)$$

$\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah power residual atau beda nilai yang dimasukkan dengan nilai yang dihitung. Persamaannya seperti berikut.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^s h - P_i^{(k)} \quad (2.31)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^s h - Q_i^{(k)} \quad (2.32)$$

Estimasi nilai dan sudut tegangan bus yang baru sebagai berikut ini.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} - \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.33)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| - \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.34)$$

Proses iterasi pada metode Newton-Rhapson untuk aliran daya akan berhenti jika memenuhi batasan berikut ini.

$$\Delta|P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (2.35)$$

$$\Delta|Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (2.36)$$

Arus pada saluran dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$I_i = y_i (V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.37)$$

Daya kompleks dari bus I ke bus j maupun sebaliknya dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2.38)$$

$$S_j = V_j I_i^* \quad (2.39)$$

Untuk perhitungan rugi-rugi daya pada setiap kombinasi pembangkit dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$S_L = S_i + S_j \quad (2.40)$$

2.3 Optimal Power Flow

Optimal power flow (OPF) merupakan optimisasi sistem tenaga dalam penjadwalan pembangkit dengan perhitungan aliran daya yang memperhatikan batasan pada saluran sehingga didapatkan nilai pembangkitan yang paling murah [3]. OPF merupakan pengembangan dari economic dispatch (ED) yang merupakan metode penjadwalan pembangkit sesuai permintaan beban [4]. Untuk memahami konsep OPF, kita dapat melihat konsep dasar dari economic dispatch yang dinyatakan dalam fungsi lagrangian

$$L = \sum F_i(P_i) + \lambda(P_{ti} + P_{li} - \sum P_i) \quad (2.41)$$

Kemudian untuk batasan pada economic dispatch dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_d + P_L \quad (2.42)$$

$$P_{i,m} \leq P_i \leq P_{i,M} \quad (2.43)$$

Dari persamaan 2.41, 2.42 dan 2.43 terlihat bahwa batasan pada economic dispatch daya yang dibangkitkan sama dengan beban. Selain itu, batasan pembangkitan generator atau generator limit juga dimasukkan dalam perhitungan economic dispatch. Keterbatasan perhitungan pada economic dispatch membuat OPF memainkan peranan penting dalam penjadwalan pembangkit. Secara umum persamaan OPF sama dengan ED, namun memiliki batasan yang lebih kompleks.

$$m \quad (x) = \sum_{i=1}^N C_i(P_G) = \sum_{i=1}^N (aP_G^2 + bP_G + c) \quad (2.44)$$

Pada persamaan tersebut konstanta a, b, dan c merupakan koefisien generator. Kemudian untuk batasan pada perhitungan OPF sebagai berikut.

Batasan kapasitas pembangkit

$$P_{G,m} \leq P_G \leq P_{G,M} \quad (2.45)$$

$$Q_{G,m} \leq Q_G \leq Q_{G,M} \quad (2.46)$$

Batasan tegangan

$$V_{m,m} \leq V_m \leq V_{M,m} \quad (2.47)$$

Batasan saluran

$$S_l \leq S_{l,m} \quad (2.48)$$

Dalam sistem tenaga listrik, kebutuhan akan daya listrik selalu berubah setiap waktunya. Oleh karena itu, OPF dikembangkan untuk dapat menyesuaikan permintaan beban yang disebut dengan dynamic optimal power flow (DOPF). Pada metode DOPF, permasalahan OPF untuk rentang waktu tertentu dapat diselesaikan dengan penambahan batasan ramp rate, yaitu batasan perubahan pembangkitan daya oleh masing-masing generator berdasarkan periode waktu.

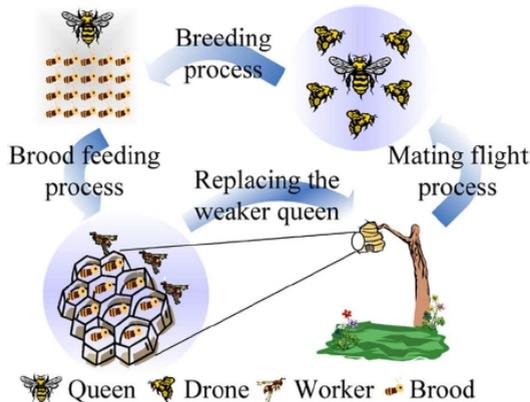
$$P_{G,t} - R_t \leq P_{G,t+1} \leq P_{G,t} + R_t \quad (2.49)$$

Persamaan matematik dari metode DOPF dapat dinyatakan sebagai berikut ini.

$$m \quad F(x) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N C_i(P_G) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N (aP_G^2 + bP_G + c) \quad (2.50)$$

2.4 Modified Honey Bee Mating Optimisation

Honey bee mating optimization (HBMO) merupakan algoritma yang mengadopsi proses perkawinan dan pembuahan dari ratu di sarang lebah. Pada tugas akhir ini, HBMO telah mengalami modifikasi pada proses mutasi sehingga algoritma yang digunakan bernama *Modified HBMO* (MHBMO) [7]. Proses perkawinan lebah madu yang merupakan konsep dasar MHBMO akan dijelaskan melalui gambar berikut ini.



Gambar 2.3 Proses perkawinan lebah madu

Ratu dan lebah jantan merupakan anggota yang paling penting pada koloni lebah. Ratu lebah adalah lebah yang memiliki tugas untuk reproduksi dan mengerami telur, sedangkan lebah jantan berperan sebagai ayah pada proses perkawinan. Ratu lebah memproduksi anggota baru pada keluarga lebah melalui proses perkawinan dengan 7 sampai 20 lebah jantan setiap musim kawin.

Terdapat beberapa istilah yang digunakan dalam algoritma MHBMO ini, yaitu :

1. *Queen* atau ratu lebah

Queen atau ratu lebah adalah individu terbaik yang ada dalam setiap iterasi. Pada iterasi awal, *queen* dipilih berdasarkan fungsi objektif terbaik atau dalam kasus OPF maka individu dengan harga pembangkitan paling murah akan dipilih menjadi *queen*. Pada iterasi selanjutnya, *queen* adalah individu terbaik antara *queen* iterasi sebelumnya dengan generasi terbaik pada iterasi selanjutnya.

2. *Drone* atau lebah jantan

Drone merupakan lebah yang akan mengalami proses perkawinan dengan *queen*. Tidak semua *drone* akan mengalami perkawinan dengan *queen*, karena pemilihan *drone* yang sehat berdasarkan fungsi probabilitas. *Drone* yang sudah mengalami perkawinan dengan *queen* tidak dapat digunakan lagi, sehingga setiap iterasi *drone* selalu dibangkitkan dengan nilai yang baru.

3. *Worker* atau lebah pekerja

Worker digunakan untuk memperbaiki kondisi dari *broods*. *Worker* pada algoritma ini berupa fungsi perbaikan sebelum *broods* akan dilahirkan. Di tugas akhir ini, fungsi *worker* yang digunakan hanya tiga, yaitu *random flip*, *1-point crossover*, dan *random new*.

4. *Spermatheca*

Spermatheca merupakan tempat penyimpanan sperma hasil perkawinan antara *queen* dan *drone*. Pengisian *spermatheca* akan berhenti apabila telah mencapai kapasitas maksimum atau kecepatan *queen* kurang dari kecepatan minimum.

5. *Broods*

Broods merupakan generasi baru hasil perkawinan antara *queen* dan *drone*. *Broods* dibentuk dari *spermatheca* yang mengalami *crossover* dengan gen *queen*. Kemudian mengalami perbaikan kondisi dengan fungsi *worker*. *Broods* juga akan menjadi cikal bakal dari mutant karena proses mutasi meminjam gen dari *broods* tersebut.

6. *Mutant*

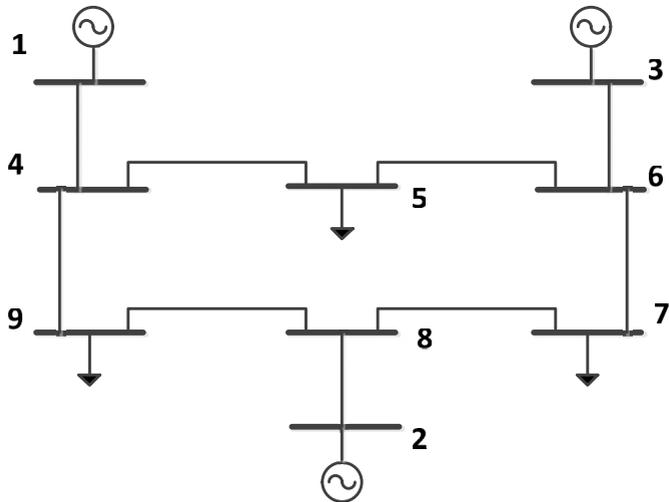
Mutant merupakan *broods* yang mengalami mutasi. Proses mutasi pada algoritma ini memiliki rumus tersendiri sehingga menghasilkan generasi yang berbeda dengan *broods*. *Mutant* akan memperbanyak variasi dari generasi pada suatu iterasi.

BAB 3

PENERAPAN *MODIFIED HONEY-BEE MATING OPTIMISATION* PADA *DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW*

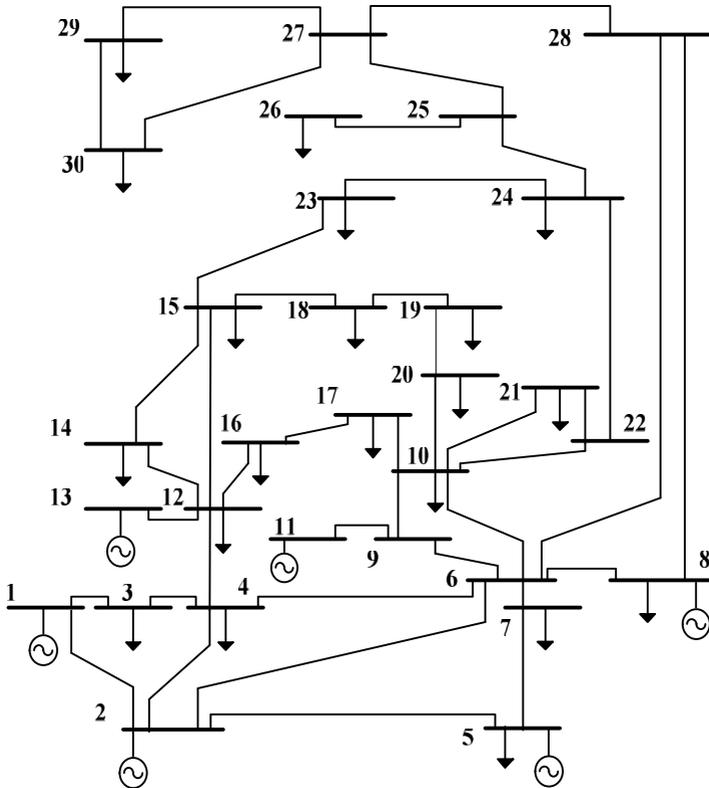
3.1 Sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus

Pada tugas akhir ini menggunakan sistem transmisi IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus. Untuk sistem transmisi IEEE 9 Bus terdiri dari 9 buah bus, 3 buah generator dan 9 saluran. *Single line diagram* dari sistem IEEE 9 Bus dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.1 *Single line diagram* sistem IEEE 9 bus

Untuk sistem transmisi IEEE 30 Bus terdiri dari 30 buah bus, 6 buah generator serta 41 saluran. *Single line diagram* dari sistem IEEE 30 Bus dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3.2 *Single line diagram* sistem IEEE 30 bus

3.1.1 Data Beban dan Saluran IEEE 9 Bus

Berikut ini adalah data sistem transmisi IEEE 9 Bus yang digunakan pada tugas akhir ini. Data-data tersebut terdiri dari data bus, data beban, data saluran, batasan kemampuan generator serta fungsi biaya generator. Data sistem IEEE 9 Bus dapat dilihat sebagai berikut pada tabel 3.1, 3.2, 3.3 dan 3.4.

Tabel 3.1 Data bus dan beban sistem IEEE 9 bus

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	<i>Slack</i>	0	0	0	0
2	Generator	0	0	163	0
3	Generator	0	0	85	0
4	Beban	0	0	0	0
5	Beban	90	30	0	0
6	Beban	0	0	0	0
7	Beban	100	35	0	0
8	Beban	0	0	0	0
9	Beban	125	50	0	0

Tabel 3.2 Data saluran sistem IEEE 9 bus

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	4	0	0.0576	0	250
4	5	0.017	0.092	0.079	250
5	6	0.039	0.17	0.179	150
3	6	0	0.0586	0	300
6	7	0.0119	0.1008	0.1045	150
7	8	0.0085	0.072	0.0745	250
8	2	0	0.0625	0	250
8	9	0.032	0.161	0.153	250
9	4	0.01	0.085	0.088	250

Tabel 3.3 Fungsi biaya sistem IEEE 9 bus

No. Bus	Koefisien Biaya (<i>non-smooth</i>)				
	a	b	c	e	f
1	150	5	0.11	100	0.063
2	600	1.2	0.085	200	0.063
3	335	1	0.1225	200	0.084

Tabel 3.4 Batasan kemampuan generator IEEE 9 bus

No. Bus	Pmin (MW)	Pmax (MW)
1	10	250
2	10	300
3	10	270

3.1.2 Data Beban dan Saluran IEEE 30 Bus

Berikut ini ditampilkan data sistem transmisi IEEE 30 Bus yang digunakan pada tugas akhir ini. Data-data tersebut terdiri dari data bus, data beban, data saluran, batasan kemampuan generator serta fungsi biaya generator dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 3.5 Data bus dan beban bistem IEEE 30 bus

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	<i>Slack</i>	0	0	260.2	-16.1
2	Generator	21.7	12.7	40	50
3	Beban	2.4	1.2	0	0
4	Beban	7.6	1.6	0	0
5	Generator	94.2	1.9	0	37
6	Beban	0	0	0	0
7	Beban	22.8	10.9	0	0
8	Generator	30.0	30.0	0	37.3
9	Beban	0	0	0	0
10	Beban	5.8	2.0	0	0
11	Generator	0	0	0	16.2
12	Beban	11.2	7.5	0	0
13	Generator	0	0	0	10.6
14	Beban	6.2	1.6	0	0
15	Beban	8.2	2.5	0	0
16	Beban	3.5	1.8	0	0

Tabel 3.5 Data bus dan beban sistem IEEE 30 bus (lanjutan)

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
17	Beban	9.0	5.8	0	0
18	Beban	3.2	0.9	0	0
19	Beban	9.5	3.4	0	0
20	Beban	2.2	0.7	0	0
21	Beban	17.5	11.2	0	0
22	Beban	0	0	0	0
23	Beban	3.2	1.6	0	0
24	Beban	8.7	6.7	0	0
25	Beban	0.0	0.0	0	0
26	Beban	3.5	2.3	0	0
27	Beban	0	0	0	0
28	Beban	0	0	0	0
29	Beban	2.4	0.9	0	0
30	Beban	10.6	1.9	0	0

Tabel 3.6 Data saluran sistem IEEE 30 bus

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	130
1	3	0.0452	0.1652	0.0204	130
2	4	0.057	0.1737	0.0184	65
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	130
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	130
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	65
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	90
5	7	0.046	0.116	0.0102	70

Tabel 3.6 Data saluran sistem IEEE 30 bus (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
6	7	0.0267	0.082	0.0085	130
6	8	0.012	0.042	0.0045	32
6	9	0	0.208	0	65
6	10	0	0.556	0	32
9	11	0	0.208	0	65
9	10	0	0.11	0	65
4	12	0	0.256	0	65
12	13	0	0.14	0	65
12	14	0.1231	0.2559	0	32
12	15	0.0662	0.1304	0	32
12	16	0.0945	0.1987	0	32
14	15	0.221	0.1997	0	16
16	17	0.0524	0.1923	0	16
15	18	0.1073	0.2185	0	16
18	19	0.0639	0.1292	0	16
19	20	0.034	0.068	0	32
10	20	0.0936	0.209	0	32
10	17	0.0324	0.0845	0	32
10	21	0.0348	0.0749	0	32
10	22	0.0727	0.1499	0	32
21	22	0.0116	0.0236	0	32
15	23	0.1	0.202	0	16
22	24	0.115	0.179	0	16
23	24	0.132	0.27	0	16
24	25	0.1885	0.3292	0	16
25	26	0.2544	0.38	0	16

Tabel 3.6 Data saluran sistem IEEE 30 bus (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
25	27	0.1093	0.2087	0	16
28	27	0	0.396	0	65
27	29	0.2198	0.4153	0	16
27	30	0.3202	0.6027	0	16
29	30	0.2399	0.4533	0	16
8	28	0.0636	0.2	0.0214	32
6	28	0.0169	0.0599	0.0065	32

Tabel 3.7 Fungsi biaya sistem IEEE 30 bus

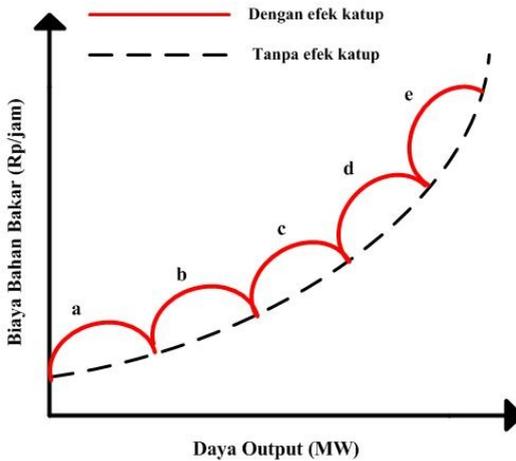
No. Bus	Koefisien Biaya (<i>non-smooth</i>)				
	a	b	c	e	f
1	0	2	0.00375	100	0.063
2	0	1.75	0.0175	200	0.063
5	0	1	0.0625	200	0.084
8	0	3.25	0.00834	300	0.042
11	0	3	0.025	100	0.042
13	0	3	0.025	100	0.077

Tabel 3.8 Batasan kemampuan generator sistem IEEE 30 bus

No. Bus	Pmin	Pmax
1	50	200
2	20	80
5	15	50
8	10	35
11	10	30
13	12	40

3.2 Efek Valve-Point

Pada pembangkit thermal memiliki beberapa katup uap yang berfungsi untuk menambah putaran turbin. Ketika katup uap ini dibuka, maka akan memengaruhi kurva biaya pembangkitan menjadi tidak mulus (*non-smooth curve*) akibat adanya riak pada fungsi biaya. Pengaruh dari pembukaan katup ini yang disebut dengan *valve-point effect* [5]. Berikut ini adalah gambar perbandingan antara kurva tanpa efek katup dan dengan efek katup :



Gambar 3.3 Kurva biaya bahan bakar

Akibat dari fungsi biaya yang tidak mulus ini adalah terjadi penambahan fungsi sinusoidal pada fungsi kuadrat biaya. Fungsi biaya akibat *valve-point effect* menjadi seperti berikut [6]:

$$F(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin[f_i(P_{i\min} - P_i)]| \quad (3.1)$$

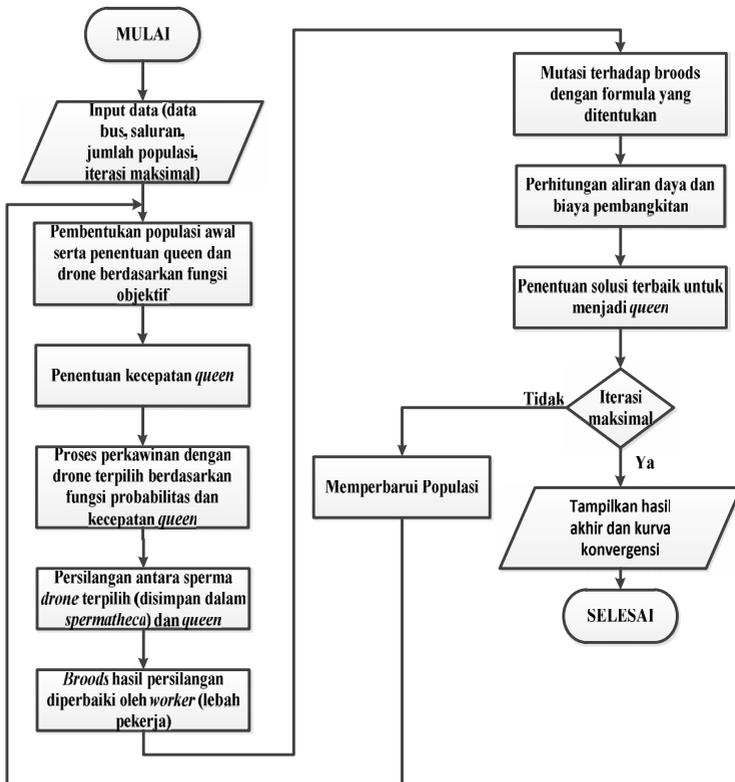
keterangan

- $F(P_i)$: biaya operasi unit pembangkit ke-i (Rp/h)
- P_i : daya keluaran unit pembangkit ke-i (MW)
- $P_{i\min}$: daya minimum unit pembangkit ke-i (MW)
- a_i, b_i, c_i, d_i : koefisien biaya unit pembangkit
- e_i, f_i : koefisien biaya akibat efek *valve-point*

3.3 Simulasi Algoritma MHBMO untuk Menyelesaikan DOPF dengan *Valve-Point Effect*

Untuk menyelesaikan permasalahan DOPF akibat efek *valve-point*, diperlukan metode yang mampu menyelesaikan perhitungan non-linear. Salah satu metode tersebut adalah MHBMO yang mengadopsi proses perkawinan lebah madu. MHBMO merupakan pengembangan dari metode HBMO yang memiliki proses mutasi dengan formula tertentu sehingga menambah jumlah calon solusi pada setiap iterasinya [7].

Perhitungan DOPF mempertimbangkan efek *valve-point* dengan MHBMO mengikuti diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3.4 Diagram alir metode MHBMO

3.3.1 Inisialisasi Awal

Pada inisialisasi awal, parameter-parameter yang dibutuhkan dalam metode MHBMO untuk menyelesaikan permasalahan DOPF dimasukkan. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut :

- Jumlah Iterasi Maksimal = 200
- Jumlah Populasi = 100
- Kecepatan Maksimum (S_{\max}) = 200
- Kecepatan Minimum (S_{\min}) = 10

Iterasi maksimal adalah jumlah maksimal pengulangan pada metode MHBMO. Jumlah populasi adalah total individu yang dibangkitkan, termasuk *queen* dan *drone*. Sedangkan kecepatan maksimum dan kecepatan minimum adalah batas kecepatan *queen* dalam proses perkawinan. Untuk menentukan kecepatan awal *queen*, digunakan rumus sebagai berikut :

$$S_q = \text{rand}() \times (S_{\max} - S_{\min}) + S_{\min} \quad (3.2)$$

keterangan

- S_{queen} = kecepatan awal *queen*
- $\text{rand}()$ = nilai acak antara 0 sampai 1
- S_{\max} = Kecepatan maksimal *queen*
- S_{\min} = Kecepatan minimal *queen*

Selain parameter-parameter di atas, data sistem IEEE 9 Bus dan IEEE 30 Bus juga dimasukkan.

3.3.2 Penentuan *Queen* dan *Drone*

Setelah populasi dibangkitkan, maka proses selanjutnya adalah menentukan *queen* dan *drone* dari populasi tersebut. *Queen* ditentukan berdasarkan fungsi objektif terbaik dari populasi, dalam kasus OPF maka fungsi objektif terbaik adalah individu dengan biaya pembangkitan paling murah. Kemudian individu yang tidak terpilih menjadi *queen* akan menjadi *drone*. Proses ini hanya terjadi pada iterasi pertama, karena pada iterasi selanjutnya *queen* sudah terpilih sehingga populasi terbangkitkan langsung menjadi *drone*.

3.3.3 Proses Perkawinan

Pada proses perkawinan, sperma *drone* terpilih akan dimasukkan ke dalam *spermatheca*. Proses perkawinan akan terhenti apabila kecepatan queen telah mencapai kecepatan minimal. Pemilihan *drone* yang dapat melakukan perkawinan berdasarkan fungsi probabilitas sebagai berikut :

$$P(D) = \exp\left(-\frac{\Delta(f)}{S(k)}\right) \quad (3.3)$$

Prob(d) merupakan probabilitas menambahkan sperma *drone* ke *spermatheca*, $\Delta(f)$ merupakan perbedaan absolut antara fitness *queen* dan fitness *drone*, dan $S(k)$ adalah kecepatan *queen* pada iterasi k . *Drone* hanya dapat melakukan proses perkawinan satu kali saja. Pada iterasi selanjutnya nilai dari *drone* akan diperbarui.

3.3.4 Proses Breeding

Proses *breeding* atau pembiakan terbagi atas dua bagian, yaitu *crossover* atau persilangan dan perbaikan oleh *worker* atau lebah pekerja. Pada proses persilangan, gen dari *drone* yang tersimpan di *spermatheca* akan disilangkan dengan gen dari *queen*. Hasil dari proses persilangan ini disebut dengan *broods* yang berjumlah sama dengan jumlah sperma pada *spermatheca*. *Broods* kemudian akan mengalami proses perbaikan oleh lebah pekerja.

Pada proses perbaikan, lebah pekerja akan memperbaiki *broods* dengan tiga fungsi, yaitu *random new*, *random flip*, dan *1-point crossover*. Fungsi *random new* mengganti *broods* dengan nilai baru yang dibangkitkan oleh lebah pekerja. Fungsi *random flip* memilih acak gen sperma *drone* dan menggantinya dengan nilai baru. Sedangkan fungsi *1-point crossover* melakukan persilangan gen sperma *drone* dengan nilai baru [7].

3.3.5 Mutasi

Proses mutasi menggunakan *broods* sebagai gen yang akan dimutasi. Pada proses mutasi ini, terdapat formula khusus yang digunakan untuk menambah variasi calon solusi terbaik pada setiap iterasi. Formula yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$X_m^i = X_{r1}^i + F_1 \times (X_q^i - X_{r2}^i) + F_1 \times (X_{r3}^i - X_{r4}^i) \quad (3.4)$$

$$X_m^i \quad 2 = X_q^i \quad + F_2 \times (X_{r1}^i - X_{r2}^i) \quad (3.5)$$

$$X_m^i \quad 3 = X_{r1}^i + F_3 \times (X_{r2}^i - X_{r3}^i) + F_3 \times (X_{r1}^i - X_{r4}^i) \quad (3.6)$$

$$X_m^i \quad 4 = \frac{(X_{r1}^i + X_{r2}^i + X_{r3}^i)}{3} + (\beta_2 - \beta_1)(X_{r1}^i - X_{r2}^i) + (\beta_3 - \beta_2)(X_{r2}^i - X_{r3}^i) + (\beta_1 - \beta_3)(X_{r3}^i - X_{r1}^i) \quad (3.7)$$

$$\beta_1 = \frac{|f(X_{r1}^i)|}{\beta^*}, \beta_2 = \frac{|f(X_{r2}^i)|}{\beta^*}, \beta_3 = \frac{|f(X_{r3}^i)|}{\beta^*} \quad (3.8)$$

$$\beta^* = |f(X_{r1}^i) + f(X_{r2}^i) + f(X_{r3}^i)| \quad (3.9)$$

$X_{r1}, X_{r2}, X_{r3}, X_{r4}$ adalah vektor yang dipilih dari broods di mana $X_{r1} \neq X_{r2} \neq X_{r3} \neq X_{r4}$. $F(x)$ adalah fungsi objektif, F_1 sampai F_3 adalah koefisien dengan rentang nilai antara 0 sampai 1. X_{mutant} adalah vektor mutasi pada setiap iterasi dan X_{queen} adalah vektor dari *queen*. Apabila nilai mutan melewati batasan kemampuan generator, maka mutan tersebut diganti dengan nilai batasan kemampuan generator yang dilewati. Kemudian mutan akan bergabung dengan *broods* untuk mendapatkan proses perbaikan agar memenuhi batasan kemampuan generator [4].

3.3.6 Memperbarui *Queen* dan *Drone*

Proses terakhir adalah memilih *queen* baru. Generasi terbaik pada setiap iterasi akan dibandingkan dengan *queen*. Apabila generasi terbaik memiliki fungsi objektif lebih baik daripada *queen* serta memenuhi batasan yang ada, maka *queen* akan diganti. Namun, jika *queen* tetap memiliki fungsi objektif terbaik maka *queen* akan dipertahankan. Sedangkan untuk *drone* pada setiap iterasi akan diperbarui.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dilakukan simulasi dan analisis menggunakan dua sistem yang berbeda untuk menguji kriteria dan metode program yang digunakan. Data sistem yang digunakan yaitu :

1. Sistem IEEE 9 Bus
2. Sistem IEEE 30 Bus

Kedua sistem tersebut akan disimulasikan dengan dua kasus yang berbeda. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi metode MHBMO dari berbagai kriteria. Simulasi pada bagian pertama akan menggunakan sistem IEEE 9 Bus. Pada simulasi bagian pertama akan dilihat pengaruh adanya efek *valve-point* pada perhitungan OPF serta evaluasi batasan-batasan yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk simulasi bagian kedua akan menggunakan sistem IEEE 30 Bus. Pada simulasi kedua ini, MHBMO akan diaplikasikan untuk menyelesaikan perhitungan DOPF selama 12 jam. Hasil simulasi akan dibandingkan metode yang umum digunakan, yakni PSO. Metode perbandingan digunakan untuk mengevaluasi performa dari metode MHBMO.

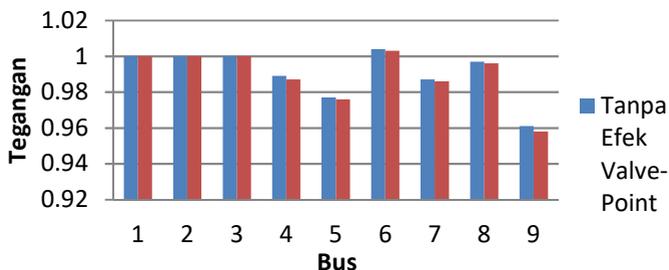
Pada setiap simulasi akan ditampilkan data tegangan, daya terbangkitkan, batasan saluran dan total biaya yang dihasilkan. Data-data tersebut yang kemudian akan digunakan untuk menganalisis performa dari MHBMO dalam menyelesaikan permasalahan DOPF akibat efek *valve-point*.

4.1 Sistem Standar IEEE 9 Bus

Pada simulasi bagian pertama ini akan dilihat pengaruh dari efek *valve-point*. Sehingga pada simulasi bagian pertama ini hanya akan dilakukan dalam rentang waktu satu jam saja. Berikut hasil simulasi untuk sistem IEEE 9 Bus.

4.1.1 Perbandingan Tegangan

Hasil simulasi OPF untuk tegangan pada setiap bus pada menggunakan MHBMO dengan melihat pengaruh dari efek *valve-point* dan tanpa efek *valve-point* dengan batasan $0.95 \leq V_m \leq 1.06$ adalah sebagai berikut ini :

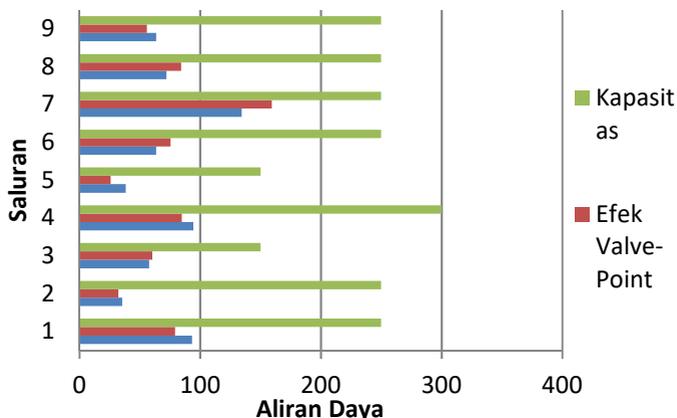


Gambar 4.1 Perbandingan tegangan pada setiap bus (IEEE 9 bus)

Pada bagian batasan tegangan, terlihat bahwa tidak ada tegangan yang melewati batas untuk kasus dengan efek *valve-point* maupun tanpa efek *valve-point*.

4.1.2 Perbandingan Aliran Daya Setiap Saluran

Berikut ini hasil simulasi OPF untuk aliran daya setiap saluran pada menggunakan MHBMO dengan melihat pengaruh dari efek *valve-point* dan tanpa efek *valve-point* :



Gambar 4.2 Perbandingan aliran daya pada setiap saluran (IEEE 9 bus)

Pada bagian aliran daya setiap saluran, tidak ada daya mengalir yang melebihi kapasitas setiap saluran untuk kasus dengan efek *valve-point* maupun tanpa efek *valve-point*.

4.1.3 Perbandingan Daya Terbangkitkan

Berikut ini hasil simulasi OPF untuk daya terbangkitkan yang akan dibandingkan dengan batasan kemampuan generator :

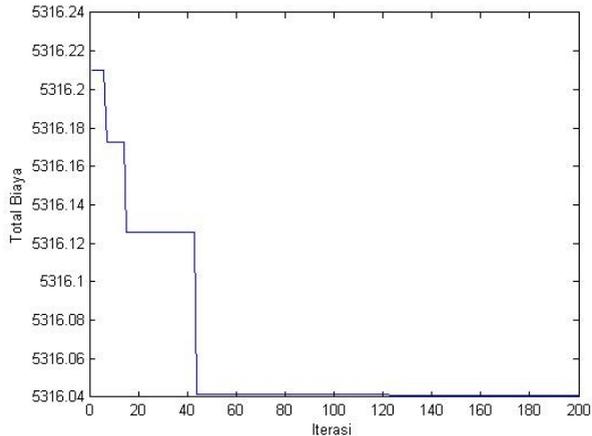
Tabel 4.1 Daya terbangkitkan pada setiap generator (IEEE 9 bus)

Unit	Daya Terbangkitkan (MW)		Batasan Kemampuan Generator (MW)	
	Tanpa Efek Katup	Efek Katup	Pmin	Pmax
P1	90.4964	75.6103	10	250
P2	134.3234	159.4032	10	300
P3	94.2688	84.7626	10	270

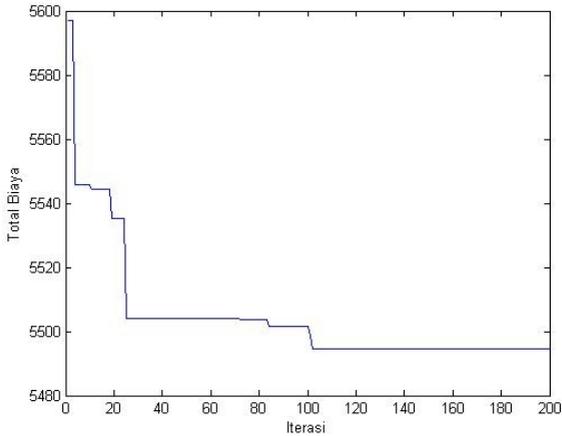
Pada bagian batasan kemampuan generator, daya yang terbangkitkan untuk kasus dengan efek *valve-point* maupun tanpa efek *valve-point*. berada dalam batas limit generator.

4.1.4 Kurva Konvergensi

Pada bagian ini akan ditunjukkan hasil simulasi OPF untuk kurva konvergensi menggunakan MHBMO.



Gambar 4.3 Grafik konvergensi OPF tanpa fungsi biaya tidak mulus (efek *valve-point*)



Gambar 4.4 Grafik konvergensi OPF dengan fungsi biaya tidak mulus (efek *valve-point*)

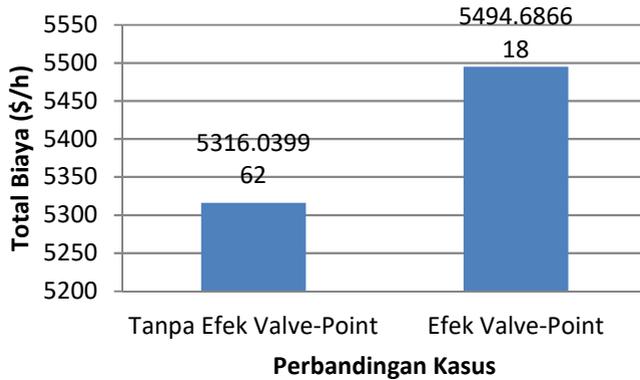
Kurva konvergensi menunjukkan bahwa untuk tanpa efek *valve-point* lebih mudah mencapai nilai konvergen dibandingkan dengan efek *valve-point*.

4.1.5 Perbandingan Biaya Pembangkitan

Berikut ini hasil simulasi OPF untuk biaya yang dihasilkan menggunakan MHBMO dengan melihat pengaruh dari efek *valve-point* dan tanpa efek *valve-point*. Hasil simulasi akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik yang berisi perbedaan daya pembangkitan dan biaya yang dihasilkan.:

Tabel 4.2 Perbandingan biaya pembangkitan (IEEE 9 bus)

Unit	Daya Terbangkitkan (MW)		Biaya (\$/jam)	
	Tanpa Efek Katup	Efek Katup	Tanpa Efek Katup	Efek Katup
P1	90.4964	75.6103	1503.337825	1240.6167
P2	134.3234	159.4032	2294.824022	2953.5564
P3	94.2688	84.7626	1517.878115	1300.5135
Total	319.0886	319.7761	5316.039962	5494.6866



Gambar 4.5 Perbandingan biaya pembangkitan (IEEE 9 bus)

Yang terakhir, total biaya yang dihasilkan akibat efek *valve-point* adalah 5494.6866 \$/jam atau lebih mahal dibandingkan tanpa efek *valve-point*, yakni 5316.03962 \$/jam.

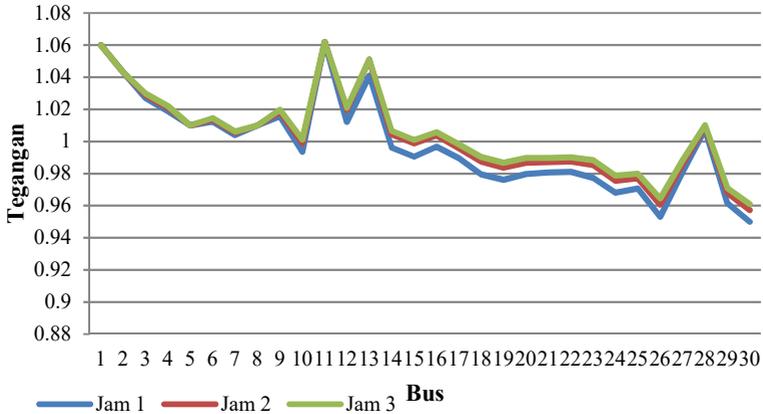
Hasil simulasi menunjukkan terdapat perbedaan antara pembangkitan dengan efek *valve-point* dan tanpa efek *valve-point*. Hal ini disebabkan karena MHBMO akan mencari biaya pembangkitan termurah untuk setiap kasus. Koefisien e dan f yang disebabkan oleh efek *valve-point* menyebabkan biaya pembangkitan untuk daya yang sama menjadi lebih mahal. Sehingga MHBMO akan mencari kombinasi pembangkitan yang dapat menghasilkan biaya lebih murah yang memengaruhi baik nilai tegangan setiap bus maupun aliran daya pada setiap saluran akan menjadi berbeda.

4.2 Sistem Standar IEEE 30 Bus

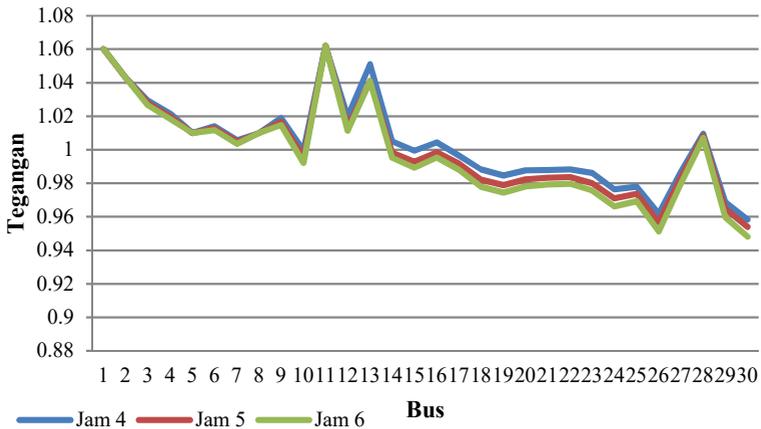
Pada simulasi bagian kedua ini metode MHBMO akan digunakan untuk menyelesaikan DOPF dengan efek *valve-point* pada sistem IEEE 30 Bus. Simulasi dilakukan untuk periode selama 12 jam dengan level beban yang berbeda setiap jam. Level beban yang digunakan adalah 269.23 MW, 252.226 MW, 240.89 MW, 249.392 MW, 257.894 MW, 274.898 MW, 266.396 MW, 255.06 MW, 246.558 MW, 239.473 MW, 243.724 MW dan 260.728 MW.

4.2.1 Perbandingan Tegangan

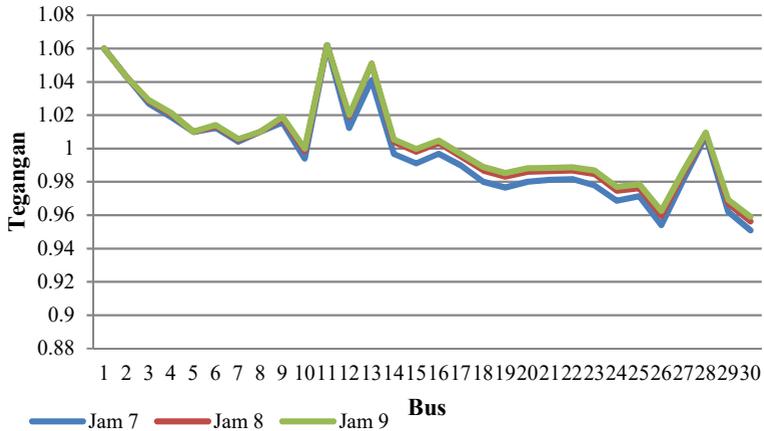
Pada simulasi IEEE 30 Bus bagian pertama akan dievaluasi tegangan bus terhadap batasan tegangan, yaitu $0.95 \leq V_m \leq 1.06$. Hasil tegangan juga akan dibandingkan untuk setiap jam.



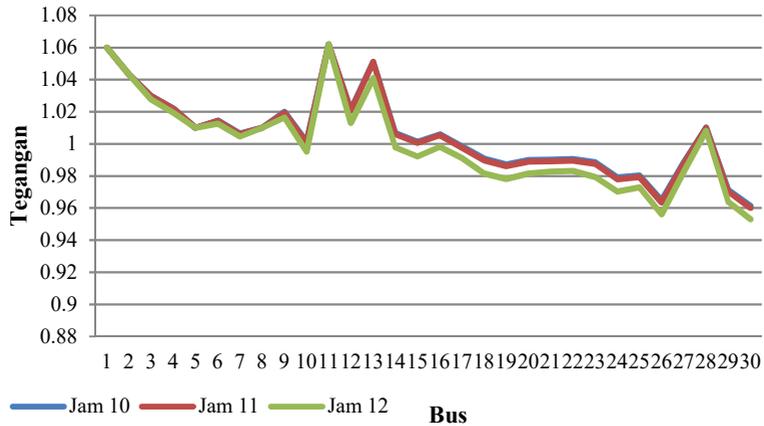
Gambar 4.6 Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 1-3



Gambar 4.7 Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 4-6



Gambar 4.8 Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 7-9



Gambar 4.9 Perbandingan tegangan pada setiap bus jam ke 10-12

Untuk evaluasi pertama, tegangan bus memenuhi batas yang ditentukan, $0.95 \leq V_m \leq 1.06$ selama periode 12 jam. Hal ini terjadi pada metode MHBMO dan PSO. Pengaruh perbedaan level beban pada perubahan tegangan bus adalah semakin besar beban pada suatu bus, maka tegangan pada bus tersebut semakin kecil, begitu pula sebaliknya.

4.2.2 Perbandingan Aliran Daya Setiap Saluran

Pada bagian kedua, data yang ditampilkan adalah aliran daya setiap saluran yang akan dibandingkan setiap jam pada saluran yang sama serta dibandingkan dengan kapasitas tiap saluran. Berikut ini adalah hasil aliran daya setiap jam dengan efek *valve-point* pada jam 1 sampai 4 :

Tabel 4.3 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 1-4

Dari Bus	Ke Bus	Jam 1 (MVA)	Jam 2 (MVA)	Jam 3 (MVA)	Jam 4 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	2	122.7427	114.7687	87.2426	99.4656	130
1	3	62.8844	59.1314	51.5177	54.5739	130
2	4	31.5918	29.8015	29.8793	29.4645	65
3	4	58.876	55.4865	48.3652	51.1839	130
2	5	59.3339	54.7896	52.0734	53.6847	130
2	6	43.4335	40.9818	39.9208	39.7728	65
4	6	51.8981	49.0453	44.4228	45.4124	90
5	7	11.9937	9.8374	8.2374	9.8199	70
6	7	31.0517	28.2667	26.2028	28.1691	130
6	8	17.8847	17.8061	17.1322	15.1139	32
6	9	17.2645	16.8787	15.8791	16.2415	65
6	10	12.6571	11.812	11.1672	11.5796	32
9	11	25.5744	23.4337	22.8832	23.5684	65
9	10	35.8517	32.5594	31.2158	32.4991	65
4	12	30.4833	28.6805	26.7671	27.8966	65
12	13	24.2552	25.7216	24.8785	25.4856	65
12	14	8.0891	7.703	7.3507	7.5906	32
12	15	19.1512	18.4073	17.5609	18.095	32
12	16	8.4102	8.4486	8.0574	8.2415	32
14	15	1.9347	1.9596	1.8734	1.9201	16
16	17	4.5671	4.8693	4.65	4.7197	16
15	18	6.2681	6.1522	5.8645	6.0137	16
18	19	3.0538	3.1575	3.0104	3.061	16

Tabel 4.3 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 1-4 (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	Jam 1 (MVA)	Jam 2 (MVA)	Jam 3 (MVA)	Jam 4 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
19	20	6.5505	5.8783	5.6247	5.8859	32
10	20	8.8922	8.0475	7.6904	8.0301	32
10	17	5.6708	4.7957	4.5927	4.8699	32
10	21	18.1481	16.8843	16.1366	16.724	32
10	22	8.705	8.0815	7.7273	8.0105	32
21	22	1.8243	1.8075	1.7057	1.7554	32
15	23	6.5049	6.4659	6.1923	6.3575	16
22	24	6.7717	6.1809	5.9369	6.1644	16
23	24	3.1431	3.3433	3.2195	3.2876	16
24	25	0.7397	0.4923	0.4201	0.479	16
25	26	4.0522	3.7909	3.6173	3.7475	16
25	27	4.7827	4.2793	4.0294	4.2203	16
28	27	18.0821	16.6985	15.8503	16.4911	65
27	29	6.0967	5.6987	5.4349	5.6326	16
27	30	6.9277	6.4745	6.1741	6.3993	16
29	30	3.567	3.3382	3.186	3.3001	16
8	28	1.5805	2.1574	2.5953	2.6371	32
6	28	15.9302	14.998	14.2405	14.3927	32

Berdasarkan tabel 4.3 di atas, daya yang mengalir setiap saluran pada jam 1-4 tidak ada yang melanggar batasan kapasitas saluran. Berikut ini adalah hasil aliran daya setiap jam dengan efek *valve-point* pada jam 5 sampai 8 :

Tabel 4.4 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 5-8

Dari Bus	Ke Bus	Jam 5 (MVA)	Jam 6 (MVA)	Jam 7 (MVA)	Jam 8 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	2	108.4917	118.2711	125.9057	118.243	130

Tabel 4.4 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 5-8 (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	Jam 5 (MVA)	Jam 6 (MVA)	Jam 7 (MVA)	Jam 8 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	3	58.9595	63.7537	63.9956	60.3174	130
2	4	31.6034	33.9468	31.858	30.0521	65
3	4	55.2537	59.6394	59.9573	56.5875	130
2	5	56.8031	61.635	58.9568	55.5507	130
2	6	42.9336	46.0931	43.9457	41.4207	65
4	6	49.7338	53.2921	52.9587	49.8411	90
5	7	10.1638	11.909	11.2865	10.1618	70
6	7	28.6694	31.1176	30.1386	28.7105	130
6	8	18.1465	18.7442	19.0032	17.9029	32
6	9	17.5279	19.1431	18.3109	17.1371	65
6	10	12.3229	13.3536	12.8196	11.9779	32
9	11	24.232	25.0899	24.6577	23.572	65
9	10	33.9238	36.0537	34.9501	32.903	65
4	12	29.3988	31.9852	30.8138	29.1179	65
12	13	23.228	24.5165	23.863	25.9431	65
12	14	7.7596	8.2712	8.0226	7.7898	32
12	15	18.401	19.5968	19.0294	18.6133	32
12	16	8.1522	8.6613	8.4389	8.5407	32
14	15	1.8665	1.9829	1.9302	1.9802	16
16	17	4.4687	4.7292	4.6285	4.9192	16
15	18	6.0647	6.4498	6.276	6.2207	16
18	19	2.9852	3.1635	3.092	3.1911	16
19	20	6.2111	6.6413	6.4075	5.9455	32
10	20	8.4457	9.0347	8.7209	8.1407	32
10	17	5.3295	5.7217	5.494	4.8533	32
10	21	17.3349	18.4704	17.8987	17.072	32
10	22	8.3081	8.8481	8.5755	8.1705	32
21	22	1.7886	1.9302	1.8634	1.8322	32

Tabel 4.4 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 5-8 (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	Jam 5 (MVA)	Jam 6 (MVA)	Jam 7 (MVA)	Jam 8 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
15	23	6.2568	6.6349	6.4595	6.5318	16
22	24	6.4232	6.8076	6.6093	6.2431	16
23	24	3.0354	3.2023	3.1275	3.3729	16
24	25	0.7207	0.8553	0.7796	0.513	16
25	26	3.8781	4.1394	4.0087	3.8343	16
25	27	4.5999	4.9973	4.7895	4.3437	16
28	27	17.3133	18.6356	17.9601	16.9142	65
27	29	5.8314	6.2296	6.0303	5.7648	16
27	30	6.6257	7.0791	6.8521	6.5498	16
29	30	3.4145	3.6434	3.5289	3.3763	16
8	28	1.7385	1.3495	1.4336	2.0644	32
6	28	15.4536	16.426	16.0155	15.171	32

Berdasarkan tabel 4.4 di atas, daya yang mengalir setiap saluran pada jam 5-8 tidak ada yang melanggar batasan kapasitas saluran. Berikut ini adalah hasil aliran daya setiap jam dengan efek *valve-point* pada jam 9 sampai 12 :

Tabel 4.5 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 9-12

Dari Bus	Ke Bus	Jam 9 (MVA)	Jam 10 (MVA)	Jam 11 (MVA)	Jam 12 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	2	108.6484	99.629	93.249	102.3581	130
1	3	57.7755	53.7406	52.8988	57.7097	130
2	4	30.1789	28.4782	29.5347	32.1126	65
3	4	54.2507	50.4852	49.6475	54.0399	130
2	5	58.0789	51.2782	52.5341	57.4778	130
2	6	41.3698	38.7716	39.6943	43.1785	65
4	6	49.1472	45.3283	44.8465	48.6433	90
5	7	12.5703	8.4967	8.8511	10.5586	70
6	7	30.6681	26.3873	26.9365	29.2009	130

Tabel 4.5 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 9-12 (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	Jam 9 (MVA)	Jam 10 (MVA)	Jam 11 (MVA)	Jam 12 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
6	8	17.4729	17.2069	16.1895	16.3624	32
6	9	16.2899	15.7004	16.1498	17.8554	65
6	10	11.441	11.0576	11.341	12.5252	32
9	11	23.1783	22.823	23.0105	24.3521	65
9	10	31.8277	31.0116	31.5663	34.3089	65
4	12	27.8924	26.6332	27.1911	29.7112	65
12	13	25.3103	24.7781	25.0808	23.43	65
12	14	7.5403	7.315	7.4341	7.8351	32
12	15	18.0405	17.49	17.7532	18.5594	32
12	16	8.3097	8.0429	8.1376	8.1974	32
14	15	1.9264	1.8686	1.8916	1.8784	16
16	17	4.809	4.6522	4.6896	4.4757	16
15	18	6.0421	5.8491	5.9263	6.1064	16
18	19	3.1142	3.0104	3.0382	2.9939	16
19	20	5.7154	5.5708	5.6989	6.3051	32
10	20	7.8323	7.6234	7.7905	8.5666	32
10	17	4.6294	4.5273	4.6634	5.4336	32
10	21	16.5032	16.0391	16.3231	17.5248	32
10	22	7.8996	7.6803	7.8156	8.3985	32
21	22	1.7637	1.6971	1.7314	1.8115	32
15	23	6.3539	6.1731	6.2512	6.2999	16
22	24	6.0472	5.8996	5.9974	6.4885	16
23	24	3.2968	3.2129	3.2445	3.0502	16
24	25	0.4351	0.3971	0.4519	0.7623	16
25	26	3.7041	3.5957	3.6607	3.9216	16
25	27	4.1368	3.9871	4.1032	4.686	16
28	27	16.2503	15.7298	16.0765	17.5594	65
27	29	5.5667	5.402	5.5007	5.8976	16
27	30	6.3242	6.1367	6.2491	6.701	16
29	30	3.2621	3.167	3.2241	3.4526	16

Tabel 4.5 Perbandingan aliran daya setiap saluran jam 9-12 (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	Jam 9 (MVA)	Jam 10 (MVA)	Jam 11 (MVA)	Jam 12 (MVA)	Kapasitas Saluran (MVA)
8	28	2.3437	2.6277	2.629	1.9251	32
6	28	14.6067	14.1568	14.2559	15.3628	32

Berdasarkan tabel 4.5 di atas, daya yang mengalir setiap saluran pada jam 9-12 tidak ada yang melanggar batasan kapasitas saluran. Permintaan beban akan memengaruhi aliran daya setiap saluran. Oleh karena itu, daya yang mengalir setiap jamnya memiliki besaran yang berbeda.

4.2.3 Perbandingan Perubahan Daya Terbangkitkan

Pada bagian ketiga ini akan ditampilkan data perubahan daya setiap jam. Data perubahan daya akan dibandingkan dengan *ramp rate* setiap generator. Berikut ini adalah data perubahan daya setiap jam dengan mempertimbangkan efek *valve-point* :

Tabel 4.6 Perubahan daya pembangkitan setiap jam

Jam	Unit (MW)					
	1	2	5	8	11	13
1-2	-11.6057	-2.5524	0.0836	-1.5649	-2.0485	-0.5208
2-3	-14.1596	1.8108	-0.0028	-0.0408	0	0
3- 4	-5.5918	9.8964	0.0014	3.4924	0.7564	0
4-5	13.3395	0.4779	-0.002	-3.4876	-0.7564	0
5-6	14.4685	2.4208	-0.0093	1.4086	0.0683	0.0659
6-7	7.7861	-14.8395	0.0109	-1.4134	-0.0683	-0.0659
7-8	-11.2086	-1.3795	-0.0008	0.1619	0.0035	0.0233
8- 9	-12.1497	2.9612	-0.0043	-0.1619	-0.0035	-0.0233
9-10	-12.8939	5.0089	0.0117	0	0	0
10-11	-7.2259	9.7527	-0.0125	1.6448	0	0
11-12	13.8681	3.5932	0.0037	0.7986	0	0.0169

Selanjutnya akan ditampilkan data ramp rate setiap generator yang membatasi laju perubahan pembebanan generator. Berikut ini adalah data ramp rate setiap generator yang digunakan pada tugas akhir ini.

Tabel 4.7 Data ramp rate setiap generator

Ramp Rate (down)	20	15	10	8	8	10
Ramp Rate (up)	15	10	6	4	4	5

Pada tabel 4.7, ramp rate *down* merupakan batas pengurangan daya terbangkitkan dan ramp rate *up* adalah bata penambahan daya terbangkitkan pada generator. Berdasarkan tabel 4.6, terlihat bahwa tidak ada perubahan daya setiap jam yang melanggar batasan ramp rate.

4.2.4 Perbandingan Daya Terbangkitkan

Pada bagian keempat, akan dilihat perbedaan daya pembangkitan antara metode MHBMO dengan PSO. Berikut ini perbandingan daya terbangkitkan antara MHBMO dan PSO dengan mempertimbangkan efek *valve-point*.

Tabel 4.8 Daya terbangkitkan menggunakan MHBMO

Jam	Pembangkitan (MW)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	185.1744	34.6941	22.7723	11.6057	12.0485	12.5208
2	173.5687	32.1417	22.8559	10.0408	10	12
3	159.4091	33.9525	22.8531	10	10	12
4	153.8173	43.8489	22.8545	13.4924	10.7564	12
5	167.1568	44.3268	22.8525	10.0048	10	12
6	181.6253	46.7476	22.8432	11.4134	10.0683	12.0659
7	189.4114	31.9081	22.8541	10	10	12
8	178.2028	30.5286	22.8533	10.1619	10.0035	12.0233
9	166.0531	33.4898	22.849	10	10	12
10	153.1592	38.4987	22.8607	10	10	12
11	145.9333	48.2514	22.8482	11.6448	10	12
12	159.8014	51.8446	22.8519	12.4434	10	12.0169

Tabel 4.9 Daya terbangkitkan menggunakan PSO

Jam	Pembangkitan (MW)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	169.8908	45.0542	30.7069	10	10	12
2	155.2655	49.3941	22.8526	10.199	10	12
3	138.2836	53.9902	22.8538	10.183	10	12
4	143.7019	55.9296	22.854	11.8205	10	12
5	158.5835	57.853	15.0004	12.6977	10	12.0016
6	173.5695	61.6686	15	11.653	10.7411	12
7	182.4335	46.6686	15	10	10	12
8	185.622	31.6686	15	10	10	12
9	165.9232	41.6686	15	10	10	12
10	146.4525	51.6686	15	11.3308	10	12
11	147.5535	54.9587	15	11.4274	10	12
12	160.9333	53.0191	22.854	10.0346	10	12

Untuk evaluasi keempat, berdasarkan tabel 4.8 dan 4.9 daya terbangkitkan dari metode MHBMO memiliki perbedaan dengan hasil dari metode PSO. Hal ini disebabkan oleh adanya ramp rate yang memengaruhi perubahan daya setiap jam. Total daya yang dibangkitkan oleh metode MHBMO lebih besar dibandingkan hasil metode PSO. Hasil tersebut menunjukkan rugi saluran metode MHBMO lebih besar daripada metode PSO.

4.2.5 Perbandingan Biaya

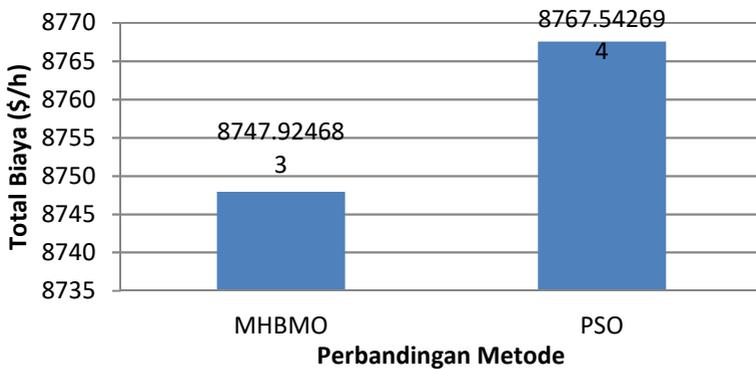
Pada bagian keempat, akan dilihat perbandingan biaya yang dihasilkan antara metode MHBMO dengan PSO. Berikut ini perbandingan biaya yang dihasilkan antara MHBMO dan PSO dengan mempertimbangkan efek *valve-point*.

Tabel 4.10 Perbandingan biaya pembangkitan MHBMO dan PSO

Jam	Biaya (\$/h)	
	MHBMO	PSO
1	784.44913	787.81458
2	720.49491	718.48403

Tabel 4.10 Perbandingan biaya pembangkitan MHBMO dan PSO

Jam	Biaya (\$/h)	
	MHBMO	PSO
3	676.8984	673.04998
4	708.85252	707.04061
5	741.50881	746.21462
6	805.49556	812.47876
7	771.18596	775.21749
8	731.13446	731.9497
9	698.97702	701.03438
10	670.1867	672.64093
11	685.58733	689.59917
12	753.15388	752.01844
Total Biaya (\$/h)	8747.9247	8767.5427



Gambar 4.10 Perbandingan biaya pembangkitan MHBMO dan PSO

Berdasarkan tabel 4.10 dan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa biaya pembangkitan yang dihasilkan oleh MHBMO 8747.9247 \$/h atau lebih murah daripada metode PSO, yaitu 8767.5427 \$/h. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa MHBMO memiliki hasil yang lebih baik daripada PSO dalam menyelesaikan permasalahan DOPF dengan efek *valve-point*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dari hasil simulasi DOPF dengan efek *valve-point* menggunakan MHBMO, maka pada tugas akhir ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode MHBMO dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan DOPF dengan efek *valve-point*. Hal ini terbukti dengan hasil simulasi yang sesuai dengan batasan-batasan yang ditentukan, yaitu batasan tegangan, kapasitas saluran, batasan pembangkitan serta *ramp rate*.
2. Pengaruh yang diakibatkan oleh efek *valve-point* adalah pada biaya pembangkitan. Total biaya yang dihasilkan akibat efek *valve-point* adalah 5494.6866 \$/jam, sedangkan untuk tanpa efek *valve-point* adalah 5316.039962 \$/jam. Hal ini menunjukkan total biaya yang dihasilkan akibat efek *valve-point* lebih mahal 178.6466 \$/h dibandingkan tanpa efek *valve-point*.
3. Metode MHBMO memiliki hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan PSO. Hal ini ditunjukkan dengan biaya yang dihasilkan oleh MHBMO adalah 8747.9247 \$/h, sedangkan untuk metode PSO adalah 8767.5427 \$/h. Hasil ini menunjukkan menunjukkan bahwa dalam menyelesaikan DOPF dengan efek *valve-point* metode MHBMO menghasilkan biaya pembangkitan lebih murah 19.618 \$/h daripada metode PSO.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian DOPF selanjutnya ditambahkan dampak selain efek *valve-point* agar hasil yang didapatkan semakin akurat.
2. Penambahan batasan-batasan lain pada penyelesaian DOPF, seperti line switching, tap transformer dan sebagainya.
3. Penggunaan metode lain dalam menyelesaikan permasalahan DOPF agar mendapatkan hasil yang lebih baik dari metode yang sudah ada seperti MHBMO dan PSO.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saadat, H., "*Power Sistem Analysis*", McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [2] Penangsang, Ontoseno. "*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*", Teknik Elektro ITS, Surabaya.
- [3] Anwar, Ibrahim. "*Optimal Power Flow untuk Non-Smooth Cost Function Menggunakan Particle Swarm Optimization*". Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS, 2013.
- [4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power, Generation, Operation, and Control", John Willey & Sons Inc, America, 1996.
- [5] M. Q. Wang, H. B. Gooi, S. X. Chen, S. Lu, "*A Mixed Integer Quadratic Programming for Dynamic Economic Dispatch with Valve Point Effect*", IEEE. September 2014
- [6] Nur Wahyudi, Afif. *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dengan Kurva Biaya Pembangkitan Tidak Mulus Menggunakan Particle Swarm Optimisation (PSO)*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS. 2014
- [7] T. Niknam, M.R Narimani, J.Aghaei, S.Tabataer, M. Nayeripour, "*Modified Honey Bee Mating Optimisation to solve dynamic optimal power flow considering generator constraints*", IET Generation, Transmission & Distribution. 7th June 2011.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

LAMPIRAN

Tegangan pada setiap bus jam ke 1-6

Nomor Bus	Jam 1 (p.u.)	Jam 2 (p.u.)	Jam 3 (p.u.)	Jam 4 (p.u.)	Jam 5 (p.u.)	Jam 6 (p.u.)
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.043	1.043	1.043	1.043	1.043	1.043
3	1.0271	1.0288	1.0298	1.0293	1.0278	1.0265
4	1.0189	1.0209	1.022	1.0214	1.0197	1.0182
5	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
6	1.0123	1.0137	1.0145	1.014	1.0129	1.0117
7	1.004	1.0054	1.0062	1.0057	1.0047	1.0035
8	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
9	1.0155	1.0185	1.0198	1.019	1.0166	1.0147
10	0.9936	0.9989	1.0011	0.9996	0.9955	0.9922
11	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062
12	1.0121	1.0196	1.021	1.02	1.0134	1.0113
13	1.041	1.051	1.051	1.051	1.041	1.041
14	0.9962	1.0044	1.0065	1.005	0.9982	0.9951
15	0.9906	0.9987	1.001	0.9994	0.9928	0.9893
16	0.9967	1.0037	1.0058	1.0044	0.9985	0.9954
17	0.9895	0.9958	0.9981	0.9965	0.9917	0.9881
18	0.9795	0.9875	0.9903	0.9883	0.9822	0.9779
19	0.9761	0.9838	0.9868	0.9847	0.9789	0.9744
20	0.9797	0.9868	0.9897	0.9877	0.9823	0.9781
21	0.9808	0.9871	0.9898	0.9879	0.9833	0.9792
22	0.9812	0.9875	0.9902	0.9883	0.9837	0.9796
23	0.9773	0.9854	0.9883	0.9862	0.98	0.9757
24	0.968	0.9755	0.9787	0.9764	0.9711	0.9662
25	0.9708	0.9771	0.98	0.9779	0.9737	0.9692
26	0.9531	0.9607	0.9644	0.9618	0.9568	0.9512
27	0.9811	0.986	0.9884	0.9868	0.9835	0.9799

Tegangan pada setiap bus jam ke 1-6 (lanjutan)

Nomor Bus	Jam 1 (p.u.)	Jam 2 (p.u.)	Jam 3 (p.u.)	Jam 4 (p.u.)	Jam 5 (p.u.)	Jam 6 (p.u.)
28	1.0076	1.0092	1.0101	1.0095	1.0083	1.007
29	0.9614	0.9678	0.971	0.9687	0.9647	0.9597
30	0.95	0.9572	0.961	0.9583	0.9539	0.9481

Tegangan pada setiap bus jam ke 7-12

Nomor Bus	Jam 7 (p.u.)	Jam 8 (p.u.)	Jam 9 (p.u.)	Jam 10 (p.u.)	Jam 11 (p.u.)	Jam 12 (p.u.)
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.043	1.043	1.043	1.043	1.043	1.043
3	1.027	1.0286	1.0292	1.0298	1.0296	1.0277
4	1.0188	1.0207	1.0213	1.0221	1.0218	1.0195
5	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
6	1.0123	1.0135	1.014	1.0146	1.0143	1.0127
7	1.0041	1.0052	1.0058	1.0063	1.006	1.0045
8	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
9	1.0156	1.0182	1.0191	1.02	1.0195	1.0164
10	0.9939	0.9984	0.9999	1.0013	1.0006	0.9951
11	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062
12	1.0123	1.0193	1.0203	1.0212	1.0207	1.0131
13	1.041	1.051	1.051	1.051	1.051	1.041
14	0.9966	1.0039	1.0054	1.0067	1.006	0.9977
15	0.991	0.9981	0.9998	1.0013	1.0005	0.9922
16	0.9969	1.0032	1.0047	1.006	1.0053	0.9981
17	0.9899	0.9952	0.9969	0.9984	0.9976	0.9912
18	0.98	0.9868	0.9889	0.9907	0.9897	0.9815
19	0.9766	0.9831	0.9852	0.9871	0.9861	0.9782
20	0.9801	0.9861	0.9882	0.99	0.989	0.9816
21	0.9812	0.9864	0.9884	0.9901	0.9892	0.9827
22	0.9816	0.9868	0.9888	0.9905	0.9896	0.9831

Tegangan pada setiap bus jam ke 7-12 (lanjutan)

Nomor Bus	Jam 7 (p.u.)	Jam 8 (p.u.)	Jam 9 (p.u.)	Jam 10 (p.u.)	Jam 11 (p.u.)	Jam 12 (p.u.)
23	0.9778	0.9847	0.9868	0.9886	0.9876	0.9794
24	0.9686	0.9747	0.977	0.9791	0.978	0.9703
25	0.9714	0.9763	0.9785	0.9803	0.9793	0.973
26	0.954	0.9597	0.9625	0.9649	0.9635	0.956
27	0.9817	0.9854	0.9871	0.9887	0.9879	0.983
28	1.0076	1.009	1.0096	1.0102	1.0099	1.0081
29	0.9622	0.9669	0.9693	0.9714	0.9703	0.964
30	0.9509	0.9562	0.959	0.9614	0.9601	0.953

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BIOGRAFI PENULIS



Hilmy Kharisma atau yang akrab dipanggil Hilmy merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara ini lahir di Denpasar pada tanggal 14 Maret 1995. Sejak kecil dia memperoleh pendidikan di Denpasar, mulai dari TK Aisyiah Busthanul Athfal 3 Denpasar, SMPN 7 Denpasar hingga tingkat atas di SMAN 4 Denpasar. Pada tahun 2013, dia melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, tepatnya di Jurusan Teknik Elektro. Dia menekuni bidang Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan dia aktif di kegiatan HIMATEKTRO ITS dan menjadi Ketua HIMATEKTRO ITS pada periode 2015/2016. Motto hidupnya adalah “Semangat Nomor Satu”.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---