



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE184801**

***SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT***  
**MEMPERTIMBANGKAN KAPASITAS DAN RUGI DAYA**  
**SALURAN TRANSMISI DENGAN KURVA BIAYA TIDAK**  
**RATA MENGGUNAKAN ALGORITMA *BINARY PARTICLE***  
***SWARM OPTIMIZATION (BPSO) PADA SISTEM IEEE 30***  
**BUS**

Ahmad Saad Daroini  
NRP. 07111540007003

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE184801**

***SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT***  
**MEMPERTIMBANGKAN KAPASITAS DAN RUGI DAYA**  
**SALURAN TRANSMISI DENGAN KURVA BIAYA TIDAK**  
**RATA MENGGUNAKAN ALGORITMA *BINARY PARTICLE***  
***SWARM OPTIMIZATION* (BPSO) PADA SISTEM IEEE 30**  
**BUS**

Ahmad Saad Daroini  
NRP. 07111540007003

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - EE184801**

**Security Constrained Unit Commitment Considering  
Transmission Line Capacity and Power Loss With  
Non-Smooth Generation Cost Function Using Binary  
Particle Swarm Optimization (BPSO) Algorithm on  
IEEE 30 Bus System**

Ahmad Saad Daroini  
NRP. 07111540007003

Supervisor

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "***Security Constrained Unit Commitment Mempertimbangkan Kapasitas Dan Rugi Daya Saluran Transmisi Dengan Kurva Biaya Tidak Rata Menggunakan Algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Pada Sistem IEEE 30 Bus***" adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan 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, 25 Juni 2019



Ahmad Saad Daroini  
07111540007003

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT

MEMPERTIMBANGKAN KAPASITAS DAN RUGI DAYA  
SALURAN TRANSMISI DENGAN KURVA BIAYA TIDAK  
RATA MENGGUNAKAN ALGORITMA *BINARY PARTICLE  
SWARM OPTIMIZATION (BPSO)* PADA SISTEM IEEE 30 BUS



## 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



Menyerujui:



Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Ni Ketut Arvani, MT.  
NIP. 196509011991032002

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
NIP. 197411292000121001



Sepuluh Nopember



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***Security Constrained Unit Commitment* Mempertimbangkan  
Kapasitas Dan Rugi Daya Saluran Transmisi Dengan Kurva Biaya  
Tidak Rata Menggunakan Algoritma *Binary Particle Swarm  
Optimization (BPSO)* Pada Sistem IEEE 30 Bus**

Nama Mahasiswa : Ahmad Saad Daroini  
NRP : 07111540007003  
Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.  
NIP : 196509011991032002  
Dosen Pembimbing II : Dr. Rony Seto Wibowo, ST, MT.  
NIP : 197411292000121001

### **ABSTRAK**

Pada zaman ini efektifitas dan efisiensi pekerjaan manusia sangat dipengaruhi oleh ketersediaan energi listrik, sehingga sistem tenaga listrik harus dapat dioperasikan dengan aman dan optimal secara ekonomi. Dalam pemenuhan kebutuhan listrik yang selalu berubah dalam 24 jam, dibutuhkan operasi penjadwalan (*On/Off*) unit pembangkit untuk mendapatkan pembangkitan yang paling ekonomis. Operasi penjadwalan (*On/Off*) unit pembangkit yang biasa disebut *Unit Commitment (UC)* bertujuan untuk mendapatkan biaya operasi yang minimum dan dapat memenuhi kebutuhan beban yang selalu berubah setiap jam tanpa mengabaikan batasan kemampuan pembangkit. Namun, *Unit Commitment (UC)* belum mampu menjadwalkan pembangkitan dengan mempertimbangkan keamanan sistem, sehingga dibutuhkan operasi *Security Constrained Unit Commitment (SCUC)* yang dapat mempertimbangkan keamanan saluran transmisi. Tugas akhir ini akan membahas operasi *Security Constrained Unit Commitment (SCUC)* yang mempertimbangkan kapasitas dan rugi-rugi (*losses*) saluran transmisi dengan kurva biaya yang tidak mulus pada sistem IEEE 30 bus. Tugas akhir ini menggunakan algoritma BPSO (*Binary Partical Swarm Optimization*) untuk menyelesaikan masalah SCUC untuk mendapatkan hasil akhir yang aman dan optimal secara ekonomi. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa metode BPSO mampu melakukan operasi perhitungan SCUC dengan kurva biaya yang tidak rata.

**Kata Kunci:** SCUC, *losses*, kapasitas saluran, BPSO

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Security Constrained Unit Commitment Considering Transmission  
Capacity and Power Loss with Non-Smooth Generation Cost  
Function Using Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)  
Algorithm on IEEE 30 Bus System**

Nama Mahasiswa : Ahmad Saad Daroini  
NRP : 07111540007003  
Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.  
NIP : 196509011991032002  
Dosen Pembimbing II : Dr. Rony Seto Wibowo, ST, MT.  
NIP : 197411292000121001

**ABSTRACT**

Nowadays, the effectiveness and efficiently of human activity depended by the availability of electricity, with this condition the power system must be operated securely and economically optimal. To meet the hourly electrical fluctuate need on 24 hours, unit commitment (UC) could be used for generation scheduling (on/off) by considering generator constrains to get the most economical optimum power system operation. However, unit commitment operation couldn't scheduling generator unit considering the security of the transmission line as the system constrain. This paper discusses Security Constrained Unit Commitment (SCUC) considering transmission capacity and power transmission loss with non-smooth generation cost function on IEEE 30 bus system. Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) algorithm will be used to solve SCUC problem to get economically optimum and considering the transmission line security. The test result shows that BPSO method is able to solve and calculate SCUC problem considering transmission capacity and power transmission loss with non-smooth generation cost function with maintaining the constrains such as equality constrain, inequality constrain, minimum up and down time, ramp rate, and transmission line capacity.

**Keywords:** SCUC, losses, transmission line capacity, BPSO

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Security Constrained Unit Commitment Mempertimbangkan Kapasitas Dan Rugi Daya Saluran Transmisi Dengan Kurva Biaya Tidak Rata Menggunakan Algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Pada Sistem IEEE 30 Bus”**. Sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu, Ayah, Mbak Rofiq, Mbak Nila, Farha, Mas Ipung, Mas Rohim, Syifa, Yasmin Dan Bima yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat kepada penulis baik dalam keadaan senang ataupun susah.
3. Kementrian Agama RI yang telah memberikan beasiswa kepada penulis untuk kuliah di ITS
4. KH Ahmad Hisyam Syafaat selaku pimpinan dan pengasuh Pondok Pesantren Darussalam Blokagung yang telah memberikan banyak ilmu dan inspirasi kepada penulis.
5. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT. dan Rony Seto Wibowo, S.T., MT. Dr. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
6. Prof. Ontoseno Penangsang, Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T, Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., MT. beserta teman-teman asisten, trainee dan calon trainee serta member lab PSSL B103 yang telah menciptakan dan memberikan dukungan, penjelasan, dan juga suasana kondusif dalam menyelesaikan tugas akhir.
7. Bapak Suyanto dan Mas Aji yang telah memberikan banyak motivasi dan arahan sejak awal pengajuan tugas akhir ini sampai kini selesainya tugas akhir ini.

8. Seluruh asisten Bani ETAB (Baihaqi, Nanang, Arba, Hoteng, Toteki, Kipot, Elpha, Fira, Keke, Cece, dan Mbak Farida) yang banyak memberikan bantuan selama penulis menjadi asisten *Power System Simulation Laboratory* 2017-2018
9. Trainee angkatan 2016 dan 2017 yang merupakan sobat perjuangan PSSSL 2017– 2019.
10. Teman-teman E55ANTRI (Jauhar, Bojar, Athfi, dan Fatah) sebagai santri beasiswa depag seperjuangan selama kuliah di Teknik Elektro ITS
11. Keluarga Besar CSSMoRA ITS, CSSMoRA ITS D'15, dan CSSMoRA yang banyak memberikan dukungan dan hiburan kepada penulis
12. Keluarga besar Pondok Pesantren Darussalam atas doa dan dukungannya selama ini
13. Seluruh teman-teman e55, terima kasih atas cerita dan perhatiannya selama ini.
14. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah berjasa selama empat tahun membantu penulis selama kuliah dan telah memberikan banyak ilmu yang bermanfaat.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, 25 Juni 2019

Penulis

# DAFTAR ISI

|  |       |
|--|-------|
| <b>HALAMAN SAMPUL</b>  |       |
| <b>HALAMAN JUDUL</b>   |       |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN</b>                                  |       |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b>   |       |
| <b>ABSTRAK</b> .....   | xi    |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | xiii  |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....  | xv    |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....  | xvii  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....   | xxi   |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....  | xxiii |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....                                     | 1     |
| <b>1.1 Latar Belakang</b> .....                                    | 1     |
| <b>1.2 Permasalahan</b> .....                                      | 2     |
| <b>1.3 Tujuan</b> .....  | 2     |
| <b>1.4 Batasan Masalah</b> .....                                   | 2     |
| <b>1.5 Metodologi</b> .....  | 3     |
| <b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....                             | 4     |
| <b>1.7 Relevansi</b> .....   | 5     |
| <b>BAB 2 OPERASI OPTIMASI PENJADWALAN TENAGA LISTRIK</b> .....     | 7     |
| <b>2.1 Sistem Tenaga Listrik</b> .....                             | 7     |
| <b>2.1.1 Pembangkitan</b> .....                                    | 7     |
| <b>2.1.2 Transmisi</b> .....                                       | 8     |
| <b>2.1.3 Distribusi</b> .....                                      | 9     |
| <b>2.1.4 Beban</b> .....   | 9     |
| <b>2.2 Analisa Aliran Daya</b> .....                               | 9     |
| <b>2.2.1 Persamaan Aliran Daya</b> .....                           | 10    |
| <b>2.2.2 Metode Newton-Rhapson</b> .....                           | 12    |
| <b>2.3 Perencanaan Operasi Optimum Sistem Tenaga Listrik</b> ..... | 16    |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 2.3.1        | Unit Commitment[5].....   | 16        |
| 2.3.2        | Kombinasi Unit Pembangkit Tenaga Listrik .....  | 18        |
| 2.3.3        | Economic Dispatch .....   | 18        |
| 2.3.4        | Optimal Power Flow .....  | 19        |
| 2.3.5        | Security Constrained Unit Commitment .....  | 22        |
| 2.4          | Fungsi Biaya Pembangkitan Tidak Mulus .....   | 22        |
| 2.5          | Particle Swarm Optimization .....   | 23        |
| 2.5.1        | Binary Particle Swarm Optimization .....  | 25        |
| 2.5.2        | Diagram Alir PSO .....  | 26        |
| <b>BAB 3</b> | <b>PENERAPAN ALGORITMA BPSO PADA PERMASALAHAN SCUC MEMPERTIMBANGKAN FUNGSI BIAYA TIDAK MULUS PADA SISTEM IEEE 30 BUS.....</b> | <b>27</b> |
| 3.1          | Sistem IEEE 30 Bus .....  | 27        |
| 3.2          | Penerapan Algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Pada Security Constrained Unit Commitment (SCUC).....           | 33        |
| 3.2.1        | Inisiasi Awal Algoritma Binary Particle Swarm Optimization .....  | 34        |
| 3.2.2        | Penentuan Posisi dan Kecepatan Awal Partikel .....  | 34        |
| 3.2.3        | Perhitungan Fungsi Biaya Menggunakan Algoritma PSO.....   | 35        |
| 3.2.4        | Evaluasi <i>Fitness</i> Populasi .....  | 39        |
| 3.2.5        | Penentuan <i>Pbest</i> dan <i>Gbest</i> .....   | 40        |
| 3.2.6        | Update Kecepatan dan Posisi Partikel .....  | 40        |
| 3.2.7        | Pembatasan Pergerakan Partikel .....  | 41        |
| 3.2.8        | Kombinasi Hasil Untuk Penjadwalan .....   | 41        |
| <b>BAB 4</b> | <b>SIMULASI DAN ANALISA .....</b>   | <b>43</b> |
| 4.1          | Hasil Simulasi Pada Kondisi Normal .....  | 43        |
| 4.1.1        | Daya Aktif Terbangkit Setiap Unit Pembangkit .....  | 43        |
| 4.1.2        | Power Balance .....   | 44        |
| 4.1.3        | Waktu Nyala dan Padam Minimum .....   | 45        |

|                                    |  |    |
|------------------------------------|--|----|
| 4.1.4                              | Perubahan Daya Terbangkit Setiap Level Beban<br>( <i>Ramprate</i> )..... | 46 |
| 4.1.5                              | Aliran Daya Pada Saluran .....   | 47 |
| 4.2                                | Hasil Simulasi Pada Kondisi Kontingensi Saluran N-1 .....                | 53 |
| 4.2.1                              | Daya Terbangkit Setiap Unit Pembangkit .....                             | 53 |
| 4.2.2                              | Power Balance .....  | 54 |
| 4.2.3                              | Waktu Nyala dan Padam Minimum.....                                       | 55 |
| 4.2.4                              | Perubahan Daya Terbangkit Setiap Level Beban<br>( <i>Ramprate</i> )..... | 56 |
| 4.2.5                              | Aliran Daya Pada Saluran .....   | 57 |
| 4.3                                | Perbandingan Total Biaya Pembangkitan .....                              | 62 |
| 4.3.1                              | Kasus pertama .....  | 63 |
| 4.3.2                              | Kasus Kedua .....  | 63 |
| 4.3.3                              | Kasus Ketiga .....   | 64 |
| 4.4                                | Analisa Hasil Simulasi .....   | 65 |
| 4.4.1                              | Kondisi Normal .....   | 65 |
| 4.4.2                              | Kondisi Kontingensi N-1.....   | 66 |
| 4.4.3                              | Perbandingan Biaya Total Pembangkitan .....                              | 68 |
| <b>BAB 5 PENUTUP</b> .....         |  | 71 |
| 5.1                                | Kesimpulan .....   | 71 |
| 5.2                                | Saran .....  | 72 |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....        |  | 73 |
| <b>LAMPIRAN</b> .....              |  | 75 |
| <b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b> ..... |  | 83 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 2. 1</b> | Sistem tenaga listrik .....   | 7  |
| <b>Gambar 2. 2</b> | Sistem pembangkit .....   | 8  |
| <b>Gambar 2. 3</b> | Gambaran bus pada sistem tenaga listrik .....   | 11 |
| <b>Gambar 2. 4</b> | Ilustrasi metode Newton-Raphson .....   | 13 |
| <b>Gambar 2. 5</b> | Kurva biaya pembangkitan .....  | 22 |
| <b>Gambar 2. 6</b> | Konsep pencarian Pbest dan Gbest .....  | 23 |
| <b>Gambar 2. 7</b> | Diagram alir algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> ....  | 26 |
| <b>Gambar 3. 1</b> | Profil beban sistem IEEE 30 bus jam ke 1-12 .....   | 31 |
| <b>Gambar 3. 2</b> | <i>Single Line Diagram</i> sistem IEEE 30 Bus.....  | 32 |
| <b>Gambar 3. 3</b> | Diagram alir BPSO untuk menyelesaikan SCUC .....  | 33 |
| <b>Gambar 3. 4</b> | Diagram alir PSO Untuk OPF dengan Fungsi Biaya<br>Tidak Mulus .....   | 35 |
| <b>Gambar 4. 1</b> | Perbandingan daya maksimal dengan daya terbangkit<br>dan cadangan berputar .....                              | 66 |
| <b>Gambar 4. 2</b> | Perbandingan daya maksimal dengan daya terbangkit<br>dan cadangan berputar pada kondisi kontingensi N-1 ..... | 68 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 3. 1</b> Data bus dan beban IEEE 30-Bus.....  | 27 |
| <b>Tabel 3. 2</b> Data saluran sistem IEEE 30-Bus.....   | 28 |
| <b>Tabel 3. 3</b> Batasan kemampuan pembangkit sistem IEEE 30-Bus.....                                 | 30 |
| <b>Tabel 3. 4</b> Fungsi biaya bahan bakar sistem IEEE 30-Bus.....                                     | 30 |
| <b>Tabel 3. 5</b> Profil beban sistem.....   | 31 |
| <b>Tabel 4. 1</b> Batas daya terbangkit minimum dan maksimum .....                                     | 43 |
| <b>Tabel 4. 2</b> Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi normal.                           | 43 |
| <b>Tabel 4. 3</b> <i>Power Balance</i> pada kondisi normal .....                                       | 44 |
| <b>Tabel 4. 4</b> Waktu nyala dan padam minimum .....  | 45 |
| <b>Tabel 4. 5</b> Kombinasi penjadwalan pembangkit setiap jam pada<br>kondisi normal.....              | 45 |
| <b>Tabel 4. 6</b> Batas <i>ramprate</i> setiap unit pembangkit .....                                   | 46 |
| <b>Tabel 4. 7</b> Perubahan daya unit pembangkit setiap jam .....                                      | 46 |
| <b>Tabel 4. 8</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal<br>jam ke 1-4.....            | 47 |
| <b>Tabel 4. 9</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal<br>jam ke 5-8.....            | 49 |
| <b>Tabel 4. 10</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal<br>jam ke 9-12.....          | 51 |
| <b>Tabel 4. 11</b> Batas daya terbangkit minimum dan maksimum.....                                     | 53 |
| <b>Tabel 4. 12</b> Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi<br>kontingensi N-1 .....         | 53 |
| <b>Tabel 4. 13</b> <i>Power Balance</i> pada kondisi kontingensi N-1 .....                             | 54 |
| <b>Tabel 4. 14</b> Waktu nyala dan padam minimum .....   | 55 |
| <b>Tabel 4. 15</b> Kombinasi penjadwalan pembangkit setiap jam pada<br>kondisi kontingensi N-1 .....   | 55 |
| <b>Tabel 4. 16</b> Batas <i>ramprate</i> setiap unit pembangkit .....                                  | 56 |
| <b>Tabel 4. 17</b> Perubahan daya unit pembangkit setiap jam .....                                     | 56 |
| <b>Tabel 4. 18</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi<br>kontingensi N-1 jam ke 1-4.....  | 57 |
| <b>Tabel 4. 19</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi<br>kontingensi N-1 jam ke 5-8.....  | 59 |
| <b>Tabel 4. 20</b> Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi<br>kontingensi N-1 jam ke 9-12..... | 60 |
| <b>Tabel 4. 21</b> Perbandingan total biaya pembangkitan kondisi normal                                |    |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
|                    | dengan kondisi kontingensi N-1 .....   | 63 |
| <b>Tabel 4. 22</b> | Perbandingan metode BPSO dengan <i>Firefly Algorithm</i><br>dengan fungsi biaya tidak mulus..... | 64 |
| <b>Tabel 4. 23</b> | Perbandingan fungsi biaya mulus dengan fungsi biaya<br>tidak mulus .....                         | 64 |

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik telah menjadi kebutuhan pokok manusia, dimana masyarakat modern tidak dapat melakukan aktivitas dengan baik tanpa tenaga listrik. Pemenuhan kebutuhan listrik dalam skala besar tidak mungkin disuplai oleh satu unit pembangkit berkapasitas besar karena beberapa faktor, seperti jarak dengan beban dan operasi pembangkit, sehingga kebutuhan listrik harus disuplai oleh banyak pembangkit. Dalam pemenuhan kebutuhan listrik yang selalu berubah dalam 24 jam dibutuhkan operasi penjadwalan (*On/Off*) unit pembangkit untuk mendapatkan pembangkitan yang paling ekonomis[1]. Operasi penjadwalan (*On/Off*) unit pembangkit yang biasa disebut *Unit Commitment* bertujuan untuk mendapatkan biaya operasi yang minimum dan dapat memenuhi kebutuhan beban yang selalu berubah setiap jam tanpa mengabaikan batasan pembangkit seperti batasan waktu nyala dan padam minimal (*minimum up and down time*), *ramprate*, *power balance*, *inequality constrain*, *start up cost*, dan *shut down cost*[2]. Namun permasalahannya, *Unit Commitment* belum mampu menjadwalkan pembangkit dengan mempertimbangkan keamanan sistem, sehingga dibutuhkan operasi *Security Constrained Unit Commitment (SCUC)*. SCUC merupakan pengembangan dari *Unit Commitment* yang mampu mempertimbangkan keamanan saluran transmisi [1].

Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai *Security Constrained Unit Commitment (SCUC)* yang mempertimbangkan kapasitas dan rugi-rugi saluran transmisi, dengan kurva biaya yang tidak rata (*Non-Smooth Generation Cost Function*), akibat efek pengaturan katup pembangkit. Dengan pertimbangan efek *Non-Smooth Generation Cost Function* diharapkan dapat dicapai biaya pembangkitan yang lebih *nyata*. Tugas akhir ini menggunakan algoritma BPSO (*Binary Partical Swarm Optimization*) untuk menyelesaikan masalah SCUC untuk mendapatkan hasil akhir yang handal dan optimal secara ekonomi.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana membuat program penjadwalan pembangkit dengan biaya pembangkitan paling ekonomis tanpa melanggar batas keamanan unit pembangkit dan sistem menggunakan algoritma BPSO (*Binary Particel Swarm Optimization*).
2. Bagaimana menjadwalkan unit pembangkit dengan biaya pembangkitan paling ekonomis, tanpa melanggar batas keamanan unit pembangkit dan sistem.
3. Bagaimana pengaruh pengaturan katup generator terhadap biaya pembangkitan listrik.
4. Bagaimana pengaruh kontingensi N-1 saluran terhadap total biaya pembangkitan

## 1.3 Tujuan

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

1. Membuat program penjadwalan pembangkit yang paling ekonomis tanpa melanggar batas keamanan unit pembangkit dan sistem, dengan fungsi biaya yang tidak rata akibat efek pengaturan katup pembangkit, menggunakan algoritma BPSO (*Binary Particel Swarm Optimization*).
2. Menentukan penjadwalan dengan biaya pembangkitan yang ekonomis dan sistem yang aman.
3. Mengetahui pengaruh efek pengaturan katup generator terhadap biaya pembangkitan generator.

## 1.4 Batasan Masalah

1. Menggunakan sistem uji IEEE 30 bus.
2. Menggunakan metode BPSO (*Binary Particle Swarm Optimization*) untuk *unit commitment*, dan algoritma PSO (*Particle Swarm Optimization*) untuk *Optimal Power Flow*.
3. Beban reaktif tidak diperhitungkan.
4. Simulasi menggunakan *software matlab*.
5. Profil beban pada kondisi kontingensi N-1 sama dengan pada kondisi normal

## 1.5 Metodologi

### 1. Studi Literatur

Penyusunan tugas akhir ini dilakukan berdasarkan studi literatur dari berbagai macam sumber, seperti *paper*, jurnal, dan *textbook* yang dapat membantu tugas akhir ini.

### 2. Pengumpulan data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data, yaitu sistem IEEE 30 Bus berupa waktu penyalaan dan pemadaman minimum (*minimum up and down time*), biaya penyalaan dan pemadaman pembangkit (*start up and shut down cost*), rentang daya setiap pembangkit, *ramprate*, daya beban, data saluran, dan fungsi biaya pembangkitan setiap generator.

### 3. Pembuatan Program

Pada tahap ini dibuat program dalam bentuk *M-File* pada *software* Matlab berupa program PSO (*Particle Swarm Optimization*) untuk *Optimal Power Flow* dan BPSO (*Binary Particle Swarm Optimization*) untuk mendapatkan penjadwalan yang paling ekonomis.

### 4. Simulasi dan Analisa

Simulasi dilakukan pada sistem yang diuji, yaitu sistem IEEE 30 Bus. Selanjutnya, data yang diperoleh dari simulasi akan dianalisa untuk mengetahui keberhasilan program *M-File* terhadap operasi *Security Constrained Unit Commitment*. Cara mengetahui keberhasilan program *M-file* dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan tugas akhir lain tanpa efek kurva biaya yang tidak mulus (*non-smooth generation cost function*), dan menggunakan pembanding algoritma *firefly algorithm*

### 5. Penulisan Buku

Pada tahap ini dilakukan penyusunan hasil analisa yang berupa penggambaran kesimpulan secara keseluruhan dari batasan permasalahan yang telah ditentukan. Pada tahap ini juga terdapat saran yang berhubungan dengan batasan permasalahan yang telah ditentukan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini disusun dalam sistematika sebagai berikut:

### BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang permasalahan dari pengerjaan tugas akhir, tujuan, permasalahan, batasan masalah, metodologi penelitian, sistematika penulisan dan relevansi pengerjaan tugas akhir.

### BAB 2 OPERASI PENJADWALAN PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Berisi teori dasar sistem tenaga listrik, teori dasar tentang penjadwalan pembangkit yang terdiri dari: operasi *unit commitment*, *economic dispatch*, *optimal power flow*, *dynamic optimal power flow*, *security constrained unit commitment*, dan fungsi biaya.

### BAB 3 SCUC (*SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT*) MENGGUNAKAN ALGORITMA BPSO (*BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*) DAN PSO UNTUK OPF (*OPTIMAL POWER FLOW*).

Pada bab ini dijelaskan mengenai penjelasan dan penerapan algoritma BPSO (*Binary Particle Swarm Optimization*) pada permasalahan *Security Constrained Unit Commitment*, dan *Particle Swarm Optimization* untuk permasalahan *Optimal Power Flow*.

### BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA DATA

Bab ini berisi hasil simulasi penjadwalan pembangkit (*Security Constrained Unit Commitment*) beserta analisis biaya pembangkitan.

### BAB 5 PENUTUP

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan dan saran yang berhubungan dengan pokok permasalahan

## **1.7 Relevansi**

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga listrik, khususnya pada permasalahan *Security Constrained Unit Commitment* dan *Binary Particle Swarm Optimization*.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil tugas akhir dengan topik yang serupa.

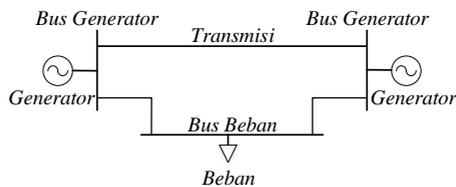
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 2

### OPERASI OPTIMASI PENJADWALAN PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

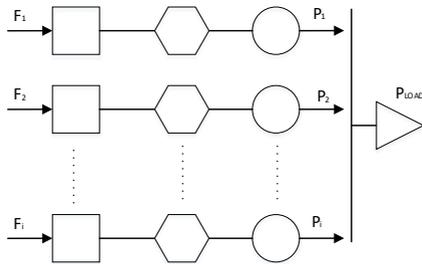
Sistem tenaga listrik tersusun atas beberapa komponen tenaga listrik yang membentuk suatu sistem terpadu yang saling interkoneksi, dan secara umum sistem tenaga listrik tersusun dari 4 komponen, yaitu: pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban [3]. Gambaran sistem tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 2.1.



**Gambar 2. 1** Sistem tenaga listrik

#### 2.1.1 Pembangkitan

Pembangkit merupakan salah satu komponen penting pada sistem tenaga listrik. Pada zaman ini pembangkit tenaga listrik yang paling sering digunakan adalah generator AC sinkron 3 fasa[3]. Secara umum pembangkit pada sistem tenaga listrik tersusun atas beberapa generator yang dioperasikan secara paralel dan dihubungkan pada bus bar, untuk menyuplai kebutuhan daya listrik oleh beban, seperti pada gambar 2.2. *Input* Fi merupakan *fuel cost* dari bahan bakar, gambar kotak menunjukkan boiler yang menghasilkan uap, yang digunakan untuk memutar turbin, gambar segi enam merupakan turbin, dan lingkaran adalah unit generator. Adapun *output* dari setiap unit generator yang berupa daya listrik ditunjukkan oleh Pi, yang selanjutnya digunakan untuk menyuplai beban[1].



**Gambar 2. 2** Sistem pembangkit

Pada sistem tenaga listrik terdapat beberapa jenis pembangkit, yang dibedakan oleh jenis bahan bakarnya, diantaranya adalah pembangkit berjenis *thermal* atau pembangkit listrik bertenaga panas.

Dalam permasalahan operasi optimasi tenaga listrik, permasalahan ekonomis sangat dipengaruhi oleh karakteristik *input-output* unit pembangkit tenaga listrik *thermal*[1]. Pembangkit berjenis *thermal* memiliki karakteristik *input-output* masing-masing, hal ini dapat diketahui dari data-data, seperti desain generator, dan data riwayat pengoperasian generator.

### 2.1.2 Transmisi

Fungsi utama transmisi adalah untuk menyalurkan daya listrik dari sumber pembangkitan menuju beban. Pada sistem transmisi digunakan tegangan tinggi untuk mengurangi rugi-rugi pada saluran transmisi, yang disebabkan oleh adanya arus yang mengalir pada penghantar. Berdasarkan letaknya saluran transmisi dibagi menjadi 3, yaitu *overhead transmission line* berupa saluran transmisi diatas tanah, *underground transmission line* berupa saluran transmisi bawah tanah, dan *submarine transmission line* berupa saluran transmisi dibawah laut. Menurut jenisnya, saluran transmisi dibagi menjadi 2, yaitu transmisi AC, dan transmisi DC. Sedangkan menurut level tegangan, saluran transmisi dibagi menjadi beberapa level, yaitu tegangan tinggi (60-220 kV), tegangan ekstra tinggi (220 kV – 765 kV) tegangan ultra tinggi (lebih besar dari 765 kV)[4].

### 2.1.3 Distribusi

Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sistem transmisi melalui gardu induk menuju beban, dengan menurunkan level tegangan lewat *transformator stepdown*. Sistem distribusi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer memiliki tegangan pada rentang 4 kV sampai 34.5 kV, yang digunakan untuk menyuplai beban skala industri, sedangkan distribusi sekunder digunakan untuk menyuplai beban skala komersial dan perumahan.

### 2.1.4 Beban

Beban pada sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3, yaitu beban skala industri, beban skala komersial, dan beban skala rumah tangga. Beban skala industri didominasi oleh beban komposit dengan proporsi beban motor induksi yang lebih besar dari beban dengan konstan impedansi, dimana beban jenis ini mempengaruhi frekuensi dan tegangan, karena menyerap daya reaktif dalam skala besar. Beban komersial dan beban residensial didominasi oleh beban untuk penerangan, pemanas, dan pendingin, sehingga beban jenis ini tidak terlalu mempengaruhi tegangan dan frekuensi, karena tidak terlalu menyerap daya reaktif[3].

## 2.2 Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya, yang secara umum disebut sebagai *load flow*, merupakan bagian penting dalam menganalisa sistem tenaga listrik. Secara umum analisa *load flow* biasa digunakan untuk analisa perencanaan sistem, penjadwalan, dan kontrol pada sistem tenaga. Permasalahan yang dapat diselesaikan dengan menggunakan studi *load flow* adalah tegangan pada bus, daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh generator, dan aliran daya aktif dan reaktif pada saluran. Dalam menyelesaikan permasalahan *load flow*, sistem diasumsikan beroperasi dalam keadaan *balance* atau seimbang. Dalam *load flow*, bus dibagi dalam 3 jenis, yaitu[3]:

1. *Slack/swing* bus.

Berfungsi sebagai bus referensi, dimana nilai tegangan sebesar 1 p.u dan sudut fasa  $0^\circ$ . Dalam jaringan sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi, terdapat satu *slack* bus yang berfungsi sebagai penyuplai kekurangan daya pada sistem. Kekurangan daya tersebut disebabkan

adanya *losses* pada saluran transmisi yang tidak diketahui dan nilai beban yang bervariasi, sehingga generator pada *slack* bus harus dapat menyuplai kekurangan daya aktif dan reaktif yang dibutuhkan sistem.

2. *Load* bus

Merupakan bus beban, dengan nilai daya aktif dan reaktif yang spesifik. Pada *load* bus nilai tegangan dan sudut fasa tidak diketahui.

3. *Generator* bus.

*Generator* bus biasa juga disebut dengan *voltage-controlled bus*. Pada *generator* bus daya aktif dan reaktif telah ditentukan.

**2.2.1 Persamaan Aliran Daya**

Berdasarkan pada hukum Kirchoff Arus, hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan 2.1

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \tag{2.1}$$

Keterangan:

- $I_{bus}$  = Arus pada bus
- $Y_{bus}$  = Admitansi pada bus
- $V_{bus}$  = Tegangan pada bus

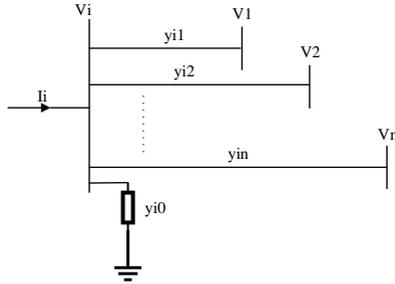
Persamaan diatas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Keterangan:

- $n$  = jumlah total bus
- $Y_{11}$  = admitansi sendiri dari bus i
- $Y_{21}$  = mutual admitansi dari bus i dan j
- $V_1$  = tegangan fasor pada bus i
- $I_1$  = arus fasor yang mengalir ke bus i

Pada persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa arus fasor didapatkan dari dari perkalian matriks admitansi dengan tegangan fasor pada bus. Gambaran tentang sistem antara tegangan, admitansi dan arus pada bus dalam suatu jaringan sistem tenaga listrik direpresentasikan pada gambar dibawah ini



**Gambar 2. 3** Gambaran bus pada sistem tenaga listrik

Penerapan hukum kirchoff arus pada sistem yang terdapat pada gambar diatas menghasilkan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} I_i &= y_{io} V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{io} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_1V_1 - y_2V_2 - \dots - y_nV_n \end{aligned} \quad (2.3)$$

atau

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

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

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

Atau

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

Substitusi nilai  $I_i$  menghasilkan persamaan

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

Persamaan aliran daya tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan suatu proses pengulangan (iterasi) dengan menetapkan nilai perkiraan untuk tegangan pada bus yang milainya tidak diketahui. Kemudian menghitung suatu nilai baru untuk setiap tegangan bus dari nilai perkiraan bus yang lain. Setiap perhitungan suatu himpunan nilai tegangan yang baru disebut sebagai iterasi. Proses iterasi ini diulang terus-menerus hingga perubahan yang terjadi pada setiap bus kurang dari nilai minimum atau tidak melebihi nilai maksimum yang telah ditentukan[3].

### 2.2.2 Metode Newton-Rhapon[3]

Metode Newton-Rhapon merupakan metode penyelesaian persamaan nonlinier yang paling banyak digunakan. Metode ini menggunakan deret Taylor untuk menyelesaikan persamaan, caranya adalah dengan mengubah bentuk persamaan nonlinier menjadi persamaan linier[3].

i. Fungsi nonlinier dengan satu variabel

Didefinisikan  $f(x) = 0$  merupakan persamaan nonlinier, setiap nilai  $x$  yang memenuhi  $f(x)$  merupakan akar persamaan  $f(x)$ . Untuk mendapatkan nilai akar persamaan tertentu, didefinisikan  $x_0$  sebagai nilai awal.

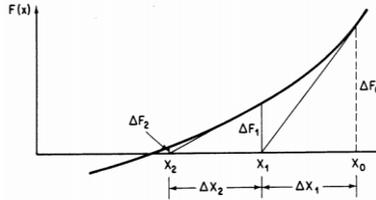
$$f(x_0) = \Delta f_0 \quad (2.8)$$

Pada persamaan 2.7  $\Delta f_0$  merupakan *error* bila  $x_0$  bukan akar persamaan dari  $f(x)$ . Seperti ilustrasi pada gambar 2.4. pada titik kurva fungsi  $f(x_0)$  ditarik garis singgung, dan diproyeksikan sampai memotong sumbu  $x$  untuk menentukan perkiraan kedua dari akar dan seterusnya sampai  $\Delta f_0$  memiliki error yang sesuai toleransi. Persamaan garis singgung pada metode *Newton-Rhapon* ini adalah sebagai berikut.

$$y(x) = f(x_n) + f'(x_n)(x - (x_n)) \quad (2.9)$$

Dari persamaan diatas, apabila  $y(x) = 0$ , maka persamaan untuk perkiraan nilai akar pada setiap iterasi adalah:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.10)$$



**Gambar 2. 4** Ilustrasi metode Newton-Raphson

ii. Fungsi nonlinier dengan N variabel

Konsep dimensi tunggal dari metode Newton-Raphson dapat diperluas sampai dimensi N. Dimensi N dianalogikan dengan menggunakan matriks *Jacobian* dan digunakan deret *Taylor* untuk menyelesaikan persamaan dengan N variabel. Persamaan tersebut dapat dituliskan seperti persamaan

$$f_1(x_1, x_2) = A_1 \quad (2.11)$$

$$f_2(x_1, x_2) = A_2 \quad (2.12)$$

Dengan  $A_1$  dan  $A_2$  merupakan konstanta.

Selanjutnya diambil solusi awal  $x_1(0)$  dan  $x_2(0)$ , selain itu dinyatakan juga  $\Delta x_1(0)$  dan  $\Delta x_2(0)$  untuk mendapatkan penyelesaian yang tepat. Persamaan  $A_1$  dan  $A_2$  ditulis sebagai berikut:

$$A_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1[x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0)] \quad (2.13)$$

$$A_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2[x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0)] \quad (2.14)$$

Untuk menyelesaikan  $\Delta x_1(0)$  dan  $\Delta x_2(0)$  pada persamaan, maka digunakan deret *Taylor* sebagai berikut:

$$A_1 = f_1(x_1(0), x_2(0)) + \Delta x_1(0) \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2(0) \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 + \dots \quad (2.15)$$

$$A_2 = f_2(x_1(0), x_2(0)) + \Delta x_1(0) \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 + \Delta x_2(0) \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 + \dots \quad (2.16)$$

Suku  $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}$  merupakan turunan parsial dari persamaan  $f_1(x_1(0), x_2(0))$ , dan suku lain seperti itu dapat dihitung dengan cara yang serupa. Jika turunan parsial dengan orde lebih dari satu diabaikan, maka dapat ditulis persamaan matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} A_1 - f_1[x_1(0), x_2(0)] \\ A_2 - f_2[x_1(0), x_2(0)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(0) \\ \Delta x_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Atau

$$\begin{bmatrix} \Delta A_1(0) \\ \Delta A_2(0) \end{bmatrix} = [J(0)] \begin{bmatrix} \Delta x_1(0) \\ \Delta x_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Matriks bujur sangkar turunan parsial diatas disebut dengan matriks jacobian. dalam hal ini  $J(0)$  merupakan solusi awal  $x_1(0)$  dan  $x_2(0)$  yang telah digunakan untuk menghitung nilai turunan parsial

Penggunaan metode *Newton-Rhapson* pada perhitungan *loadflow* adalah sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = |V_i| < \delta \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_j| < \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.19)$$

Lalu bagian real dan imajiner dipisahkan sehingga didapat persamaan:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

Persamaan diatas dirubah kedalam bentuk matriks jacobian

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

Penjabaran elemen matriks jacobian:

i. Elemen  $J_1$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -|V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.24)$$

ii. Elemen  $J_2$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |v_i|} = 2|V_i| |y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1} |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |v_i|} = |V_i| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.26)$$

iii. Elemen  $J_3$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.28)$$

iv. Elemen  $J_4$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |v_i|} = 2|V_i| |y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1} |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |v_i|} = -|V_i| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \quad (2.30)$$

$\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  merupakan selisih antara nilai yang dicari dan nilai yang dihitung (*power residual*).

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

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

Proses iterasi *Newton-Rhapon* akan berhenti jika nilai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  lebih kecil atau sama dengan toleransi *error*.

### 2.3 Perencanaan Operasi Optimum Sistem Tenaga Listrik

Perencanaan operasi optimum sistem tenaga listrik secara umum adalah proses yang digunakan dalam merencanakan operasi dari sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi sistem tenaga listrik. Perencanaan operasi optimum sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu:

#### 2.3.1 Unit Commitment[5]

*Unit commitment* (UC) merupakan penjadwalan waktu penyalaan dan penghubungan unit pembangkit pada suatu sistem tenaga listrik yang direncanakan dalam waktu yang bervariasi dari beberapa jam hingga satu minggu, dengan tujuan utama untuk memenuhi permintaan beban listrik[1]. Kebutuhan beban setiap jam pada permasalahan UC merupakan hasil peramalan beban yang tepat. Kriteria optimisasi untuk menentukan penjadwalan UC adalah meminimalkan biaya pembangkitan dari unit-unit pembangkit yang beroperasi[6].

Permasalahan pada UC terdiri dari dua submasalah. Pertama adalah penentuan unit pembangkit yang akan dinyalakan. Kedua adalah penentuan jumlah biaya pembangkitan setiap unit yang beroperasi. Kombinasi unit pembangkit dengan biaya produksi paling minimal akan dipilih sebagai jadwal kombinasi pada setiap rentan waktu[6].

Fungsi objektif pada *unit commitment* yaitu:

$$\min F_t = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_g} [F_j P_j + STC_{jt}(1 - U_{j(t-1)})] U_{jt} + DC_{jt}(U_n^{(h-1)})^{-\theta} \quad (2.33)$$

Dengan  $STC_{jt}$  merupakan biaya penyalaan. Biaya penyalaan dibagi menjadi dua, yaitu:

1. *Hot start cost*

$$\text{Jika } MDT_j \leq T_j^{off} \leq MDT_j + CSH_j \quad (2.34)$$

2. *Cold start cost*

$$\text{Jika } T_j^{off} \geq MDT_j + CSH_j \quad (2.35)$$

Dan  $DC_{jt}$  merupakan biaya pemadaman.

Parameter lain pada *unit commitment* adalah:

1. *Minimum up & down time*

*Minimum up time & down time* merupakan parameter perhitungan penjadwalan pembangkit terhadap waktu unit pembangkit nyala atau mati. *Minimum up time* merupakan batas waktu minimal unit pembangkit nyala. Sedangkan *minimum down time* merupakan batas waktu minimal pembangkit mati. Parameter tersebut harus dipenuhi dalam penjadwalan pembangkit sehingga unit pembangkit dapat memenuhi batasan waktu nyala/mati. Berikut persamaan matematis *Minimum up & down time* :

$$T_j^{on} \geq MUT_j \quad (2.36)$$

$$T_j^{off} \geq MDT_j \quad (2.37)$$

Keterangan:

|                  |   |
|------------------|---|
| $F_t$            | = biaya operasi pada jam ke-t                 |
| $T$              | = jumlah periode jam penjadwalan              |
| $N_g$            | = jumlah unit pembangkit yang tersedia        |
| $T_{on}/T_{off}$ | = rentang waktu unit pembangkit <i>on/off</i> |
| $MUT_j/MDT_j$    | = waktu minimal nyala/mati                    |
| $CSH_j$          | = waktu penyalaan dingin                      |

### 2.3.2 Kombinasi Unit Pembangkit Tenaga Listrik

Pada operasi Unit Commitment terdapat dua macam, yaitu *priority list* dan *complete enumeration*. Kombinasi dalam perhitungan penjadwalan pembangkit digunakan sebagai acuan untuk mencari kombinasi dari unit pembangkit yang beroperasi dan tidak beroperasi dalam suatu sistem yang memiliki biaya pembangkitan yang paling murah. Pengertian kombinasi – kombinasi tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Priority list:*

*Priority list* merupakan kombinasi dalam perhitungan penjadwalan pembangkit dengan jumlah kombinasi sama dengan jumlah pembangkit. *Priority list* dapat didasarkan pada biaya pembangkit pada saat berbeban penuh, sehingga pembangkit yang memiliki biaya paling mahal akan lebih diprioritaskan untuk tidak beroperasi.

2. *Complete enumeration:*

*Complete enumeration* merupakan kombinasi dalam perhitungan penjadwalan pembangkit dengan memperhitungkan seluruh kombinasi yang mungkin terjadi. *Complete enumeration* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$2^n - 1 \tag{2.38}$$

Dengan  $n$  merupakan jumlah pembangkit pada sistem. *Complete enumeration* akan menghasilkan nilai lebih akurat daripada *priority list* karena jumlah kombinasi yang diperhitungkan lebih banyak.

### 2.3.3 Economic Dispatch

*Economic dispatch* merupakan permasalahan optimasi pada sistem tenaga. *Economic dispatch* mengatur proses pengalokasian daya yang dibangkitkan unit pembangkit tenaga listrik untuk menjaga agar jumlah daya terbangkit sama dengan beban tersambung pada sistem, sehingga frekuensi sistem stabil pada level 50 Hz dan didapatkan biaya pembangkitan seminimal mungkin, yang tidak melewati batasan pembangkit[7]. Perhitungan *economic dispatch (ED)* dilakukan tanpa memperhitungkan batasan aliran daya. Untuk optimasi pembagian pembangkit dengan memperhitungkan batasan-batasan tersebut, maka dikembangkan metode *optimal power flow*.

Formulasi fungsi objektif *economic dispatch*[1]:

$$\min F_{cost} = \sum_{j=1}^{N_g} F_j P_j \quad (2.39)$$

Secara umum fungsi biaya setiap unit generator dapat dirumuskan dalam

$$F_j(P_j) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2 \quad (2.40)$$

Keterangan:

1.  $a_j, b_j, c_j$  = merupakan koefisien biaya unit pembangkitan
2.  $F_j(P_j)$  = merupakan fungsi biaya  $j$  pembangkit (\$/hour)
3.  $P_j$  = merepresentasikan daya terbangkit unit  $j$  pembangkit (MW)
4.  $N_g$  = total jumlah generator

Batasan dalam permasalahan *economic dispatch* yaitu:

1. Batasan generator

$$P_{gen \min j} \leq P_{gen j} \leq P_{\max gen j} ; \text{for } j = 1 \dots N_{gen} \quad (2.41)$$

2. *Power balance*

$$\sum_{j=1}^{N_{gen}} P_{gen j} = P_{total \ load} + P_{total \ losses \ j} \quad (2.42)$$

$N_{gen}$  adalah jumlah generator

### 2.3.4 Optimal Power Flow

*Optimal power flow* (OPF) merupakan pengembangan dari *economic dispatch*, yaitu penggabungan perhitungan *economic dispatch* dengan perhitungan *loadflow*. Hasil dari perhitungan OPF yaitu berupa pembagian pembangkitan yang juga memperhitungkan aliran daya dengan total biaya minimal [1]. OPF memiliki peranan penting pada sistem operasi untuk perencanaan jangka panjang maupun penjadwalan harian. OPF merupakan perhitungan aliran daya yang terbagi menjadi AC dan DC. AC OPF akan memperhitungkan daya aktif dan reaktif, sedangkan untuk DC hanya memperhitungkan daya aktif saja.

Perhitungan pada OPF mencakup:

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

Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

Fungsi objektif:

$$\min \sum_{i=1}^{N_{gen}} F_i(P_i) \quad (2.43)$$

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

*Inequality constraint* generator:

$$P_{gen_i}^{min} \leq P_{gen_i} \leq P_{gen_i}^{max} \quad (2.44)$$

$$Q_{gen_i}^{min} \leq Q_{gen_i} \leq Q_{gen_i}^{max} \quad (2.45)$$

Untuk  $i$  dari 1 hingga sejumlah  $n$  generator

Aliran daya pada bus  $i$ :

$$P_j + Q_j = V_j \left( \sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{jk} V_{ik} \right) \quad (2.46)$$

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

$$(P_{gen_i} - P_{load_i}) + j(Q_{gen_i} - Q_{load_i}) = V_i \left( \sum_{k=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_{ik} \right) \quad (2.47)$$

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

$$(P_{gen_i} - P_{load_i}) - Real \left\{ V_i \left( \sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_{ik} \right) \right\} = 0 \quad (2.48)$$

$$(Q_{gen_i} - Q_{load_i}) - Imag \left\{ V_i \left( \sum_{i=1}^{N_{bus}} Y_{ik} V_{ik} \right) \right\} = 0 \quad (2.49)$$

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

#### 2.3.4.1 Dynamic Optimal Power Flow

*Dynamic optimal power flow (DOPF)* merupakan metode penjadwalan output generator yang online dengan prediksi beban yang dibutuhkan selama jangka waktu tertentu, untuk menoperasikan sistem kelistrikan secara ekonomis. DOPF merupakan permasalahan OPF dengan level beban yang berbeda berdasarkan rentan waktu yang ditentukan[8]. Daya terbangkit pada jam sebelumnya akan mempengaruhi daya terbangkit jam sesudahnya. Hal ini terjadi karena dipengaruhi oleh batasan generator dalam kemampuan perubahan daya, yang selanjutnya mengakibatkan generator tidak dapat bertambah atau berkurang dengan bebas. Batas rentang kenaikan atau penurunan generator ini disebut *ramprate*[9]. Persamaan *ramprate* generator direpresentasikan pada persamaan:

$$P_{Gi,t} - Ramp_{Gi} \leq P_{Gi,t+1} \leq P_{Gi,t} + Ramp_{Gi} \quad (2.50)$$

Perbedaan beban dalam rentang waktu dapat mempengaruhi biaya pembangkitan generator. Persamaan matematis DOPF direpresentasikan pada persamaan:

$$\min F_{cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_g} F_j P_j = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_g} F_j (a_j + b_j P_j^t + c_j P_j^{t^2})$$

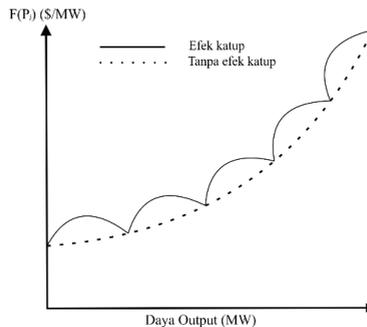
(2.51)

### 2.3.5 Security Constrained Unit Commitment

*Security Constrained Unit Commitment (SCUC)* merupakan pengembangan dari *Unit Commitment (UC)*, dimana selain mampu mempertimbangkan *UC constraints (minimum up and down time, ramprate, power balance, start-up cost, dan shut-down cost)*, juga dapat mempertimbangkan keamanan saluran transmisi baik dalam keadaan normal maupun ketika saluran terputus (*contingency*) sehingga kapasitas saluran juga berkurang dan impedansi sistem juga berubah. Dengan melakukan analisa SCUC, diharapkan sistem tenaga listrik dapat dioperasikan secara optimal dengan handal dan aman [10].

### 2.4 Fungsi Biaya Pembangkitan Tidak Mulus

Pembangkit tenaga listrik *thermal* tenaga uap memiliki katup uap yang berfungsi untuk mengatur putaran turbin. Ketika terjadi perubahan posisi katup, maka akan menyebabkan kurva biaya pembangkitan menjadi tidak mulus. Pengaruh pengaturan katup yang menyebabkan kurva tidak mulus ini disebut sebagai *valve point effect*[11]. Gambar 2.5 menunjukkan perbandingan antara kurva akibat efek katup dan tanpa efek katup:



**Gambar 2. 5** Kurva biaya pembangkitan

Akibat efek pengaturan katup generator, persamaan matematis fungsi biaya menjadi[11]:

$$F_j(P_j) = (a_j + b_j P_j + c_j P_j^2) + |e_j \sin[f_j(P_{jmin} - P_j)]| \quad (2.52)$$

Keterangan:

$F_j(P_j)$  = biaya operasi unit pembangkit ke- $j$

$P_j$  = daya terbangkit unit ke- $j$

$P_{jmin}$  = daya minimum terbangkit unit ke- $j$

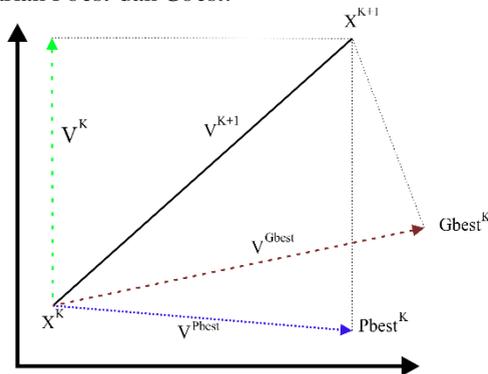
$a_j, b_j, c_j$  = koefisien biaya unit pembangkit

$e_j, f_j$  = koefisien biaya unit pembangkit akibat efek katup

## 2.5 Particle Swarm Optimization

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. Algoritma PSO menggunakan prinsip perilaku populasi kawanan burung dalam mencari sumber makanan terbaik. Populasi pada algoritma PSO disebut sebagai *Swarm* sedangkan individu burung disebut *particle*. Nilai hasil optimisasi optimal pada algoritma PSO menunjukkan posisi makanan terbaik. ketika partikel menemukan sumber makanan terbaik, maka partikel lain akan menuju ke posisi partikel terbaik, dan apabila partikel lain ada yang menemukan sumber makanan yang lebih baik, maka partikel lain akan menuju ke sumber makanan *update* yang lebih baik[12].

Setiap individu burung akan menentukan posisinya sendiri ketika terbang mencari sumber makanan, dimana dalam algoritma PSO posisi ini disebut *Pbest*, dan berdasarkan pengalaman posisi terbaik dalam kawanan, posisi terbaik disebut sebagai *Gbest*. Gambar 2.6 menunjukkan konsep pencarian *Pbest* dan *Gbest*.



**Gambar 2. 6** Konsep pencarian *Pbest* dan *Gbest*

Pada algoritma PSO, populasi yang terdiri dari beberapa partikel dibangkitkan secara random dengan nilai terkecil dan terbesar untuk mencapai solusi terbaik. Solusi dari permasalahan direpresentasikan dengan partikel, dimana setiap partikel melakukan pencarian solusi yang optimal dengan melintasi ruang pencarian. Setiap partikel menyesuaikan posisi terhadap posisi terbaik dari partikel tersebut (*local best*), lalu ketika dalam ruang pencarian partikel melakukan penyesuaian terhadap posisi partikel terbaik dari seluruh kawanan (*global best*)[12]. Secara matematis, persamaan pencarian *Pbest* dan *Gbest* direpresentasikan dengan rumus[12]:

$$v_i(t) = wv_i(t-1) + c_1r_1(P_{best_i} - x_i(t-1)) + c_2r_2(G_{best} - x_i(t-1)) \quad (2.53)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 2.53, kecepatan yang secara bertahap akan semakin mendekati *Pbest* dan *Gbest* dapat dihitung. Posisi saat ini (pencarian dalam ruang solusi) bisa didapatkan dari persamaan 2.54 seperti berikut.

$$x_i(t) = v_i(t) + x_i(t-1) \quad (2.54)$$

Untuk mencapai posisi target dengan akurat, efisien, dan mempercepat konvergensi maka digunakan bobot inersia untuk meredam kecepatan selama iterasi. Persamaan pembobotan inersia yang semakin mengecil nilainya dengan bertambahnya iterasi direpresentasikan dengan persamaan 2.55 seperti berikut[13].

$$w(t) = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{max.iter} \right) \times t \quad (2.55)$$

Dimana,

|            |  |
|------------|--|
| $x$        | : posisi partikel                          |
| $v$        | : kecepatan partikel                       |
| $i$        | : indeks partikel                          |
| $t$        | : iterasi ke- $t$ ( $t = 1, 2, \dots, n$ ) |
| $P_{best}$ | : posisi terbaik lokal                     |
| $G_{best}$ | : posisi terbaik global                    |
| $w$        | : bobot inersia                            |
| $c_1, c_2$ | : konstanta positif = 2                    |

$r_1, r_2$  : bilangan random yang berkisar antara 0 sampai 1  
 $w_{max}$  : bobot inersia maksimal = 0.9  
 $w_{min}$  : bobot inersia minimal = 0.4  
 $max. iter$  : iterasi maksimal

### 2.5.1 Binary Particle Swarm Optimization

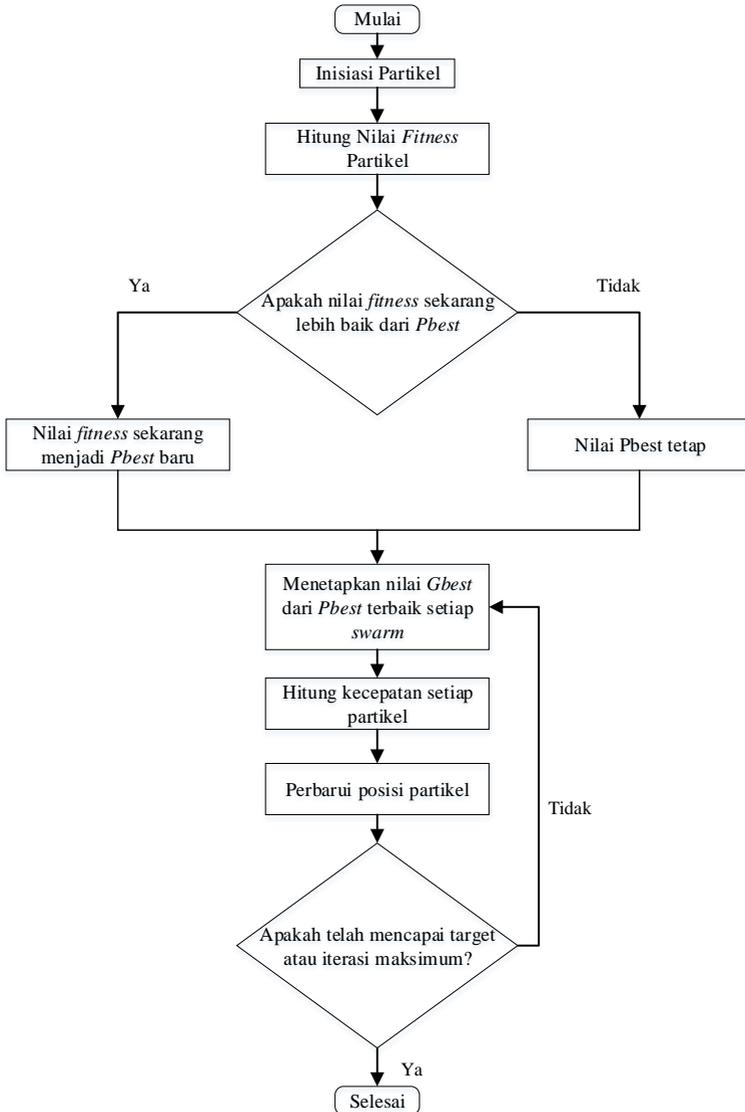
Konsep PSO biasa hanya mampu menyelesaikan permasalahan optimasi dengan representasi solusi bilangan real. Sehingga, untuk menyelesaikan permasalahan dengan representasi solusi biner, konsep PSO dikembangkan oleh penemunya menjadi algoritma *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO). selain pada representasi, hal yang membedakan yang lain adalah proses *update* vektor posisi partikel yang tidak menggunakan persamaan 2.54 melainkan menggunakan persamaan 2.56[14].

$$x_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{jika } rand(1.0) < s(v_i(t)) \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.56)$$

Dengan  $s(v_i(t))$  adalah fungsi sigmoid

$$s(v_i(t)) = (1 + e^{-v_i(t)})^{-1} \quad (2.57)$$

### 2.5.2 Diagram Alir PSO



Gambar 2. 7 Diagram alir algoritma Particle Swarm Optimization

### BAB 3

## PENERAPAN ALGORITMA BPSO (*BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*) PADA PERMASALAHAN SCUC (*SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT*) MEMPERTIMBANGKAN FUNGSI BIAYA TIDAK MULUS PADA SISTEM IEEE 30 BUS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai operasi penjadwalan nyala-mati (*on/off*) unit pembangkit dalam operasi *security constrained unit commitment* pada sistem IEEE 30 Bus menggunakan algoritma *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), dan untuk penentuan biaya pembangkitan dilakukan analisa *Optimal Power Flow* (OPF) menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Program *optimal power flow* merupakan subprogram *security constrained unit commitment*.

### 3.1 Sistem IEEE 30 Bus

Pada pengujian operasi penjadwalan nyala-mati (*on/off*) unit pembangkit dengan batas keamanan sistem pada tugas akhir ini, digunakan sistem IEEE 30 bus sebagai *plant*. Sistem IEEE 30 bus terdiri dari 6 generator dan 30 bus. Data-data seperti data bus, beban, saluran, batasan kemampuan pembangkit, dan fungsi biaya bahan bakar pada sistem IEEE 30 bus dapat dilihat pada Tabel 3.1, 3.2, 3.3 dan 3.4.

**Tabel 3. 1** Data bus dan beban IEEE 30-Bus

| Nomor Bus | Jenis Bus | Daya  |         |
|-----------|-----------|-------|---------|
|           |           | P(MW) | Q(Mvar) |
| 1         | Slack     | 0     | 0       |
| 2         | Generator | 21.7  | 12.7    |
| 3         | Beban     | 2.4   | 1.2     |
| 4         | Beban     | 7.6   | 1.6     |
| 5         | Generator | 94.2  | 19      |
| 6         | Beban     | 0     | 0       |
| 7         | Beban     | 22.8  | 10.9    |
| 8         | Generator | 30    | 30      |
| 9         | Beban     | 0     | 0       |

**(Lanjutan) Tabel 3. 2** Data bus dan beban IEEE 30-Bus

| Nomor Bus | Jenis Bus | Beban |         |
|-----------|-----------|-------|---------|
|           |           | P(MW) | Q(Mvar) |
| 10        | Beban     | 5.8   | 2       |
| 11        | Generator | 0     | 0       |
| 12        | Beban     | 11.2  | 7.5     |
| 13        | Generator | 0     | 0       |
| 14        | Beban     | 6.2   | 1.6     |
| 15        | Beban     | 8.2   | 1.5     |
| 16        | Beban     | 3.5   | 1.8     |
| 17        | Beban     | 9     | 5.8     |
| 18        | Beban     | 3.2   | 0.9     |
| 19        | Beban     | 9.5   | 3.4     |
| 20        | Beban     | 2.2   | 0.7     |
| 21        | Beban     | 17.5  | 11.2    |
| 22        | Beban     | 0     | 0       |
| 23        | Beban     | 3.2   | 1.6     |
| 24        | Beban     | 8.7   | 6.7     |
| 25        | Beban     | 0     | 0       |
| 26        | Beban     | 3.5   | 2.3     |
| 27        | Beban     | 0     | 0       |
| 28        | Beban     | 0     | 0       |
| 29        | Beban     | 2.4   | 0.9     |
| 30        | Beban     | 10.6  | 1.9     |

**Tabel 3. 3** Data saluran sistem IEEE 30-Bus

| Cabang | Dari Bus | Ke Bus | R (pu) | X (pu) | B (pu) | Kapasitas Saluran (MVA) |
|--------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|
| 1      | 1        | 2      | 0,019  | 0,058  | 0,026  | 130                     |
| 2      | 1        | 3      | 0,045  | 0,185  | 0,020  | 130                     |
| 3      | 2        | 4      | 0,057  | 0,174  | 0,018  | 65                      |
| 4      | 3        | 4      | 0,013  | 0,038  | 0,004  | 130                     |
| 5      | 2        | 5      | 0,047  | 0,198  | 0,020  | 130                     |
| 6      | 2        | 6      | 0,058  | 0,176  | 0,018  | 65                      |

**(Lanjutan) Tabel 3. 4** Data saluran sistem IEEE 30-Bus

| <b>Cabang</b> | <b>Dari</b> | <b>Ke</b> | <b>R (pu)</b> | <b>X (pu)</b> | <b>B (pu)</b> | <b>Kapasitas Saluran (MVA)</b> |
|---------------|-------------|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| 7             | 4           | 6         | 0,012         | 0,041         | 0,004         | 90                             |
| 8             | 5           | 7         | 0,046         | 0,116         | 0,010         | 70                             |
| 9             | 6           | 7         | 0,027         | 0,082         | 0,008         | 130                            |
| 10            | 6           | 8         | 0,012         | 0,042         | 0,0045        | 32                             |
| 11            | 6           | 9         | 0             | 0,208         | 0             | 65                             |
| 12            | 6           | 10        | 0             | 0,556         | 0             | 32                             |
| 13            | 9           | 11        | 0             | 0,208         | 0             | 65                             |
| 14            | 9           | 10        | 0             | 0,110         | 0             | 65                             |
| 15            | 4           | 12        | 0             | 0,256         | 0             | 65                             |
| 16            | 12          | 13        | 0             | 0,140         | 0             | 65                             |
| 17            | 12          | 14        | 0,123         | 0,256         | 0             | 32                             |
| 18            | 12          | 15        | 0,066         | 0,130         | 0             | 32                             |
| 19            | 12          | 16        | 0,095         | 0,198         | 0             | 32                             |
| 20            | 14          | 15        | 0,221         | 0,199         | 0             | 16                             |
| 21            | 16          | 17        | 0,082         | 0,192         | 0             | 16                             |
| 22            | 15          | 18        | 0,107         | 0,219         | 0             | 16                             |
| 23            | 18          | 19        | 0,064         | 0,129         | 0             | 16                             |
| 24            | 19          | 20        | 0,034         | 0,068         | 0             | 32                             |
| 25            | 10          | 20        | 0,095         | 0,209         | 0             | 32                             |
| 26            | 10          | 17        | 0,032         | 0,085         | 0             | 32                             |
| 27            | 10          | 21        | 0,035         | 0,075         | 0             | 32                             |
| 28            | 10          | 22        | 0,073         | 0,150         | 0             | 32                             |
| 29            | 21          | 22        | 0,012         | 0,025         | 0             | 32                             |
| 30            | 15          | 23        | 0,100         | 0,202         | 0             | 16                             |
| 31            | 22          | 24        | 0,115         | 0,179         | 0             | 16                             |

(Lanjutan) Tabel 3. 5 Data saluran sistem IEEE 30-Bus

| Cabang | Dari | Ke | R (pu) | X (pu) | B (pu) | Kapasitas Saluran (MVA) |
|--------|------|----|--------|--------|--------|-------------------------|
| 32     | 23   | 24 | 0,132  | 0,270  | 0      | 16                      |
| 33     | 24   | 25 | 0,1885 | 0,329  | 0      | 16                      |
| 34     | 25   | 26 | 0,2544 | 0,380  | 0      | 16                      |
| 35     | 25   | 27 | 0,1093 | 0,209  | 0      | 16                      |
| 36     | 28   | 27 | 0      | 0,396  | 0      | 65                      |
| 37     | 27   | 29 | 0,220  | 0,415  | 0      | 16                      |
| 38     | 27   | 30 | 0,320  | 0,603  | 0      | 16                      |
| 39     | 29   | 30 | 0,240  | 0,453  | 0      | 16                      |
| 40     | 8    | 28 | 0,064  | 0,200  | 0,021  | 32                      |
| 41     | 6    | 28 | 0,017  | 0,060  | 0,065  | 32                      |

Tabel 3. 6 Batasan kemampuan pembangkit sistem IEEE 30-Bus

| Unit | Pmin (MW) | Pmax (MW) | Min up-time (hour) | Min down time (hour) |
|------|-----------|-----------|--------------------|----------------------|
| P1   | 50        | 200       | 4                  | 4                    |
| P2   | 20        | 80        | 3                  | 3                    |
| P3   | 15        | 50        | 2                  | 3                    |
| P4   | 10        | 35        | 2                  | 2                    |
| P5   | 10        | 30        | 2                  | 2                    |
| P6   | 12        | 40        | 2                  | 2                    |

Tabel 3. 7 Fungsi biaya bahan bakar sistem IEEE 30-Bus

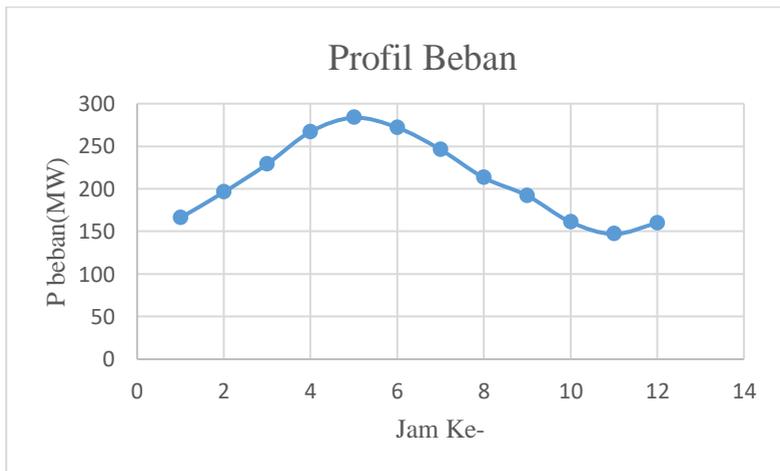
| Unit | Fungsi Biaya Bahan Bakar (\$/Jam) |      |   |    |       | Start Up Cost (\$) |      | Shut Down Cost (\$) |
|------|-----------------------------------|------|---|----|-------|--------------------|------|---------------------|
|      | a                                 | b    | c | e  | f     | Hot                | Cold |                     |
| P1   | 0.00375                           | 2    | 0 | 18 | 0.037 | 70                 | 176  | 50                  |
| P2   | 0.0175                            | 1.75 | 0 | 16 | 0.038 | 74                 | 187  | 60                  |
| P3   | 0.0625                            | 1    | 0 | 14 | 0.400 | 110                | 113  | 30                  |

(Lanjutan) Tabel 3. 8 Fungsi biaya bahan bakar sistem IEEE 30-Bus

| Unit | Fungsi Biaya Bahan Bakar (\$/Jam) |      |   |       |       | Start Up Cost (\$) |      | Shut Down |
|------|-----------------------------------|------|---|-------|-------|--------------------|------|-----------|
|      | a                                 | b    | c | e     | f     | Hot                | Cold | Cost (\$) |
| P4   | 0.0083                            | 3.25 | 0 | 12    | 0.045 | 50                 | 267  | 85        |
| P5   | 0.025                             | 3    | 0 | 13    | 0.042 | 72                 | 180  | 52        |
| P6   | 0.025                             | 3    | 0 | 13.25 | 0.041 | 40                 | 113  | 30        |

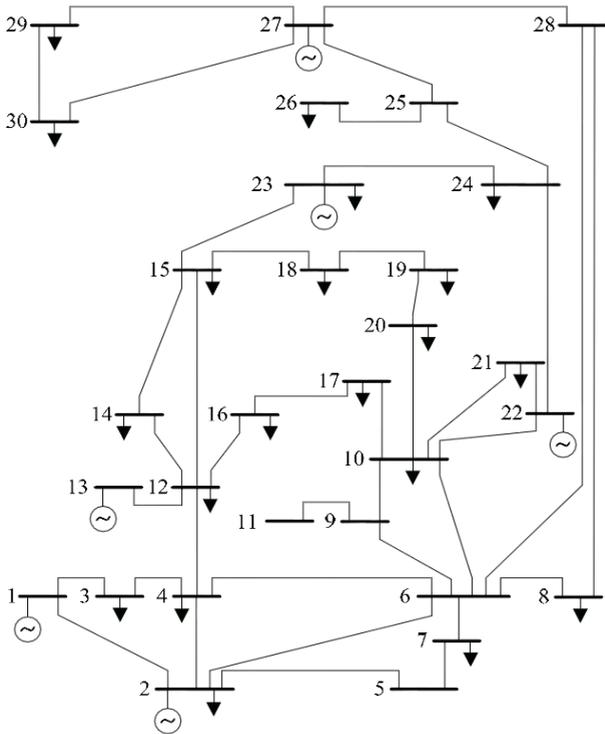
Tabel 3. 9 Profil beban sistem

| Jam Ke- | Total Beban (MW) | Jam Ke- | Total Beban (MW) |
|---------|------------------|---------|------------------|
| 1       | 165.9990         | 7       | 245.9990         |
| 2       | 196.0000         | 8       | 213.0000         |
| 3       | 228.9999         | 9       | 192.0000         |
| 4       | 267.0000         | 10      | 160.9999         |
| 5       | 283.4000         | 11      | 147.0001         |
| 6       | 272.0000         | 12      | 160.0000         |



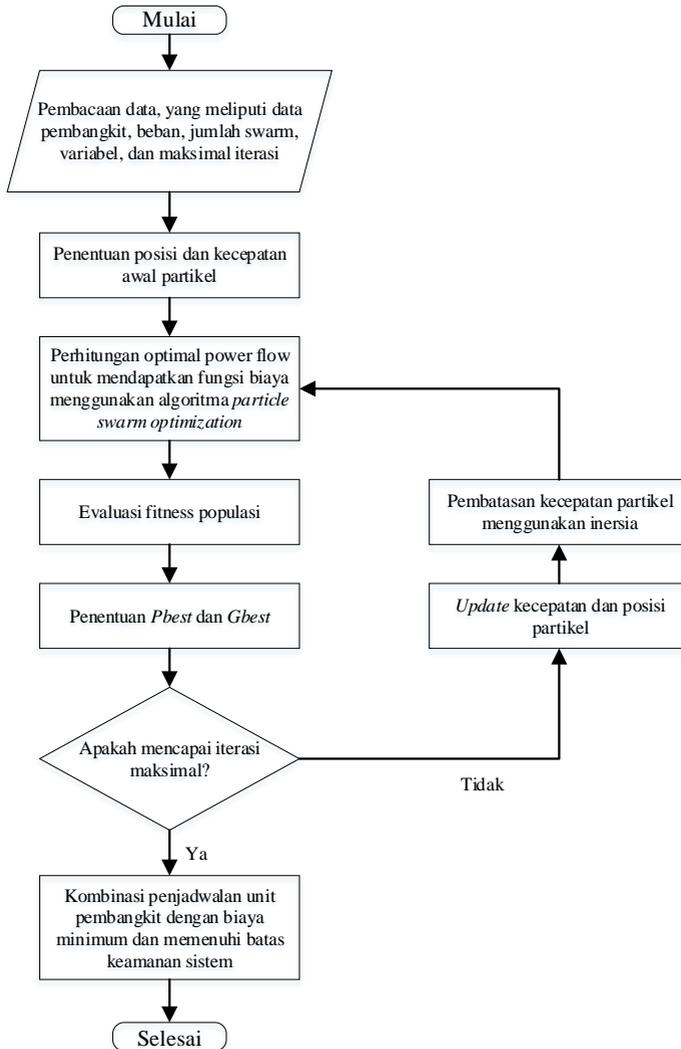
Gambar 3. 1 Kurva beban sistem IEEE 30 bus jam ke 1-12

Single Line Diagram sistem IEEE 30 Bus ditunjukkan oleh gambar 3.2



Gambar 3. 2 Single Line Diagram sistem IEEE 30 Bus

### 3.2 Penerapan Algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Pada Security Constrained Unit Commitment (SCUC).



**Gambar 3. 3** Diagram alir BPSO untuk menyelesaikan SCUC

Gambar 3.3 menunjukkan alur penyelesaian permasalahan penjadwalan unit pembangkit dengan mempertimbangkan batas keamanan sistem atau SCUC, yang diselesaikan menggunakan algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO). Algoritma BPSO akan mendapatkan kombinasi nyala-padam (*on/off*) unit pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban dalam jangka waktu tertentu. Pada program utama penjadwalan pembangkit dengan batas keamanan sistem ini, terdapat subprogram untuk mendapatkan biaya pembangkitan. Subprogram ini berupa program *optimal power flow* menggunakan algoritma *particle swarm optimization*.

### 3.2.1 Inisiasi Awal Algoritma Binary Particle Swarm Optimization

Sistem yang digunakan pada tugas akhir ini berupa sistem IEEE 30 bus, dimana data yang digunakan seperti pada tabel 3.1, 3.2, 3.3 dan 3.4.

#### 3.2.1.1 Setting Parameter BPSO

Parameter-parameter inisiasi awal BPSO berupa:

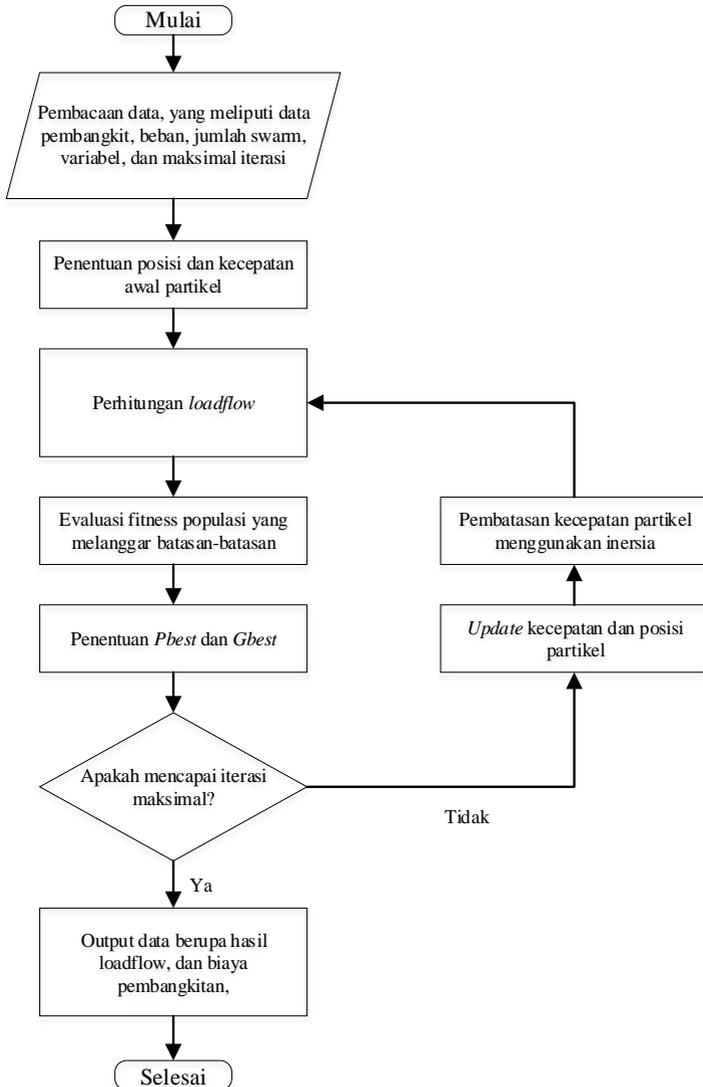
- Jumlah swarm = total unit pembangkit
- Jumlah partikel = 50
- Iterasi maksimum = 100
- $C_1$  = 2
- $C_2$  = 2
- Inersia ( $w$ ) = 0.4-0.9

Pada tugas akhir ini, partikel merupakan hal yang dioptimasi untuk memperoleh kombinasi *on/off* unit pembangkit dengan biaya termurah yang mampu memenuhi kebutuhan beban dan mempertimbangkan batasan-batasan yang telah ditentukan pada operasi SCUC. Iterasi maksimum menunjukkan banyaknya proses pengulangan algoritma BPSO. Sedangkan  $C_1$ , dan  $C_2$  merupakan koefisien akselerasi yang telah ditentukan dalam metode optimasi BPSO ini.

#### 3.2.2 Penentuan Posisi dan Kecepatan Awal Partikel

Pada tahap ini ditetapkan nilai  $x$  sebagai posisi awal secara random, sehingga didapatkan posisi  $x_1, x_2, \dots, x_N$  partikel  $i$  dan kecepatan pada iterasi  $t$  yang dinotasikan sebagai  $x_i(t)$  dan  $v_i(t)$

### 3.2.3 Perhitungan Fungsi Biaya Menggunakan Algoritma PSO



**Gambar 3. 4** Diagram Alir PSO Untuk OPF dengan Fungsi Biaya Tidak Mulus

Sub-permasalahan *security constrained unit commitment* yaitu permasalahan *optimal power flow* (OPF) diselesaikan menggunakan algoritma *particle swarm optimization*, sehingga didapatkan biaya pembangkitan unit pembangkit setiap waktu. Gambar 3.4 menunjukkan diagram alir algoritma *particle swarm optimization* untuk menyelesaikan permasalahan OPF.

### 3.2.3.1 Setting Parameter PSO

Parameter PSO yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan inisialisasi awal operasi algoritma yang digunakan dalam analisis aliran daya optimal dengan fungsi biaya pembangkitan tidak mulus. Parameter tersebut adalah sebagai berikut.

- Jumlah swarm : total unit pembangkit
- Jumlah partikel : 30
- Iterasi maksimal : 10
- Social constant ( $C_2$ ) : 2
- Cognitive constant ( $C_1$ ) : 2
- Inersia ( $w$ ) : 0.4-0.9

Partikel merupakan himpunan yang terdiri dari variabel. Variabel adalah parameter yang akan dioptimalkan. Fungsi objektif dari tugas akhir ini mencari nilai *fitness* minimum dengan fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan yang dihasilkan dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam analisis aliran daya. Iterasi maksimal merupakan total proses pengulangan yang dilakukan selama perhitungan. Adapun *social* dan *cognitive constant* adalah konstanta yang telah ditetapkan dalam metode pengoptimalan menggunakan algoritma PSO.

### 3.2.3.2 Penentuan Posisi Awal dan Kecepatan Awal

Pada tahap ini ditetapkan nilai  $x$  sebagai posisi awal secara random, sehingga didapatkan posisi  $x_1, x_2, \dots, x_N$  partikel  $i$  dan kecepatan pada iterasi  $t$  yang dinotasikan sebagai  $x_i(t)$  dan  $v_i(t)$ .

### 3.2.3.3 Evaluasi *Fitness*

Evaluasi nilai *fitness* populasi merupakan proses penentuan nilai *fitness* terbaik yang memenuhi batasan-batasan yang telah ditentukan. Batasan tersebut berupa batas minimum dan maksimum generator, *power*

*balance*, kapasitas saluran, dan *ramprate*. Selanjutnya partikel yang melanggar batasan akan diseleksi dan tidak dimasukkan dalam pemilihan calon solusi.

### 3.2.3.3.1 Fungsi Objektif dan Batasan-Batasan Pada *Optimal Power Flow*

Fungsi objektif pada permasalahan *security constrained unit commitment* berupa minimalisasi total biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit dalam rentang waktu tertentu, dan batasan subpermasalahan *Optimal Power Flow* ini berupa batas minimum dan maksimum generator, *power balance*, kapasitas saluran, dan *ramprate*.

- i. fungsi objektif : minimalisasi fungsi biaya unit pembangkit berikut persamaan fungsi objektif:

$$\min F_{cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_g} F_j P_j \quad (3.1)$$

$$F_j(P_j) = (a_j + b_j P_j + c_j P_j^2) + |e_j \sin[f_j(P_{jmin} - P_j)]| \quad (3.2)$$

Keterangan:

$F_j(P_j)$  = biaya operasi unit pembangkit ke-j

$P_j$  = daya terbangkit unit ke-j

$P_{jmin}$  = daya minimum terbangkit unit ke-j

$a_j, b_j, c_j$  = koefisien biaya unit pembangkit

$e_j, f_j$  = koefisien biaya unit pembangkit akibat efek katup

- ii. Variabel masalah : variabel yang dioptimasi pada *security constrained unit commitment* ini adalah pembangkitan daya aktif ( $P$ ). Jika  $n$  adalah jumlah generator, Sehingga ukuran matrik  $x$  adalah  $[n : 1]$  maka variabel yang akan dioptimasi dapat ditulis dengan persamaan 3.18 berikut.

$$x = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

iii. Batasan-batasan:

Generator:

- Batasan generator inequality constrain

$$P_{gen\ min\ j} \leq P_{genj} \leq P_{max\ genj}; \text{ for } j = 1 \dots N_{gen} \quad (3.4)$$

- Power balance atau equality constrain

$$\sum_{j=1}^{N_{gen}} P_{genj} = P_{total\ load} + P_{total\ losses} \quad (3.5)$$

- Ramprate

$$P_{Gi,t} - Ramp_{Gi} \leq P_{Gi,t+1} \leq P_{Gi,t} + Ramp_{Gi} \quad (3.6)$$

Kapasitas saluran:

$$|S_{ij}^t| \leq S_{ij} \quad (3.7)$$

$S_{ij}$  merupakan rating kapasitas saluran bus  $i$  ke  $j$ , dan  $|S_{ij}^t|$  merupakan daya saluran dari bus  $i$  ke  $j$  pada waktu ke-  $t$

### 3.2.3.4 Penentuan $Pbest$ dan $Gbest$

Parameter pemilihan fitness pada metode PSO ini didasarkan pada dua hal yaitu posisi terbaik local ( $Pbest$ ) dan global ( $Gbest$ ).  $Pbest$  adalah posisi terbaik yang dimiliki oleh masing-masing partikel sedangkan  $Gbest$  merupakan posisi terbaik yang dimiliki oleh kumpulan partikel tersebut.

Fungsi objektif dari tugas akhir ini adalah mencari nilai *fitness* minimum dari fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan yang mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus yang dihasilkan dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam analisis aliran daya. Jika partikel yang akan menjadi calon solusi memenuhi

batasan-batasan tersebut maka nilai fitness partikel tersebut akan menjadi posisi terbaik partikel itu sendiri. Posisi terbaik global didapatkan dengan cara mencari nilai paling minimum dari partikel yang memiliki posisi terbaik lokal. Setiap partikel akan mengevaluasi dirinya sendiri dan partikel lain dalam pencarian posisi terbaik global.

#### **3.2.3.5 Update kecepatan dan Posisi**

Tujuan dari proses pembaruan kecepatan setiap partikel adalah agar algoritma PSO dapat mencapai konvergensi dengan cepat. Setiap partikel memiliki kecenderungan tersendiri dalam menentukan pembaruan kecepatannya. *Update* kecepatan setiap partikel mengacu pada dua hal, yaitu *Pbest* dan *Gbest*. Partikel tersebut dengan konstanta pergerakan yang diatur acak akan cenderung mendekati posisi terbaik global atau cenderung menjauhi posisi terbaik global karena pada iterasi tertentu posisi terbaik global tersebut belum tentu akan menjadi nilai dengan fungsi objektif terbaik.

#### **3.2.3.6 Pembatasan Pergerakan Partikel Menggunakan Inersia**

Untuk menghindari kemungkinan partikel melaju melebihi daerah pencarian nilai objektif terbaik pada saat transisi antara akhir iterasi dan kembali ke tahap awal iterasi, hal yang harus dilakukan adalah dengan membatasi pergerakan partikel.

#### **3.2.3.7 Hasil OPF**

Hasil dari OPF ini berupa hasil *loadflow* (daya, aliran daya pada saluran, dan nilai *losses*), dan biaya pembangkit.

#### **3.2.4 Evaluasi Fitness Populasi**

Evaluasi nilai *fitness* dilakukan untuk mendapatkan nilai *fitness* terbaik dengan mempertimbangkan batasan-batasan yang telah ditentukan. Batasan tersebut berupa batasan pada submasalah *optimal power flow*, *minimum up/down time*, dan biaya pembangkitan minimum. Partikel yang melanggar batasan tidak termasuk dalam pemilihan calon solusi.

### 3.2.5 Penentuan *Pbest* dan *Gbest*

Parameter pemilihan fitness pada metode PSO ini didasarkan pada dua hal yaitu posisi terbaik local (*Pbest*) dan global (*Gbest*). *Pbest* adalah posisi terbaik yang dimiliki oleh masing-masing partikel sedangkan *Gbest* merupakan posisi terbaik yang dimiliki oleh kumpulan partikel tersebut.

Fungsi objektif dari tugas akhir ini adalah mencari nilai *fitness* minimum dari fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan yang mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus yang dihasilkan dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam analisis *security constrained unit commitment*. Jika partikel yang akan menjadi calon solusi memenuhi batasan-batasan tersebut maka nilai fitness partikel tersebut akan menjadi posisi terbaik partikel itu sendiri. Posisi terbaik global didapatkan dengan cara mencari nilai paling minimum dari partikel yang memiliki posisi terbaik lokal. Setiap partikel akan mengevaluasi dirinya sendiri dan partikel lain dalam pencarian posisi terbaik global.

### 3.2.6 Update Kecepatan dan Posisi Partikel

Tujuan dari proses pembaruan kecepatan setiap partikel adalah agar algoritma PSO dapat mencapai konvergensi dengan cepat. Setiap partikel memiliki kecenderungan tersendiri dalam menentukan pembaruan kecepatannya. *Update* kecepatan setiap partikel mengacu pada dua hal, yaitu *Pbest* dan *Gbest*. Partikel tersebut dengan konstanta pergerakan yang diatur acak akan cenderung mendekati posisi terbaik global atau cenderung menjauhi posisi terbaik global karena pada iterasi tertentu posisi terbaik global tersebut belum tentu akan menjadi nilai dengan fungsi objektif terbaik. *Update* kecepatan dirumuskan dengan persamaan 3.8:

$$v_i(t) = wv_i(t - 1) + c_1r_1(P_{best_i} - x_i(t - 1)) + c_2r_2(G_{best} - x_i(t - 1)) \quad (3.8)$$

Untuk merubah posisi partikel dalam bentuk bilangan biner, maka digunakan fungsi sigmoid yang dirumuskan pada persamaan 3.9 seperti berikut.

$$s(v_i(t)) = (1 + e^{-v_i(t)})^{-1} \quad (3.9)$$

$$x_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{jika } \text{rand}(1.0) < s(v_i(t)) \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3.10)$$

Keterangan :

|             |   |
|-------------|---|
| $v$         | : kecepatan partikel                              |
| $i$         | : indeks partikel                                 |
| $t$         | : iterasi ke- $t$ ( $t = 1, 2, \dots, n$ )        |
| $P_{best}$  | : posisi terbaik lokal                            |
| $G_{best}$  | : posisi terbaik global                           |
| $w$         | : bobot inersia                                   |
| $c_1, c_2$  | : konstanta positif = 2                           |
| $r_1, r_2$  | : bilangan random yang berkisar antara 0 sampai 1 |
| $s(v_i(t))$ | : fungsi sigmoid                                  |

### 3.2.7 Pembatasan Pergerakan Partikel

Untuk menghindari kemungkinan partikel melaju melebihi daerah pencarian nilai objektif terbaik pada saat transisi antara akhir iterasi dan kembali ke tahap awal iterasi, hal yang harus dilakukan adalah dengan membatasi pergerakan partikel menggunakan inersia. Inersia dirumuskan dengan persamaan:

$$w(t) = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{max.iter} \right) \times t \quad (3.11)$$

Keterangan:

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| $w$        | : bobot inersia                |
| $w_{max}$  | : bobot inersia maksimal = 0.9 |
| $w_{min}$  | : bobot inersia minimal = 0.4  |
| $max.iter$ | : iterasi maksimal             |

### 3.2.8 Kombinasi Hasil Untuk Penjadwalan

Hasil akhir dari proses ini berupa penjadwalan nyala-mati (*on-off*) unit pembangkit, biaya operasi, hasil *optimal power flow* berupa kapasitas saluran, daya terbangkit, dan *losses*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi program operasi *Security Constrained Unit Commitment* dengan fungsi biaya tidak mulus menggunakan algoritma *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO). Simulasi dilakukan dengan dua kondisi, kondisi pertama adalah kondisi normal, dan kondisi kedua adalah kondisi satu saluran transmisi terputus (kontingensi N-1).

### 4.1 Hasil Simulasi Pada Kondisi Normal

Pada kondisi ini sistem tidak mengalami gangguan kontingensi N-1.

#### 4.1.1 Daya Aktif Terbangkit Setiap Unit Pembangkit

Kasus pertama adalah membandingkan daya aktif terbangkit dengan batas Daya minimum (Pmin) dan daya maksimum (Pmax) setiap unit generator. Daya terbangkit minimum dan maksimum dapat dilihat paada teabel 4.1, dan daya terbangkit setiap unit pembangkit dapat dilihat pada tabel 4.2

**Tabel 4. 1** Batas daya terbangkit minimum dan maksimum

| Daya Terbangkit | Pembangkit Ke- |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 1 (MW)         | 2 (MW) | 3 (MW) | 4 (MW) | 5 (MW) | 6 (MW) |
| Minimum         | 10             | 20     | 15     | 10     | 10     | 12     |
| Maksimum        | 200            | 100    | 90     | 30     | 30     | 30     |

**Tabel 4. 2** Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi normal

| Jam Ke- | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|---------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| 1       | 149.7304   | 22.7837 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 2       | 156.4666   | 47.7833 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 3       | 199.6001   | 41.4698 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 4       | 199.7090   | 60.9700 | 22.0800 | 0       | 0       | 0       |

**(Lanjutan) Tabel 4. 3** Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi normal

| Jam | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|-----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ke- | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| 5   | 199.1060   | 60.9700 | 29.4805 | 0       | 0       | 12.0060 |
| 6   | 199.4600   | 72.9739 | 0       | 0       | 0       | 16.0060 |
| 7   | 199.5925   | 59.6535 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 8   | 152.3054   | 69.8677 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 9   | 149.7323   | 50.0655 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 10  | 141.9616   | 25.0655 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 11  | 132.1155   | 20.0000 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 12  | 146.1238   | 20.0028 | 0       | 0       | 0       | 0       |

#### 4.1.2 Power Balance

Kasus kedua adalah membandingkan nilai total daya terbangkit  $P$  (MW) dengan total beban ( $P_{demand}$ ) dan total rugi daya pada saluran ( $P_{losses}$ ). Tujuan dari batasan *power balance* adalah untuk menjaga frekuensi sistem pada frekuensi 50 Hz. Tabel *power balance* sistem pada kondisi normal dapat dilihat pada tabel 4.3

**Tabel 4. 4** *Power Balance* pada kondisi normal

| Jam | Daya Aktif (MW) |         |              |                    |
|-----|-----------------|---------|--------------|--------------------|
| Ke- | Beban           | Losses  | Beban+Losses | Total Pembangkitan |
| 1   | 166             | 6.5142  | 172.5141     | 172.5141           |
| 2   | 196             | 8.2498  | 204.2498     | 204.2499           |
| 3   | 229             | 12.0700 | 241.0699     | 241.0699           |
| 4   | 267             | 15.7591 | 282.7591     | 282.7590           |
| 5   | 283.4           | 18.1564 | 301.5564     | 301.5625           |
| 6   | 272             | 16.4399 | 288.4399     | 288.4399           |
| 7   | 246             | 13.2462 | 259.2461     | 259.2460           |
| 8   | 213             | 9.1730  | 222.1730     | 222.1731           |

(Lanjutan)Tabel 4. 5 *Power Balance* pada kondisi normal

| Jam Ke- | Daya Aktif (MW) |        |              |                    |
|---------|-----------------|--------|--------------|--------------------|
|         | Beban           | Losses | Beban+Losses | Total Pembangkitan |
| 9       | 192             | 7.7978 | 199.7978     | 199.7978           |
| 10      | 161             | 6.0272 | 167.0271     | 167.0271           |
| 11      | 147.0001        | 5.1154 | 152.1155     | 152.1155           |
| 12      | 160             | 6.1266 | 166.1266     | 166.1266           |

#### 4.1.3 Waktu Nyala dan Padam Minimum

Kasus ketiga adalah menganalisa waktu nyala minimum dan waktu padam minimum setiap unit pembangkit dalam 12 jam. Waktu nyala-padam minimum dapat dilihat pada tabel 4.4, dan kombinasi nyala-padam unit pembangkit pada kondisi normal selama 12 jam dapat dilihat pada tabel 4.5

Tabel 4. 6 Waktu nyala dan padam minimum

| Waktu Minimum (Jam) | Kombinasi |    |    |    |    |    |
|---------------------|-----------|----|----|----|----|----|
|                     | P1        | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| Nyala               | 4         | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Mati                | 4         | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |

Tabel 4. 7 Kombinasi penjadwalan pembangkit setiap jam pada kondisi normal

| Jam Ke- | Kombinasi |    |    |    |    |    |
|---------|-----------|----|----|----|----|----|
|         | P1        | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| 1       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4       | 1         | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 5       | 1         | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 6       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 7       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |

**(Lanjutan)Tabel 4. 8** Kombinasi penjadwalan pembangkit setiap jam pada kondisi normal

| Jam Ke- | Kombinasi |    |    |    |    |    |
|---------|-----------|----|----|----|----|----|
|         | P1        | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| 8       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |

#### 4.1.4 Perubahan Daya Terbangkit Setiap Level Beban (*Ramprate*)

Kasus keempat adalah membandingkan nilai perubahan daya terbangkit setiap unit pembangkit antara level beban dengan batas kemampuan *ramprate* setiap unit pembangkit. Batas *ramprate* dapat dilihat pada tabel 4.6 Nilai perubahan daya antara level beban dapat dilihat pada tabel 4.7

**Tabel 4. 9** Batas *ramprate* setiap unit pembangkit

| Ramprate  | Batas (MW) |         |         |         |         |         |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| Ramp-Up   | 80         | 25      | 15      | 15      | 10      | 15      |
| Ramp-down | 80         | 25      | 15      | 15      | 10      | 15      |

**Tabel 4. 10** Perubahan daya unit pembangkit setiap jam

| Transisi | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| Jam 1-2  | 6.7362     | 24.9996 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 2-3  | 43.1335    | -6.3135 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 3-4  | 0.1089     | 19.5002 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 4-5  | -0.6030    | 0       | 7.4005  | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 5-6  | 0.3540     | 12.0039 | N/A     | N/A     | N/A     | 4.0000  |

**(Lanjutan)Tabel 4. 11** Perubahan daya unit pembangkit setiap jam

| Transisi  | Pembangkit |          |         |         |         |         |
|-----------|------------|----------|---------|---------|---------|---------|
|           | P1 (MW)    | P2 (MW)  | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| Jam 6-7   | 0.1325     | -13.3204 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 7-8   | -47.2871   | 10.2142  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 8-9   | -2.5731    | -19.8022 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 9-10  | -7.7707    | -25.0000 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 10-11 | -9.8461    | -5.0655  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 11-12 | 14.0083    | 0.0028   | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |

#### 4.1.5 Aliran Daya Pada Saluran

Kasus kelima adalah membandingkan aliran daya pada setiap saluran pada kondisi normal dengan batas kapasitas saluran transmisi yang telah ditentukan. Hasil simulasi aliran daya pada setiap saluran dapat dilihat pada tabel 4.8, 4.9, dan 4.10

**Tabel 4. 12** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 1-4

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |          |          |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|----------|----------|
|          |        |                         | 1 (MVA) | 2 (MVA) | 3 (MVA)  | 4 (MVA)  |
| 1        | 2      | 130                     | 70.8118 | 73.1833 | 104.0000 | 104.0000 |
| 1        | 3      | 130                     | 35.6881 | 38.8349 | 69.7740  | 67.7704  |
| 2        | 4      | 65                      | 22.9162 | 26.048  | 43.5047  | 35.9045  |
| 3        | 4      | 130                     | 32.9180 | 35.6147 | 65.0662  | 62.6088  |
| 2        | 5      | 130                     | 17.4139 | 21.3364 | 30.6572  | 28.8113  |
| 2        | 6      | 65                      | 28.2764 | 35.5115 | 52.0000  | 48.2751  |
| 4        | 6      | 90                      | 28.3142 | 43.7958 | 52.9486  | 56.0313  |
| 5        | 7      | 70                      | 16.9229 | 20.896  | 30.2238  | 28.3098  |
| 6        | 7      | 130                     | 5.1922  | 4.8736  | 4.5274   | 5.1808   |
| 6        | 8      | 32                      | 21.8482 | 25.6    | 25.6000  | 25.6000  |

**(Lanjutan) Tabel 4. 13** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 1-4

| Dari | Ke  | Kapasitas     | Jam Ke- |         |         |         |
|------|-----|---------------|---------|---------|---------|---------|
| Bus  | Bus | Saluran (MVA) | 1 (MVA) | 2 (MVA) | 3 (MVA) | 4 (MVA) |
| 6    | 9   | 65            | 17.6231 | 18.0633 | 30.7792 | 30.7095 |
| 6    | 10  | 32            | 10.3338 | 10.5024 | 17.6482 | 17.7057 |
| 9    | 10  | 65            | 17.6354 | 18.1034 | 31.0483 | 30.8799 |
| 9    | 11  | 65            | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 4    | 12  | 65            | 30.7358 | 20.1805 | 49.6633 | 34.7763 |
| 12   | 13  | 65            | 12.1666 | 39.8723 | 8.3773  | 38.5901 |
| 12   | 14  | 32            | 4.3896  | 7.4673  | 8.7383  | 11.483  |
| 12   | 15  | 32            | 6.0618  | 16.1427 | 19.0254 | 25.6000 |
| 12   | 16  | 32            | 5.1938  | 13.5426 | 5.8147  | 14.4534 |
| 14   | 15  | 16            | 1.6719  | 1.0628  | 1.1663  | 2.6235  |
| 16   | 17  | 16            | 2.1001  | 9.8975  | 1.5549  | 9.4005  |
| 15   | 18  | 16            | 6.6632  | 11.2493 | 5.6407  | 11.0812 |
| 18   | 19  | 16            | 3.8473  | 7.9882  | 1.7896  | 6.5228  |
| 19   | 20  | 32            | 4.6129  | 3.4738  | 9.7939  | 7.1654  |
| 10   | 20  | 32            | 6.5810  | 5.3223  | 12.6399 | 10.3741 |
| 10   | 17  | 32            | 5.8112  | 2.5803  | 9.3740  | 3.7823  |
| 10   | 21  | 32            | 13.6489 | 14.8363 | 14.8654 | 19.3971 |
| 10   | 22  | 32            | 7.7638  | 7.3510  | 6.7135  | 8.9971  |
| 21   | 22  | 32            | 13.5546 | 9.4583  | 9.5629  | 8.8637  |
| 15   | 23  | 16            | 11.2177 | 5.5737  | 4.7878  | 7.0756  |
| 22   | 24  | 16            | 5.6457  | 12.8000 | 10.2026 | 2.5023  |
| 23   | 24  | 16            | 6.2535  | 3.6586  | 0.5095  | 2.6179  |
| 24   | 25  | 16            | 9.4765  | 1.7181  | 4.5298  | 10.7818 |
| 25   | 26  | 16            | 3.0939  | 12.8000 | 4.2821  | 5.0014  |
| 25   | 27  | 16            | 11.7898 | 1.7181  | 6.1822  | 12.8000 |

**(Lanjutan) Tabel 4. 14** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 1-4

| Dari<br>Bus | Ke<br>Bus | Kapasitas<br>Saluran<br>(MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|-------------|-----------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|             |           |                               | 1 (MVA) | 2 (MVA) | 3 (MVA) | 4 (MVA) |
| 28          | 27        | 65                            | 10.172  | 16.8206 | 22.3820 | 8.0556  |
| 27          | 29        | 16                            | 5.4157  | 6.4186  | 7.5323  | 8.8175  |
| 27          | 30        | 16                            | 6.1975  | 7.3475  | 8.6255  | 10.1007 |
| 29          | 30        | 16                            | 3.2470  | 3.8415  | 4.4987  | 5.2563  |
| 8           | 28        | 32                            | 5.0434  | 2.3315  | 2.0293  | 5.2939  |
| 6           | 28        | 32                            | 7.7057  | 16.7370 | 22.5614 | 14.0341 |

**Tabel 4. 15** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 5-8

| Dari<br>Bus | Ke<br>Bus | Kapasitas<br>Saluran<br>(MVA) | Jam Ke-  |          |          |         |
|-------------|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------|---------|
|             |           |                               | 5 (MVA)  | 6 (MVA)  | 7(MVA)   | 8(MVA)  |
| 1           | 2         | 130                           | 104.0000 | 104.0000 | 104.0000 | 31.8144 |
| 1           | 3         | 130                           | 70.1481  | 68.6634  | 56.2828  | 23.3439 |
| 2           | 4         | 65                            | 49.3822  | 50.6711  | 38.4521  | 20.2921 |
| 3           | 4         | 130                           | 64.6200  | 63.3260  | 51.8936  | 20.5892 |
| 2           | 5         | 130                           | 34.6512  | 34.7859  | 27.9484  | 17.4022 |
| 2           | 6         | 65                            | 52.0000  | 52.0000  | 47.6752  | 25.9901 |
| 4           | 6         | 90                            | 52.6200  | 51.2341  | 44.1118  | 28.0298 |
| 5           | 7         | 70                            | 34.1531  | 34.2803  | 27.5453  | 17.1535 |
| 6           | 7         | 130                           | 4.0723   | 4.0810   | 4.6857   | 10.0711 |
| 6           | 8         | 32                            | 25.6000  | 25.6000  | 25.6000  | 25.6000 |
| 6           | 9         | 65                            | 35.7513  | 32.0325  | 23.3019  | 9.7317  |
| 6           | 10        | 32                            | 20.6240  | 18.4665  | 13.3887  | 6.3404  |
| 9           | 10        | 65                            | 35.9665  | 32.2202  | 23.4318  | 9.6882  |
| 9           | 11        | 65                            | 0        | 0        | 0        | 0       |

**(Lanjutan) Tabel 4. 16** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 5-8

| Dari<br>Bus | Ke<br>Bus | Kapasitas<br>Saluran<br>(MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|-------------|-----------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|             |           |                               | 5 (MVA) | 6 (MVA) | 7(MVA)  | 8(MVA)  |
| 4           | 12        | 65                            | 52.0000 | 52.0000 | 41.2530 | 19.9868 |
| 12          | 13        | 65                            | 5.0710  | 4.3647  | 8.1588  | 38.5157 |
| 12          | 14        | 32                            | 8.9606  | 9.9330  | 7.1085  | 7.1630  |
| 12          | 15        | 32                            | 15.9065 | 20.6048 | 11.1684 | 13.5994 |
| 12          | 16        | 32                            | 8.9110  | 5.7304  | 5.4210  | 10.453  |
| 14          | 15        | 16                            | 1.2246  | 1.1398  | 1.6154  | 1.5598  |
| 16          | 17        | 16                            | 3.6048  | 1.2995  | 0.9077  | 6.4186  |
| 15          | 18        | 16                            | 9.9680  | 6.2544  | 7.5018  | 10.1796 |
| 18          | 19        | 16                            | 5.1415  | 1.6180  | 3.3099  | 6.5556  |
| 19          | 20        | 32                            | 9.2613  | 12.0506 | 9.0938  | 4.5549  |
| 10          | 20        | 32                            | 12.7444 | 15.4719 | 12.1204 | 7.0187  |
| 10          | 17        | 32                            | 9.9246  | 12.4982 | 10.9126 | 3.7507  |
| 10          | 21        | 32                            | 18.7288 | 13.7008 | 10.3074 | 13.6496 |
| 10          | 22        | 32                            | 8.3680  | 6.1587  | 5.5109  | 9.3172  |
| 21          | 22        | 32                            | 10.5777 | 16.4016 | 18.9838 | 23.5534 |
| 15          | 23        | 16                            | 9.2660  | 4.5792  | 10.0446 | 11.1238 |
| 22          | 24        | 16                            | 5.0103  | 10.4879 | 4.9679  | 3.1291  |
| 23          | 24        | 16                            | 6.8986  | 2.1770  | 6.1780  | 8.4765  |
| 24          | 25        | 16                            | 11.2436 | 6.4293  | 5.5821  | 5.5483  |
| 25          | 26        | 16                            | 5.3139  | 5.0974  | 4.6037  | 3.9800  |
| 25          | 27        | 16                            | 12.800  | 10.3104 | 7.4222  | 7.9717  |
| 28          | 27        | 65                            | 10.0565 | 16.9987 | 13.7075 | 13.8346 |
| 27          | 29        | 16                            | 9.3844  | 8.9940  | 8.1082  | 6.9926  |
| 27          | 30        | 16                            | 10.7525 | 10.3040 | 9.2866  | 8.0062  |
| 29          | 30        | 16                            | 5.5872  | 5.3584  | 4.8379  | 4.1801  |

**(Lanjutan) Tabel 4. 17** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 5-8

| Dari<br>Bus | Ke<br>Bus | Kapasitas<br>Saluran<br>(MVA) | Jam Ke- |         |         |        |
|-------------|-----------|-------------------------------|---------|---------|---------|--------|
|             |           |                               | 5 (MVA) | 6 (MVA) | 7(MVA)  | 8(MVA) |
| 8           | 28        | 32                            | 5.2904  | 3.5737  | 3.8459  | 5.8304 |
| 6           | 28        | 32                            | 13.929  | 19.8062 | 14.4902 | 4.3637 |

**Tabel 4. 18** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 9-12

| Dari<br>Bus | Ke<br>Bus | Kapasitas<br>Saluran<br>(MVA) | Jam Ke-    |             |             |             |
|-------------|-----------|-------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|             |           |                               | 9<br>(MVA) | 10<br>(MVA) | 11<br>(MVA) | 12<br>(MVA) |
| 1           | 2         | 130                           | 86.6372    | 44.7239     | 102.6688    | 71.6652     |
| 1           | 3         | 130                           | 34.8153    | 37.1904     | 45.9509     | 28.3590     |
| 2           | 4         | 65                            | 16.7294    | 33.4179     | 25.6047     | 13.3651     |
| 3           | 4         | 130                           | 31.6967    | 34.5378     | 43.1522     | 25.7496     |
| 2           | 5         | 130                           | 16.2586    | 22.2368     | 18.9882     | 13.6183     |
| 2           | 6         | 65                            | 24.3740    | 39.4697     | 32.8895     | 20.0680     |
| 4           | 6         | 90                            | 36.9937    | 30.6813     | 36.3588     | 32.7575     |
| 5           | 7         | 70                            | 15.8763    | 21.7621     | 18.4898     | 13.1447     |
| 6           | 7         | 130                           | 8.7252     | 4.2240      | 3.9082      | 7.7636      |
| 6           | 8         | 32                            | 25.6000    | 23.2590     | 22.7043     | 22.2166     |
| 6           | 9         | 65                            | 11.6688    | 23.5737     | 19.0073     | 11.0926     |
| 6           | 10        | 32                            | 7.0531     | 13.6250     | 10.8416     | 6.7810      |
| 9           | 10        | 65                            | 11.6623    | 23.6591     | 19.1248     | 11.0807     |
| 9           | 11        | 65                            | 0          | 0           | 0           | 0           |
| 4           | 12        | 65                            | 19.1083    | 37.9094     | 34.4160     | 18.2393     |
| 12          | 13        | 65                            | 39.6965    | 10.5736     | 13.1967     | 40.5925     |
| 12          | 14        | 32                            | 6.7459     | 6.2247      | 5.5745      | 5.7687      |
| 12          | 15        | 32                            | 13.4434    | 13.4897     | 11.9950     | 11.9139     |

**(Lanjutan)Tabel 4. 19** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi normal jam ke 9-12

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |          |          |          |
|----------|--------|-------------------------|---------|----------|----------|----------|
|          |        |                         | 9 (MVA) | 10 (MVA) | 11 (MVA) | 12 (MVA) |
| 12       | 16     | 32                      | 11.6537 | 4.6127   | 3.4429   | 12.0516  |
| 14       | 15     | 16                      | 0.9302  | 1.1770   | 0.8193   | 0.6116   |
| 16       | 17     | 16                      | 8.0693  | 1.6215   | 0.8589   | 9.0481   |
| 15       | 18     | 16                      | 10.4233 | 4.4968   | 3.5083   | 10.1942  |
| 18       | 19     | 16                      | 7.2141  | 1.9089   | 1.2482   | 7.4910   |
| 19       | 20     | 32                      | 3.5401  | 6.4908   | 6.5276   | 2.1362   |
| 10       | 20     | 32                      | 5.5243  | 8.4400   | 8.3131   | 3.3523   |
| 10       | 17     | 32                      | 2.1507  | 6.0588   | 6.3540   | 2.2470   |
| 10       | 21     | 32                      | 11.5934 | 15.1369  | 11.0068  | 13.3382  |
| 10       | 22     | 32                      | 6.6916  | 8.0769   | 5.8645   | 7.4869   |
| 21       | 22     | 32                      | 16.0293 | 9.332    | 9.8678   | 12.498   |
| 15       | 23     | 16                      | 8.1208  | 5.7263   | 4.1191   | 6.0714   |
| 22       | 24     | 16                      | 3.1469  | 3.7547   | 7.4521   | 4.4632   |
| 23       | 24     | 16                      | 11.063  | 0.8786   | 0.5024   | 11.7746  |
| 24       | 25     | 16                      | 3.5908  | 7.9549   | 4.3078   | 4.4530   |
| 25       | 26     | 16                      | 3.5833  | 3.0004   | 2.7376   | 2.9815   |
| 25       | 27     | 16                      | 4.6293  | 10.1066  | 4.6141   | 5.1533   |
| 28       | 27     | 65                      | 10.9294 | 10.8146  | 15.9452  | 11.4913  |
| 27       | 29     | 16                      | 6.2848  | 5.2515   | 4.7874   | 5.2183   |
| 27       | 30     | 16                      | 7.1940  | 6.0095   | 5.4777   | 5.9715   |
| 29       | 30     | 16                      | 3.7622  | 3.1489   | 2.8727   | 3.1291   |
| 8        | 28     | 32                      | 4.0571  | 3.0182   | 1.8243   | 3.5820   |
| 6        | 28     | 32                      | 8.3953  | 10.4303  | 14.5055  | 6.8930   |

## 4.2 Hasil Simulasi Pada Kondisi Kontingensi Saluran N-1

Pada kondisi ini, simulasi dilakukan dalam kondisi saluran transmisi tenaga listrik terputus satu saluran (Kontingensi N-1), yaitu pada saluran dari bus 6 ke bus 9. Simulasi pada kondisi Kontingensi N-1 merupakan kondisi yang harus dilakukan pada operasi *Security Constrained Unit Commitment* (SCUC) untuk mendapatkan penjadwalan pembangkit yang dapat mempertimbangkan keamanan sistem dengan biaya pembangkitan minimum.

### 4.2.1 Daya Terbangkit Setiap Unit Pembangkit

Kasus pertama pada kondisi kontingensi N-1 ini adalah membandingkan daya terbangkit dengan batas Daya minimum (Pmin) dan daya maksimum (Pmax) setiap unit generator. Batas daya terbangkit minimum dan maksimum dan daya terbangkit setiap unit pembangkit dapat dilihat pada tabel 4.11 dan 4.12

**Tabel 4. 20** Batas daya terbangkit minimum dan maksimum

| Daya Terbangkit | Pembangkit Ke- |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 1 (MW)         | 2(MW) | 3(MW) | 4(MW) | 5(MW) | 6(MW) |
| Minimum         | 10             | 20    | 15    | 10    | 10    | 12    |
| Maksimum        | 200            | 100   | 90    | 30    | 30    | 30    |

**Tabel 4. 21** Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi kontingensi N-1

| Jam Ke- | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|---------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| 1       | 149.7318   | 23.0548 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 2       | 156.6088   | 48.0460 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 3       | 199.5985   | 41.9729 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 4       | 199.4730   | 60.9700 | 23.2000 | 0       | 0       | 0       |
| 5       | 199.5093   | 60.9700 | 30.0000 | 0       | 0       | 12.0500 |
| 6       | 199.4001   | 72.8600 | 0       | 0       | 0       | 17.1190 |
| 7       | 199.5930   | 60.2605 | 0       | 0       | 0       | 0       |

**(Lanjutan) Tabel 4. 22** Daya terbangkit setiap unit generator pada kondisi kontingensi N-1

| Jam<br>Ke- | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|            | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| 8          | 152.7459   | 69.8660 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 9          | 149.7271   | 50.4530 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 10         | 141.8191   | 25.4544 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 11         | 132.3399   | 20.0000 | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 12         | 146.3715   | 20.0099 | 0       | 0       | 0       | 0       |

#### 4.2.2 Power Balance

Kasus kedua adalah membandingkan nilai total daya terbangkit P (MW) dengan total beban (*Pdemand*) dan total rugi daya aktif pada saluran (*Plosses*). Power balance sistem pada kondisi kontingensi N-1 dapat dilihat pada tabel 4.13

**Tabel 4. 23** *Power Balance* pada kondisi kontingensi N-1

| Jam<br>Ke- | Daya Aktif (MW) |               |                      |                    |
|------------|-----------------|---------------|----------------------|--------------------|
|            | Beban           | <i>losses</i> | Beban+ <i>losses</i> | Total Pembangkitan |
| 1          | 165.9999        | 6.7866        | 172.7865             | 172.7866           |
| 2          | 196             | 8.6548        | 204.6548             | 204.6548           |
| 3          | 228.9999        | 12.5715       | 241.5714             | 241.5714           |
| 4          | 267             | 16.643        | 283.643              | 283.643            |
| 5          | 283.4           | 19.1292       | 302.5292             | 302.5293           |
| 6          | 272             | 17.3792       | 289.3792             | 289.3791           |
| 7          | 245.9999        | 13.8535       | 259.8534             | 259.8535           |
| 8          | 213             | 9.6118        | 222.6118             | 222.6119           |
| 9          | 192             | 8.1801        | 200.1801             | 200.1801           |
| 10         | 160.9999        | 6.2736        | 167.2735             | 167.2735           |
| 11         | 147.0001        | 5.3398        | 152.3399             | 152.3399           |
| 12         | 160             | 6.3814        | 166.3814             | 166.3814           |

### 4.2.3 Waktu Nyala dan Padam Minimum

Kasus ketiga adalah menganalisa waktu nyala minimum dan waktu padam minimum setiap unit pembangkit dalam 12 jam. Batas waktu penyalaaan dan padam minimum dapat dilihat pada tabel 4.14, dan kombinasi nyala-padam unit pembangkit selama 12 jam dapat dilihat pada tabel 4.15

**Tabel 4. 24** Waktu nyala dan padam minimum

| Waktu Minimum (Jam) | Kombinasi |    |    |    |    |    |
|---------------------|-----------|----|----|----|----|----|
|                     | P1        | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| Nyala               | 4         | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Mati                | 4         | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |

**Tabel 4. 25** Kombinasi penjadwalan pembangkit setiap jam pada kondisi kontingensi N-1

| Jam Ke- | Kombinasi |    |    |    |    |    |
|---------|-----------|----|----|----|----|----|
|         | P1        | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| 1       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4       | 1         | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 5       | 1         | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 6       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 7       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9       | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12      | 1         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |

#### 4.2.4 Perubahan Daya Terbangkit Setiap Level Beban (*Ramprate*)

Kasus keempat pada kondisi kontingensi N-1 adalah membandingkan nilai perubahan daya terbangkit setiap unit pembangkit antara level beban dengan batas kemampuan *ramprate* setiap unit pembangkit. Batas *ramprate* dapat dilihat pada tabel 4.16, dan nilai perubahan daya antara level beban dapat dilihat pada tabel 4.17

**Tabel 4. 26** Batas *ramprate* setiap unit pembangkit

| Ramprate  | Batas (MW) |         |         |         |         |         |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| Ramp-Up   | 80         | 25      | 15      | 15      | 10      | 15      |
| Ramp-down | 80         | 25      | 15      | 15      | 10      | 15      |

**Tabel 4. 27** Perubahan daya unit pembangkit setiap jam

| Transisi  | Pembangkit |         |         |         |         |         |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | P1 (MW)    | P2 (MW) | P3 (MW) | P4 (MW) | P5 (MW) | P6 (MW) |
| Jam 1-2   | 6.877      | 24.991  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 2-3   | 42.990     | -6.073  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 3-4   | -0.126     | 18.997  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 4-5   | 0.036      | 0       | 6.800   | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 5-6   | -0.109     | 11.890  | N/A     | N/A     | N/A     | 5.0690  |
| Jam 6-7   | 0.193      | -12.600 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 7-8   | 46.847     | 9.606   | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 8-9   | -3.019     | -19.413 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 9-10  | -7.908     | -24.999 | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 10-11 | -9.479     | -5.454  | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |
| Jam 11-12 | 14.032     | 0.010   | N/A     | N/A     | N/A     | N/A     |

#### 4.2.5 Aliran Daya Pada Saluran

Kasus pertama adalah membandingkan aliran daya pada setiap saluran pada kondisi kontingensi N-1 dengan batas kapasitas saluran transmisi yang telah ditentukan. Hasil simulasi aliran daya pada setiap saluran dapat dilihat pada tabel 4.18, 4.19, dan 4.20

**Tabel 4. 28** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 1-4

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |          |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
|          |        |                         | 1       | 2       | 3       | 4        |
| 1        | 2      | 130                     | 13.9671 | 96.7530 | 52.4604 | 104.0000 |
| 1        | 3      | 130                     | 15.7862 | 40.5895 | 37.0881 | 53.4793  |
| 2        | 4      | 65                      | 16.5188 | 20.7722 | 30.5621 | 31.3230  |
| 3        | 4      | 130                     | 13.6401 | 37.3026 | 33.5528 | 48.9358  |
| 2        | 5      | 130                     | 14.1011 | 17.8237 | 23.5002 | 25.1652  |
| 2        | 6      | 65                      | 20.5156 | 27.7064 | 38.5482 | 40.3933  |
| 4        | 6      | 90                      | 21.1702 | 34.2640 | 37.5646 | 43.0049  |
| 5        | 7      | 70                      | 13.4261 | 17.4573 | 23.0758 | 24.8854  |
| 6        | 7      | 130                     | 7.7346  | 7.78580 | 6.1188  | 9.0087   |
| 6        | 8      | 32                      | 21.6962 | 25.6000 | 25.6000 | 25.6000  |
| 6        | 10     | 32                      | 11.2288 | 13.6197 | 14.9899 | 19.1652  |
| 9        | 10     | 65                      | 0       | 0       | 0       | 0        |
| 9        | 11     | 65                      | 0       | 0       | 0       | 0        |
| 4        | 12     | 65                      | 19.3573 | 25.0359 | 24.7220 | 31.6610  |
| 12       | 13     | 65                      | 40.7815 | 39.8043 | 39.6487 | 38.5898  |
| 12       | 14     | 32                      | 6.0720  | 8.8932  | 8.6138  | 10.0839  |
| 12       | 15     | 32                      | 12.6948 | 21.8104 | 18.4918 | 21.5668  |
| 12       | 16     | 32                      | 14.1511 | 12.9078 | 15.1686 | 17.0712  |
| 14       | 15     | 16                      | 0.7031  | 2.3825  | 1.0719  | 1.3512   |
| 16       | 17     | 16                      | 11.0086 | 9.2212  | 10.8645 | 11.9678  |

**(Lanjutan) Tabel 4. 29** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 1-4

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |        |                         | 1       | 2       | 3       | 4       |
| 15       | 18     | 16                      | 11.7328 | 9.5853  | 12.6867 | 12.8000 |
| 18       | 19     | 16                      | 8.9135  | 6.3275  | 8.8160  | 9.8103  |
| 19       | 20     | 32                      | 2.3683  | 4.3551  | 3.9416  | 4.5992  |
| 10       | 20     | 32                      | 2.9209  | 6.5299  | 6.3086  | 7.5201  |
| 10       | 17     | 32                      | 3.6635  | 1.8555  | 2.5191  | 2.2196  |
| 10       | 21     | 32                      | 11.6474 | 10.2744 | 9.4437  | 10.2972 |
| 10       | 22     | 32                      | 6.7597  | 6.6626  | 5.9531  | 6.2944  |
| 21       | 22     | 32                      | 14.1625 | 18.7768 | 20.2258 | 22.8161 |
| 15       | 23     | 16                      | 7.0657  | 6.9916  | 5.2671  | 6.5538  |
| 22       | 24     | 16                      | 9.7933  | 4.7193  | 2.6452  | 3.8761  |
| 23       | 24     | 16                      | 10.7839 | 3.1236  | 12.5823 | 11.3637 |
| 24       | 25     | 16                      | 8.8034  | 4.9517  | 3.8569  | 5.3059  |
| 25       | 26     | 16                      | 3.0938  | 3.6587  | 4.2814  | 5.0022  |
| 25       | 27     | 16                      | 11.0816 | 7.3617  | 2.0520  | 8.4938  |
| 28       | 27     | 65                      | 11.6807 | 12.7997 | 19.417  | 15.1753 |
| 27       | 29     | 16                      | 5.4157  | 6.4186  | 7.5282  | 8.8232  |
| 27       | 30     | 16                      | 6.1975  | 7.3475  | 8.6205  | 10.1077 |
| 29       | 30     | 16                      | 3.2470  | 3.8415  | 4.4974  | 5.2581  |
| 8        | 28     | 32                      | 5.0802  | 3.1907  | 2.4350  | 3.9299  |
| 6        | 28     | 32                      | 6.8386  | 12.2660 | 19.9879 | 16.1144 |

**Tabel 4. 30** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 5-8

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke-  |          |          |         |
|----------|--------|-------------------------|----------|----------|----------|---------|
|          |        |                         | 5        | 6        | 7        | 8       |
| 1        | 2      | 130                     | 104.0000 | 104.0000 | 103.8260 | 69.8955 |
| 1        | 3      | 130                     | 92.3042  | 67.1508  | 55.6711  | 45.4039 |
| 2        | 4      | 65                      | 52.0000  | 44.0543  | 37.8474  | 35.6586 |
| 3        | 4      | 130                     | 84.8994  | 61.9220  | 51.3049  | 41.8185 |
| 2        | 5      | 130                     | 36.2840  | 30.6093  | 27.9511  | 23.8968 |
| 2        | 6      | 65                      | 52.0000  | 52.0000  | 47.7341  | 40.3637 |
| 4        | 6      | 90                      | 53.9516  | 40.8939  | 46.0855  | 26.5615 |
| 5        | 7      | 70                      | 35.7001  | 30.2585  | 27.5761  | 23.4784 |
| 6        | 7      | 130                     | 3.4536   | 5.6782   | 4.8861   | 4.5760  |
| 6        | 8      | 32                      | 25.6000  | 25.6000  | 25.6000  | 25.6000 |
| 6        | 10     | 32                      | 25.6000  | 25.6000  | 25.6000  | 21.9092 |
| 9        | 10     | 65                      | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 9        | 11     | 65                      | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 4        | 12     | 65                      | 52.0000  | 52.0000  | 36.7922  | 49.3621 |
| 12       | 13     | 65                      | 2.1395   | 5.8501   | 38.9996  | 9.8321  |
| 12       | 14     | 32                      | 10.9148  | 9.1329   | 10.4509  | 8.0653  |
| 12       | 15     | 32                      | 24.3084  | 17.4168  | 24.6322  | 17.2849 |
| 12       | 16     | 32                      | 18.9398  | 12.4566  | 21.2204  | 8.1631  |
| 14       | 15     | 16                      | 1.5344   | 0.9146   | 2.2653   | 1.1547  |
| 16       | 17     | 16                      | 12.8000  | 7.3317   | 12.8000  | 4.1956  |
| 15       | 18     | 16                      | 12.8000  | 11.9866  | 12.8000  | 7.4479  |
| 18       | 19     | 16                      | 10.5377  | 7.3431   | 12.0535  | 3.8976  |
| 19       | 20     | 32                      | 4.6532   | 6.7173   | 3.7487   | 7.0953  |
| 10       | 20     | 32                      | 7.7732   | 9.9538   | 5.2947   | 9.6687  |

**(Lanjutan) Tabel 4. 31** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 5-8

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |        |                         | 5       | 6       | 7       | 8       |
| 10       | 17     | 32                      | 2.9880  | 5.8046  | 5.8350  | 6.0411  |
| 10       | 21     | 32                      | 16.3558 | 10.0154 | 14.9718 | 10.2717 |
| 10       | 22     | 32                      | 6.7448  | 5.9752  | 6.6833  | 6.8887  |
| 21       | 22     | 32                      | 11.5097 | 22.7633 | 11.4615 | 20.6818 |
| 15       | 23     | 16                      | 2.2547  | 8.6613  | 4.4881  | 4.5802  |
| 22       | 24     | 16                      | 5.8736  | 4.0945  | 6.4411  | 3.7135  |
| 23       | 24     | 16                      | 12.3096 | 7.8447  | 12.8000 | 2.4303  |
| 24       | 25     | 16                      | 8.2885  | 8.7855  | 3.0955  | 12.8000 |
| 25       | 26     | 16                      | 5.3141  | 5.0972  | 4.6033  | 3.9788  |
| 25       | 27     | 16                      | 12.4553 | 12.5127 | 6.3879  | 12.8000 |
| 28       | 27     | 65                      | 31.4524 | 17.5944 | 24.3452 | 7.4202  |
| 27       | 29     | 16                      | 9.3844  | 8.9940  | 8.1034  | 6.9858  |
| 27       | 30     | 16                      | 10.7525 | 10.3040 | 9.2807  | 7.9977  |
| 29       | 30     | 16                      | 5.5872  | 5.3584  | 4.8364  | 4.1780  |
| 8        | 28     | 32                      | 2.7456  | 3.4545  | 2.2498  | 4.5993  |
| 6        | 28     | 32                      | 25.6000 | 19.8700 | 25.3134 | 11.7379 |

**Tabel 4. 32** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 9-12

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |        |                         | 9       | 10      | 11      | 12      |
| 1        | 2      | 130                     | 95.4599 | 29.8641 | 75.6998 | 94.2215 |
| 1        | 3      | 130                     | 39.6199 | 29.8650 | 31.9282 | 40.8076 |
| 2        | 4      | 65                      | 19.9388 | 28.8908 | 16.2173 | 21.6500 |

**(Lanjutan) Tabel 4. 33** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 9-12

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |        |                         | 9       | 10      | 11      | 12      |
| 3        | 4      | 130                     | 84.8994 | 61.9220 | 51.3049 | 41.8185 |
| 2        | 5      | 130                     | 36.2840 | 30.6093 | 27.9511 | 23.8968 |
| 2        | 6      | 65                      | 27.8313 | 32.3474 | 21.9396 | 28.884  |
| 4        | 6      | 90                      | 37.9236 | 20.9827 | 28.3739 | 34.5122 |
| 5        | 7      | 70                      | 17.4103 | 18.5796 | 13.6003 | 17.0521 |
| 6        | 7      | 130                     | 7.4198  | 3.6454  | 5.8338  | 4.8383  |
| 6        | 8      | 32                      | 25.6000 | 23.3251 | 21.3307 | 25.0570 |
| 6        | 10     | 32                      | 12.7144 | 15.4735 | 14.3080 | 17.6170 |
| 9        | 10     | 65                      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 9        | 11     | 65                      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 4        | 12     | 65                      | 21.2690 | 38.0402 | 21.2247 | 24.8764 |
| 12       | 13     | 65                      | 39.9609 | 13.3188 | 39.4907 | 39.4534 |
| 12       | 14     | 32                      | 7.4295  | 5.9946  | 7.7126  | 8.6333  |
| 12       | 15     | 32                      | 16.2451 | 12.6914 | 20.4714 | 23.3447 |
| 12       | 16     | 32                      | 14.7755 | 5.3798  | 14.2893 | 15.9316 |
| 14       | 15     | 16                      | 1.1589  | 0.8105  | 2.8299  | 3.3260  |
| 16       | 17     | 16                      | 11.1643 | 2.4738  | 11.4525 | 12.8000 |
| 15       | 18     | 16                      | 12.0652 | 5.1282  | 9.7650  | 10.6289 |
| 18       | 19     | 16                      | 8.8442  | 2.5466  | 7.2832  | 7.9285  |
| 19       | 20     | 32                      | 2.9738  | 5.9574  | 1.9519  | 2.2050  |
| 10       | 20     | 32                      | 4.4409  | 7.8849  | 2.8450  | 3.1681  |
| 10       | 17     | 32                      | 3.1230  | 5.4348  | 4.5955  | 5.4661  |
| 10       | 21     | 32                      | 10.2534 | 10.0807 | 13.3726 | 14.0557 |
| 10       | 22     | 32                      | 5.9537  | 7.0159  | 7.5448  | 7.5314  |

**(Lanjutan) Tabel 4. 34** Aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 jam ke 9-12

| Dari Bus | Ke Bus | Kapasitas Saluran (MVA) | Jam Ke- |         |         |         |
|----------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|          |        |                         | 9       | 10      | 11      | 12      |
| 21       | 22     | 32                      | 16.0561 | 18.1400 | 11.6300 | 10.0646 |
| 15       | 23     | 16                      | 6.0497  | 3.8359  | 7.7031  | 9.1226  |
| 22       | 24     | 16                      | 2.6004  | 4.4079  | 2.9467  | 1.8351  |
| 23       | 24     | 16                      | 12.8000 | 1.6725  | 4.6634  | 6.3098  |
| 24       | 25     | 16                      | 3.8466  | 7.9460  | 6.5374  | 4.5204  |
| 25       | 26     | 16                      | 3.5833  | 3.0000  | 2.7374  | 2.9816  |
| 25       | 27     | 16                      | 1.9750  | 10.1005 | 8.6036  | 5.8939  |
| 28       | 27     | 65                      | 11.1711 | 9.9777  | 10.6706 | 18.4541 |
| 27       | 29     | 16                      | 6.2848  | 5.2497  | 4.7859  | 5.2183  |
| 27       | 30     | 16                      | 7.1940  | 6.0072  | 5.4758  | 5.9715  |
| 29       | 30     | 16                      | 3.7622  | 3.1483  | 2.8722  | 3.1291  |
| 8        | 28     | 32                      | 2.1968  | 3.1468  | 2.8525  | 1.6794  |
| 6        | 28     | 32                      | 16.5251 | 11.2771 | 10.3214 | 16.8654 |

### 4.3 Perbandingan Total Biaya Pembangkitan

Perbandingan total biaya dilakukan dengan beberapa kasus. Kasus yang pertama adalah membandingkan kondisi normal dan kontingensi N-1, dimana keduanya menggunakan fungsi biaya yang tidak mulus. Kasus kedua adalah membandingkan Kondisi Normal dan Kontingensi N-1 Menggunakan Metode BPSO dengan Kondisi Normal Menggunakan Metode *Firefly Algorithm*, dimana keduanya menggunakan fungsi biaya yang tidak mulus. Kasus ketiga adalah membandingkan kondisi normal dan kontingensi N-1 yang mempertimbangkan efek fungsi biaya yang tidak mulus dengan tanpa mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus, dimana keduanya menggunakan metode BPSO.

### 4.3.1 Kasus pertama

Kasus pertama adalah membandingkan total biaya pembangkitan pada kondisi normal dengan kondisi kontingensi N-1, dimana kondisi normal dan kontingensi N-1 mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus menggunakan metode BPSO. Perbandingan total biaya pembangkitan pada kondisi ini dapat dilihat pada tabel 4.21

**Tabel 4. 35** Perbandingan total biaya pembangkitan kondisi normal dengan kondisi kontingensi N-1

| Jam Ke-                       | Daya Terbangkitkan (MW) |                 | Biaya Pembangkitan (\$) |                 |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|                               | Normal                  | Kontingensi N-1 | Normal                  | Kontingensi N-1 |
| 1                             | 172.5141                | 172.7866        | 609.0656                | 610.0287        |
| 2                             | 204.2499                | 204.6548        | 581.2513                | 582.7004        |
| 3                             | 241.0699                | 241.5714        | 696.6721                | 698.3843        |
| 4                             | 282.759                 | 283.643         | 968.8126                | 972.1986        |
| 5                             | 301.5625                | 302.5293        | 1060.8213               | 1063.5734       |
| 6                             | 288.4399                | 289.3791        | 906.7061                | 909.9634        |
| 7                             | 259.246                 | 259.8535        | 754.6322                | 756.4726        |
| 8                             | 222.1731                | 222.6119        | 631.9816                | 633.8507        |
| 9                             | 199.7978                | 200.1801        | 559.9723                | 561.193         |
| 10                            | 167.0271                | 167.2735        | 457.6242                | 458.7248        |
| 11                            | 152.1155                | 152.3399        | 417.5896                | 418.1461        |
| 12                            | 166.1266                | 166.3814        | 448.1682                | 448.6856        |
| Total Biaya Pembangkitan (\$) |                         |                 | 8093.2971               | 8113.290362     |

### 4.3.2 Kasus Kedua

Pada kasus kedua, dilakukan perbandingan antara total biaya pembangkitan selama 12 jam, antara metode BPSO pada kondisi normal dan kontingensi N-1, dengan kondisi normal menggunakan metode *firefly Algorithm* yang mempertimbangkan efek biaya tidak mulus. Perbandingan total biaya pembangkitan pada kasus ini ditunjukkan pada tabel 4.22

**Tabel 4. 36** Perbandingan metode BPSO dengan *Firefly Algorithm* dengan fungsi biaya tidak mulus

| Metode      |                 |                          |
|-------------|-----------------|--------------------------|
| BPSO        |                 | <i>Firefly Algorithm</i> |
| Normal      | Kontingensi N-1 | Normal                   |
| \$8093.2971 | \$8113.2904     | \$7648.2904              |

#### 4.3.3 Kasus Ketiga

Pada kasus ketiga, dilakukan perbandingan antara total biaya pembangkitan selama 12 jam, antara metode BPSO pada kondisi normal dan kontingensi N-1 yang mempertimbangkan efek biaya tidak mulus, dengan kondisi normal tanpa mempertimbangkan efek biaya tidak mulus. Perbandingan total biaya pembangkitan dengan fungsi biaya mulus dan tidak mulus ditunjukkan oleh tabel 4.23

**Tabel 4. 37** Perbandingan fungsi biaya mulus dengan fungsi biaya tidak mulus

| Metode                   |                 |                    |                 |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| BPSO                     |                 |                    |                 |
| Fungsi Biaya Tidak Mulus |                 | Fungsi Biaya Mulus |                 |
| Normal                   | Kontingensi N-1 | Normal             | Kontingensi N-1 |
| \$8093.2971              | \$8113.2904     | \$ 7327.9020       | \$ 7330.0770    |

## 4.4 Analisa Hasil Simulasi

### 4.4.1 Kondisi Normal

Pada studi kasus ini dilakukan perhitungan analisis operasi penjadwalan pembangkit dengan fungsi biaya pembangkitan tidak mulus, dan simulasi dilakukan dengan kondisi normal.

Pada kasus pertama dilakukan perbandingan daya aktif terbangkit pada setiap unit generator dengan batasan daya terbangkitan minimum dan maksimum setiap unit pembangkit. Dari hasil simulasi didapatkan nilai pembangkitan yang tidak melebihi batas maksimum dan tidak kurang dari batas minimum.

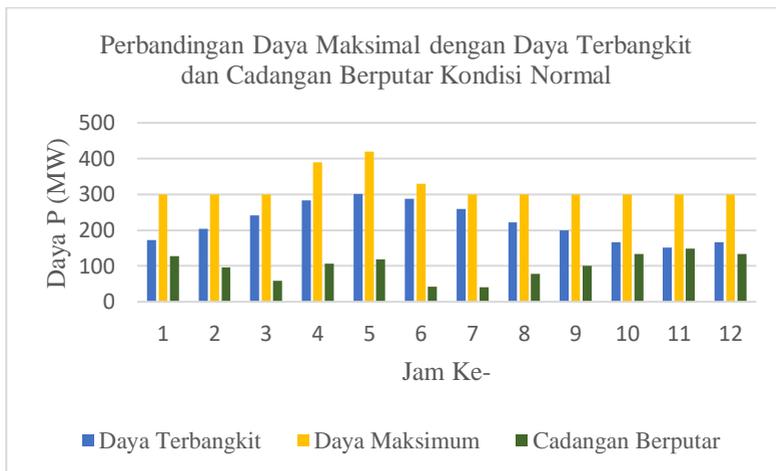
Pada kasus kedua didapatkan perbandingan antara total daya terbangkit dengan total beban dan total rugi-rugi daya pada saluran (*losses*). Nilai total daya terbangkit harus sama dengan total beban dan *losses*, hal ini bertujuan untuk menjaga frekuensi sistem tetap stabil. Dari hasil simulasi didapatkan total pembangkitan yang sama dengan total beban dan *losses*.

Pada kasus ketiga dianalisa mengenai waktu penyalaan dan pemadaman minimum (*minimum up and down time*) unit pembangkit. kondisi awal 6 pembangkit pada sistem IEEE 30 bus adalah padam, dimana pembangkit pertama telah padam selama 4 jam, pembangkit kedua padam selama 3 jam, pembangkit ketiga padam selama 3 jam, pembangkit keempat padam selama 3 jam, pembangkit kelima padam selama 2 jam, dan pembangkit keenam padam selama 2 jam. Dari hasil simulasi, didapatkan kombinasi padam-nyala unit pembangkit seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.5, menunjukkan bahwa kombinasi sesuai dengan batas *minimum up and down time*. Pembangkit pertama yang berfungsi sebagai *swing* selalu menyala dalam rentan waktu 12 jam, pembangkit kedua juga selalu menyala selama 12 jam. Pembangkit ketiga menyala ketika jam ke-4 dan ke-5, lalu padam pada jam ke-7. Pembangkit keempat dan kelima selalu padam, dan pembangkit ke-6 menyala pada jam ke-5 dan ke-6, lalu padam pada jam ke-7. Kondisi ini telah memenuhi batasan *minimum up and down time*.

Analisa keempat adalah analisa besar perubahan daya pembangkitan setiap unit generator antara level beban yang biasa disebut *ramprate* unit pembangkit. Setiap unit pembangkit tidak dapat mengurangi atau menambah daya dengan bebas karena setiap unit pembangkit memiliki karakteristik tersendiri. Batas *ramprate* memiliki tujuan untuk menjaga unit pembangkit agar selalu berada pada kondisi

*thermal* yang aman. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel 4.7, nilai ramprate setiap unit pembangkit tidak ada yang melebihi batas *ramp-up* dan *ramp-down*.

Analisa kelima adalah besar aliran daya pada saluran transmisi. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel 4.8, 4.9, dan 4.10 dapat diketahui bahwasannya nilai daya S (MVA) dibawah 80% dari kapasitas maksimum saluran, sehingga saluran aman.



**Gambar 4. 1** Perbandingan Daya Maksimal dengan daya terbangkit dan cadangan berputar

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa permintaan beban selama 12 jam dapat dipenuhi oleh pembangkit, dan masih menyisakan cadangan berputar, sehingga sistem lebih aman.

#### 4.4.2 Kondisi Kontingensi N-1

Pada kondisi ini dilakukan perhitungan analisis operasi penjadwalan pembangkit dengan fungsi biaya pembangkitan tidak mulus dan simulasi dilakukan dengan melakukan pemutusan satu saluran transmisi (Kontingensi N-1).

Analisa pertama pada kondisi kontingensi N-1 yang ditunjukkan tabel 4.12, daya aktif terbangkit pada setiap unit generator memiliki nilai yang berada pada rentan antara P minimum dan P maksimum, sehingga

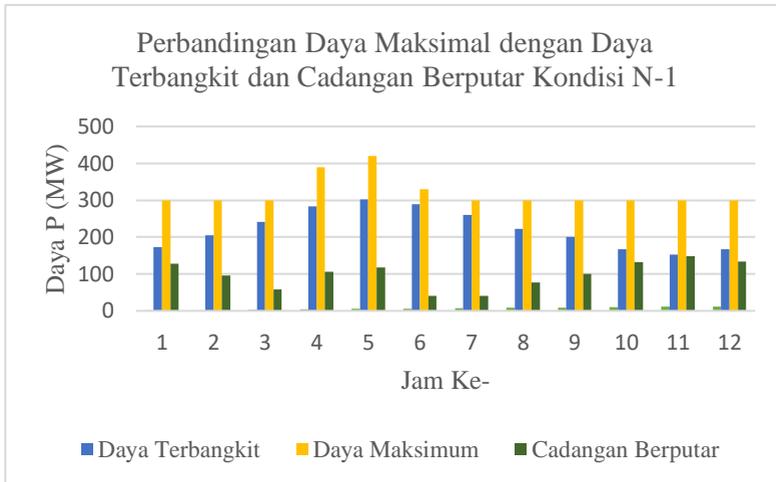
hal ini menunjukkan bahwa pembangkitan memenuhi *inequality constrain*.

Analisa kedua merupakan analisa keseimbangan antara total daya terbangkit dengan total beban dan rugi-rugi (*losses*) daya pada saluran transmisi. Dari hasil simulasi didapatkan nilai total pembangkitan yang sama dengan total daya beban dan *losses*. Pada kondisi kontingensi dengan profil beban yang sama dengan profil beban pada kondisi normal, nilai daya terbangkit lebih besar pada kondisi kontingensi N-1. Hal ini terjadi karena ketika saluran terputus, maka akan terjadi peningkatan pembebanan pada saluran lain, yang selanjutnya akan berpengaruh pada semakin besarnya nilai *losses* pada saluran, sehingga pembangkit harus membangkitkan daya yang lebih besar.

Analisa Ketiga merupakan analisa waktu minimum penyalaan dan pemadaman. Kombinasi pembangkit pada jam ke-1 sampai jam ke-12 pada kondisi kontingensi N-1 sama dengan kombinasi pada kondisi normal, dan setiap unit pembangkit memenuhi batasan waktu penyalaan dan pemadaman minimum. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi pada tabel 4.15 telah memenuhi batasan *minimum up and down time*.

Analisa keempat pada kondisi ini adalah analisa laju perubahan daya pada setiap level beban (*ramprate*). Pada tabel 4.17 dapat diketahui bahwa laju perubahan daya setiap unit pembangkit telah memenuhi batasan *ramp-up/ramp-down*.

Analisa kelima adalah analisa besar aliran daya pada saluran transmisi. Nilai aliran daya pada saluran transmisi pada kondisi kontingensi N-1 menunjukkan adanya peningkatan dibandingkan saat kondisi normal, hal ini terjadi karena saat saluran terputus, maka aliran daya akan berpindah pada saluran lain. Pada tabel 4.18, 4.19, dan 4.20 menunjukkan bahwa nilai aliran daya pada kondisi ini masih dibawah 80% dari kapasitas maksimum saluran transmisi.



**Gambar 4. 2** Perbandingan Daya Maksimal dengan daya terbangkit dan cadangan berputar pada kondisi kontingensi N-1

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa permintaan beban selama 12 jam dapat dipenuhi oleh pembangkit, dan masih menyisakan cadangan berputar, sehingga sistem lebih aman.

#### 4.4.3 Perbandingan Biaya Total Pembangkitan

Pada kasus pertama dilakukan perbandingan antara operasi *security constrained unit commitment* dengan kondisi normal dan kondisi N-1. Dari tabel 4.21 dapat diketahui bahwa nilai total pembangkitan pada kondisi kontingensi N-1 (\$8113.2904) lebih besar dari kondisi normal (\$8093.2971). Hal ini terjadi karena saat terjadi saluran putus maka *losses* pada saluran transmisi semakin besar, sehingga unit pembangkit harus membangkitkan lebih besar dari pada kondisi normal, dan akhirnya total biaya pembangkitan akan semakin besar.

Pada kasus kedua dibandingkan total biaya pembangkitan operasi *security constrained unit commitment* yang mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus menggunakan metode BPSO dengan metode *firefly algorithm*. Pada metode BPSO studi kasus dilakukan pada kondisi normal dan kontingensi N-1, sedangkan pada metode *firefly algorithm* dilakukan pada kondisi normal saja. Dari tabel 4.22 dapat diketahui bahwa nilai total biaya pembangkitan menggunakan metode *firefly algorithm* lebih kecil dari metode BPSO, dengan rincian metode BPSO

normal sebesar \$8093.2971, Kontingensi N-1 sebesar \$8113.2904, dan pada metode *firefly algorithm* dengan kondisi normal sebesar \$7648.290362. Hal ini terjadi karena simulasi pada metode *firefly algorithm* tidak mempertimbangkan operasi penyalan panas (*hot start cost*), sehingga berpengaruh pada total biaya pembangkitan. Selain itu pada metode *firefly algorithm* kondisi kontingensi N-1 tidak dipertimbangkan, sehingga total biaya pembangkitan lebih murah.

Pada kasus ketiga dilakukan perbandingan total biaya pembangkitan antara operasi *security constrained unit commitment* yang mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus dengan operasi *security constrained unit commitment* dengan fungsi biaya mulus, dimana keduanya menggunakan metode BPSO. Simulasi ini dilakukan pada kondisi normal dan kontingensi N-1. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel 4.23, dapat diketahui bahwa biaya pembangkitan yang mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus akibat pengaturan *valve* pembangkit memiliki total biaya pembangkitan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa mempertimbangkan efek pengaturan *valve* pembangkit. Hal ini terjadi karena dengan mempertimbangkan efek pengaturan *valve* pembangkit maka fungsi biaya pembangkitan akan berubah dan terjadi penambahan koefisien fungsi, sehingga biaya lebih besar.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

1. Operasi *Security Constrained Unit Commitment* (SCUC) pada kondisi kontingensi N-1 memiliki total biaya pembangkitan yang lebih mahal dibanding operasi SCUC pada kondisi normal. Hal ini dibuktikan dengan biaya total pembangkitan pada kondisi normal dan kontingensi N-1 berturut-turut sebesar \$8093.2971 dan \$8113.290362. Pada kondisi kontingensi N-1 total biaya lebih mahal karena pada kondisi ini *losses* pada saluran lebih besar, sehingga unit pembangkit harus membangkitkan daya lebih untuk memenuhi *equality constrain*.
2. Operasi *Security Constrained Unit Commitment* dengan mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus memiliki total biaya pembangkitan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa mempertimbangkan fungsi biaya tidak mulus. Terbukti dengan total biaya pada SCUC dengan fungsi biaya tidak mulus memiliki total biaya pembangkitan pada kondisi normal sebesar \$8093.2971 dan kondisi kontingensi N-1 sebesar \$8113.290362. Sedangkan dengan fungsi biaya mulus pada kondisi normal dan kontingensi N-1 berturut-turut sebesar \$7327.902 dan \$7330.077. hal ini terjadi karena dengan pertimbangan fungsi biaya tidak mulus menyebabkan bertambahnya fungsi biaya.
3. Operasi penjadwalan pembangkit menggunakan metode *firefly algorithm* lebih murah dibandingkan menggunakan metode BPSO. Hal ini disebabkan pada metode *firefly algorithm* tidak menggunakan operasi penyalaan panas, dan tanpa mempertimbangkan kondisi kontingensi N-1 saluran transmisi.
4. Algoritma BPSO dapat menyelesaikan permasalahan SCUC. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya batasan pada SCUC yang dilanggar.
5. Kondisi awal unit pembangkit mempengaruhi total biaya pembangkitan

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penyelesaian operasi *Security Constrained Unit Commitment* dengan fungsi biaya tidak mulus dapat dilakukan dengan menggunakan algoritma kecerdasan buatan lain seperti GA, SOS, ICA, dan lain sebagainya
2. Operasi *Security Constrained Unit Commitment* dengan fungsi biaya tidak mulus menggunakan metode BPSO dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan emisi dan kestabilan tegangan.

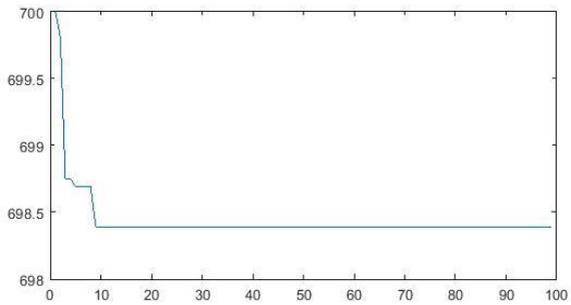
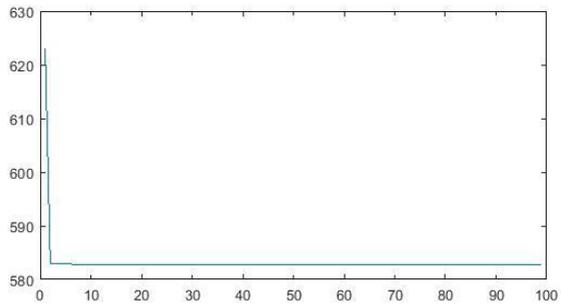
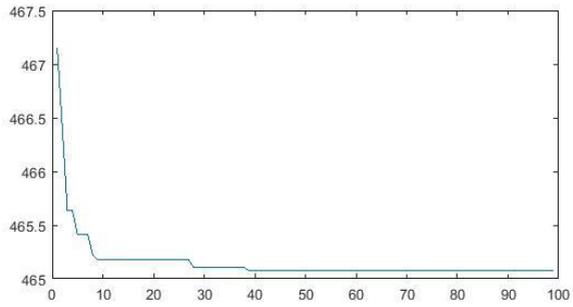
## DAFTAR PUSTAKA

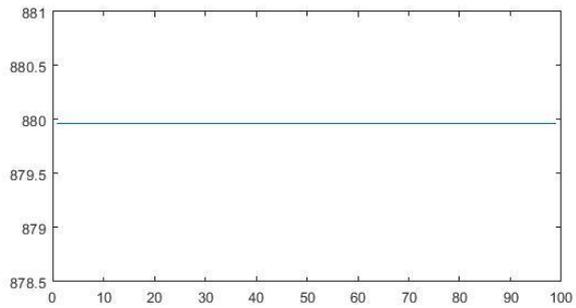
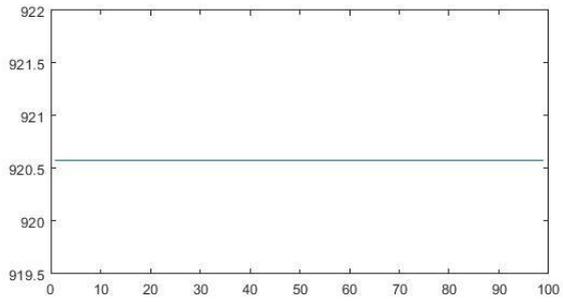
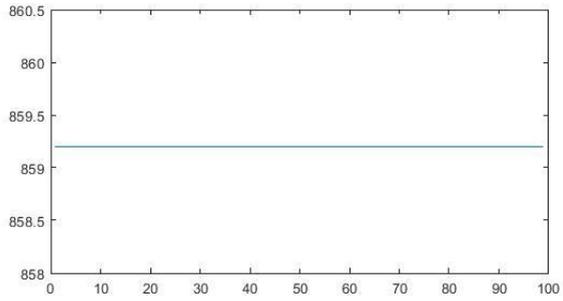
- [1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] T. Logenthiran and D. Srinivasan, "Particle swarm optimization for unit commitment problem," presented at the Probabilistic methods applied to power systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th international conference on, 2010, pp. 642–647.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis McGraw-Hill Series in Electrical Computer Engineering*. 1999.
- [4] T. Gonen, *Electrical power transmission system engineering: analysis and design*. CRC press, 2015.
- [5] A. F. Y. Reynaldo, "Security Constrained Unit Commitment Considering Spinning Reserve and Transmission Line Capacity Using Binary Particle Swarm Algorithm," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. B65–B8, 2016.
- [6] R. R. Gaddam, "Optimal unit commitment using swarm intelligence for secure operation of solar energy integrated smart grid," 2013.
- [7] F. Al Farsi, M. Albadi, N. Hosseinzadeh, and A. Al Badi, "Economic Dispatch in power systems," presented at the 2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition, 2015, pp. 1–6.
- [8] T. Niknam, M. Narimani, J. Aghaei, S. Tabatabaei, and M. Nayeripour, "Modified honey bee mating optimisation to solve dynamic optimal power flow considering generator constraints," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 10, pp. 989–1002, 2011.
- [9] K. Xie and Y. Song, "Dynamic optimal power flow by interior point methods," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 1, pp. 76–84, 2001.
- [10] K. Abo-Al-Ez, M. El-Saadawi, and A. Fathy, "SOLVING CONSTRAINED UNIT COMMITMENT PROBLEM CONSIDERING VALVE POINT EFFECT."
- [11] D. B. Attous and Y. Labbi, "Particle swarm optimization based optimal power flow for units with non-smooth fuel cost functions," presented at the Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on, 2009, pp. I–377.

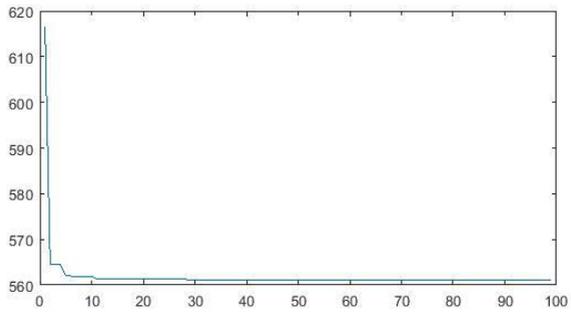
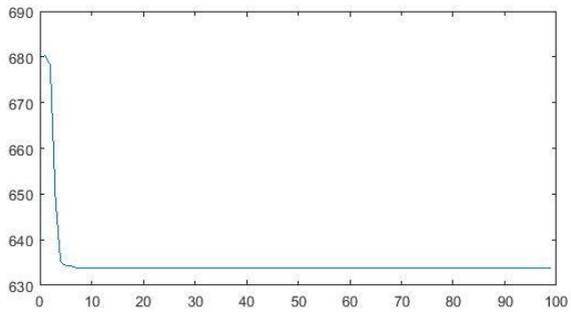
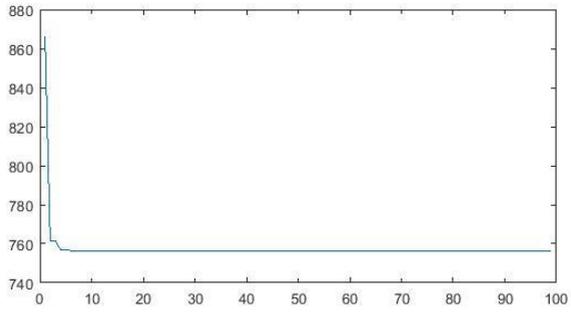
- [12] R. Eberhart and J. Kennedy, "Particle swarm optimization," presented at the Proceedings of the IEEE international conference on neural networks, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.
- [13] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," presented at the 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360), 1998, pp. 69–73.
- [14] C. Chung, H. Yu, and K. P. Wong, "An advanced quantum-inspired evolutionary algorithm for unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 847–854, 2010.

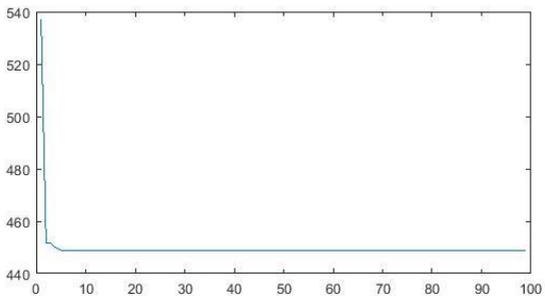
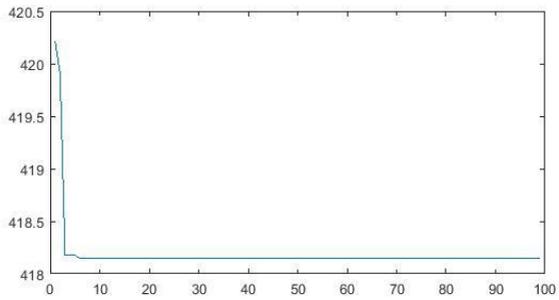
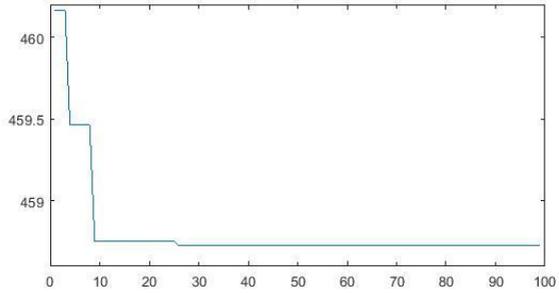
## LAMPIRAN

### 1. Grafik Konvergensi Kondisi Normal Pada jam ke 1-12

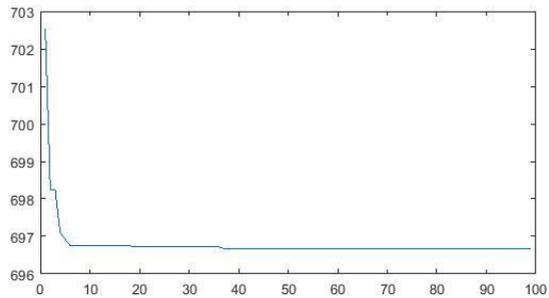
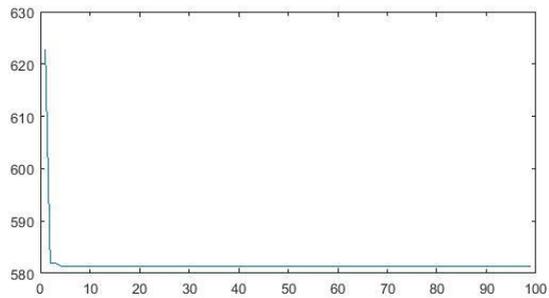
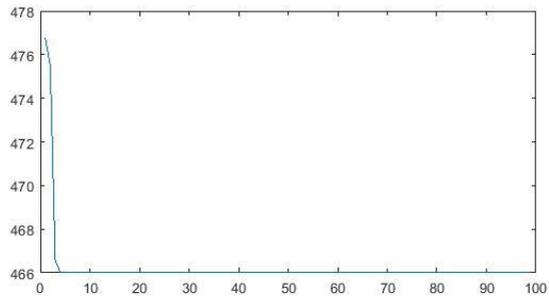


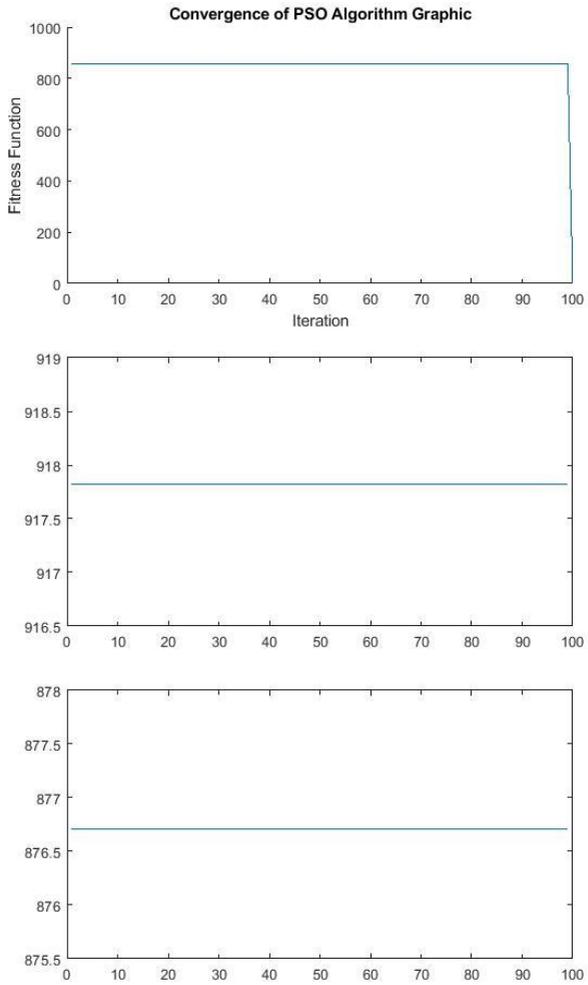


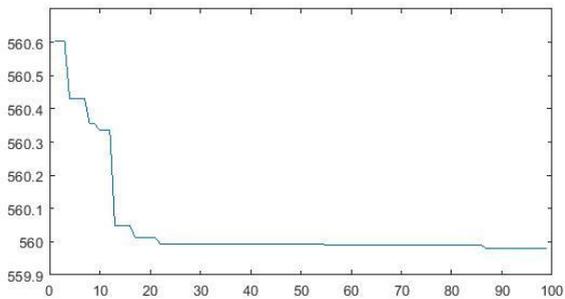
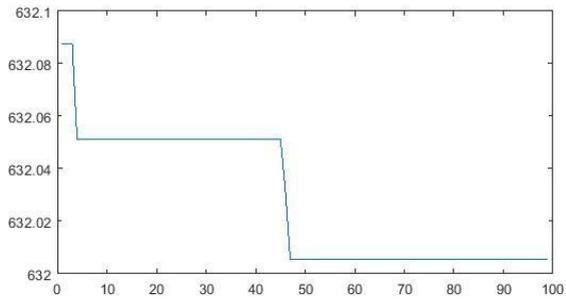
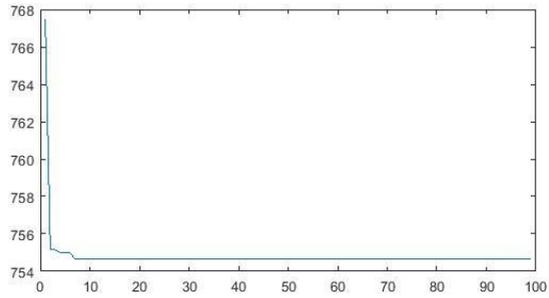


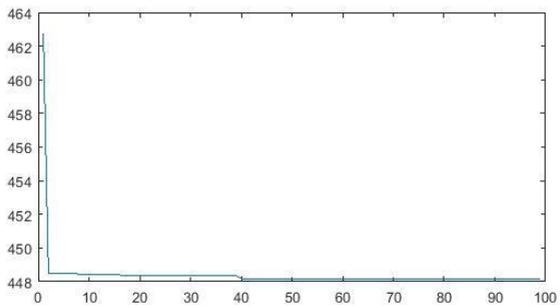
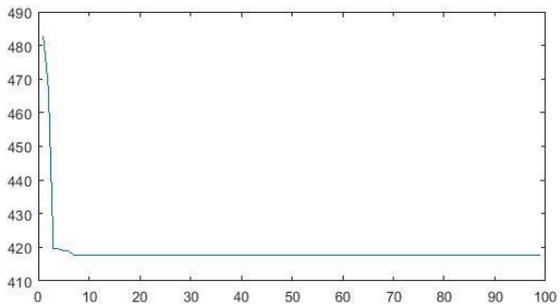
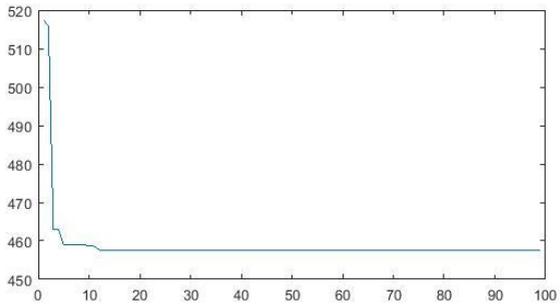


## 2. Grafik Konfergensi Kondisi Kontingensi N-1 Pada jam ke 1-12









## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Ahmad Saad Daroini, merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Dilahirkan pada 06 Desember 1996 di Banyuwangi. Mengawali pendidikan di SD Darussalam Blokagung, Banyuwangi sampai dengan 2009 kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengahnya di MTS Al-Amiriyyah Darussalam sampai dengan 2012 dan melanjutkan pendidikan menengah atasnya di MA Al-Amiriyyah Darussalam hingga lulus pada tahun 2015. Sejak tahun 2015 penulis terdaftar sebagai

Mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, bidang studi Teknik Sistem Tenaga, melalui Program Beasiswa Santri Berprestasi (PBSB) 2015 yang diadakan oleh Kementerian Agama RI. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif di keorganisasian, yaitu sebagai *staff* dalam negeri CSSMoRA (*Community Santri Scholarship of Ministry of Religious Affairs*) 2106, ketua DPPA CSSMoRA ITS 2017 dan aktif sebagai asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik (PSSL) sebagai koordinator praktikum. Penulis juga aktif dalam kompetisi nasional dan internasional, dan memenangkan beberapa kompetisi seperti National Electrical Power System Competition (NESCO) sebagai juara 2 (2018), juara 3 (2019), dan TOTAL Innovate Grant 2018. Selain itu penulis juga aktif pada kegiatan pengabdian masyarakat, seperti *AI-Uswah Smart Eco-Garden Project* 2018 sebagai person in charge, dan *Zero Hunger Sumba Project* 2019.