



TESIS - EE185401

***WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW***  
**BERDASARKAN PERSAMAAN KESEIMBANGAN**  
**PANAS DENGAN RATING SALURAN DINAMIS**

NURDIN SUGIANTORO  
07111850010008

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020





TESIS - EE185401

***WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW***  
**BERDASARKAN PERSAMAAN KESEIMBANGAN**  
**PANAS DENGAN RATING SALURAN DINAMIS**

NURDIN SUGIANTORO  
07111850010008

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**NURDIN SUGIANTORO**

**NRP: 07111850010008**

Tanggal Ujian: 01 Juli 2020

Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

NIP: 197411292000121001

2. Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

NIP: 198208292006042001

23-Jul-2020

**Penguji:**

1. Prof.Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

NIP: 194907151974121001

2. Dr.Ir. Soediby, M.MT.

NIP: 195512071980031004

3. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

NIP: 198811082012121001

Kepala Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas



Dedet Andhara Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

NIP: 197311192000031001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW BERDASARKAN PERSAMAAN KESEIMBANGAN PANAS DENGAN RATING SALURAN DINAMIS**” 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, Juni 2020



Nurdin Sugiantoro

NRP. 07111850010008

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW BERDASARKAN PERSAMAAN KESEIMBANGAN PANAS DENGAN RATING SALURAN DINAMIS**

Nama mahasiswa : Nurdin Sugiantoro  
NRP : 07111850010008  
Pembimbing : 1. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
2. Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Penelitian ini mengintegrasikan sistem *dynamic line rating* ke dalam permasalahan aliran daya optimal. Aplikasinya yaitu menghitung rating saluran menggunakan persamaan keseimbangan panas dengan berdasarkan rating suhunya. Akibatnya rating saluran yang biasanya bernilai statis bisa menjadi bernilai dinamis dan nilainya lebih tinggi sehingga sistem menjadi lebih baik. Namun karena hal tersebut, permasalahan *optimal power flow* menjadi lebih sulit karena penambahan variabel kontrol temperatur dan *constraint* persamaan keseimbangan panas. Pemodelan tersebut juga mengharuskan mempertimbangan rugi-rugi transmisi ke dalam permasalahan *direct current optimal power flow* (DCOPF).

Penelitian ini menggunakan metode *quadratically constrained quadratic program* dalam permasalahan *direct current optimal power flow* mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan integrasi rating saluran dinamis berdasarkan persamaan keseimbangan panas. Pengujian metode dilakukan pada sistem IEEE 9 bus dan 30 bus. Hasilnya menunjukkan bahwa metode yang digunakan bisa menyelesaikan permasalahan *optimal power flow* dengan batasan persamaan keseimbangan panas dan menunjukkan bahwa integrasi rating saluran dinamis menjadikan sistem menjadi lebih ekonomis.

Kata kunci: *dynamic line rating*, DCOPF, persamaan keseimbangan panas, rugi-rugi transmisi, *quadratically constrained quadratic program*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING HEAT BALANCE EQUATION WITH DYNAMIC LINE RATING**

By : Nurdin Sugiantoro  
Student Identity Number : 07111850010008  
Supervisor(s) : 1. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
2. Vita Lystianingrum B.P., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

This research integrates the dynamic line rating system into an optimal power flow problem. The application is to calculate the line rating using the heat balance equation based on its temperature rating. As a result, line rating that is usually static can be dynamic and the value is higher so the system would be better. But because of this, the problem of optimal power flow becomes more difficult because of the addition of temperature variable control and heat balance equation constraint. The modelling also requires considering transmission losses into the direct current optimal power flow (DCOPF) problem.

This study uses a quadratically constrained quadratic program method in a direct current optimal power flow problem considering transmission losses with the integration of dynamic line rating based on the heat balance equation. Method testing is performed on IEEE 9 bus and 30 bus system. The results show that the method used can solve the problem of optimal power flow with the heat balance equation and shows that the integration of dynamic line rating makes the system more economical.

Key words: dynamic line rating, DCOPF, heat balance equation, transmission losses, quadratically constrained quadratic program

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tesis yang berjudul **“WEATHER-BASED OPTIMAL POWER FLOW BERDASARKAN PERSAMAAN KESEIMBANGAN PANAS DENGAN RATING SALURAN DINAMIS”** untuk menyelesaikan jenjang studi S2 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa Teknik Elektro.

Dalam menyelesaikan tesis ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang tanpa bantuan-Nya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan tesis ini.
2. Mbak Hermin, Mas Agus, Mbak Sri, Mas Agung, Mbak Desi, Mas Herman dan seluruh keluarga penulis, atas segala doa, dukungan, nasehat, dan segalanya.
3. Bapak Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT., dan Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing pengerjaan tesis yang telah memberikan arahan, bantuan, saran serta bimbingan selama pengerjaan tesis dan selama perkuliahan di Teknik Elektro.
4. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan ilmu dan inspirasi selama perkuliahan.
5. Eki Roviando, Karimatuan Nisa' dan teman – teman di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga yang telah memberikan banyak masukan, bantuan dan menemani penulis dalam proses menyelesaikan tesis.

6. Rahmat, Fathur, Khairunnisa' dan seluruh sahabat penulis mahasiswa S2 Teknik Sistem Tenaga ITS 2018 atas segala semangat dan bantuannya.
7. Beasiswa Fresh Graduate yang telah membantu penulis secara finansial selama masa kuliah setiap semester.
8. Miko, Zamrudi, dan teman teman di kontrakan BME yang sering menemani dan membantu penulis.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, dengan tanpa mengurangi rasa terima kasih penulis.

Surabaya, 12 Juni 2020

Penulis

Nurdin Sugiantoro

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Kontribusi.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait .....	5
2.2 Teori Dasar.....	6
2.2.1 <i>Direct Current Optimal Power Flow (DCOPF)</i> .....	6
2.2.2 <i>Dynamic Line Rating</i> .....	9
2.2.3 Rugi-rugi Saluran Pada Sistem DC .....	11
2.2.4 <i>Quadratically Constrained Quadratic Program</i> .....	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1 Algoritma .....	15
3.2 Penerapan <i>Quadratically Constrained Quadratic Program</i> pada <i>MATLAB</i> untuk Menyelesaikan Permasalahan DCOPF dengan <i>Dynamic</i> <i>Line Rating</i> .....	18
3.2.1 <i>Quadratically Constrained Quadratic Program</i> pada <i>MATLAB</i> ....	18

3.2.2	Penerapan <i>Quadratically Constrained Quadratic Program</i> untuk Menyelesaikan Permasalahan DCOPF dengan <i>Dynamic Line Rating</i> .....	19
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	29
4.1	Studi Kasus IEEE 9 Bus .....	29
4.2	Studi Kasus IEEE 30 Bus .....	34
4.2.1	Sistem IEEE 30 Bus Periode Waktu 5 Jam .....	35
4.2.2	Sistem IEEE 30 Bus Periode Waktu 24 Jam .....	39
BAB 5	PENUTUP .....	43
5.1	Kesimpulan .....	43
5.2	Saran .....	43
DAFTAR	PUSTAKA .....	45
LAMPIRAN	.....	47
RIWAYAT	PENULIS .....	57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model keseimbangan panas pada saluran .....	9
Gambar 3.1 Diagram algoritma alur penyelesaian penelitian .....	15
Gambar 3.2 Sistem kecil 3 bus .....	20
Gambar 4.1 SLD sistem IEEE 9 bus .....	29
Gambar 4.2 Profil beban .....	30
Gambar 4.3 <i>Daily ambient temperature</i> .....	30
Gambar 4.4 <i>Daily convection coefficient</i> .....	31
Gambar 4.5 <i>Daily solar heat gain</i> .....	31
Gambar 4.6 Evolusi perubahan suhu saluran metode <i>static line rating</i> .....	32
Gambar 4.7 Evolusi perubahan suhu saluran metode <i>dynamic line rating</i> .....	33
Gambar 4.8 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya .....	33
Gambar 4.9 Sistem IEEE 30 bus .....	35
Gambar 4.10 Profil pembebanan sistem IEEE 30 bus .....	36
Gambar 4.11 Evolusi perubahan suhu saluran metode DLR sistem 30 bus .....	37
Gambar 4.12 Evolusi perubahan suhu saluran metode SLR sistem 30 bus .....	37
Gambar 4.13 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya .....	38
Gambar 4.14 Profil pembebanan sistem IEEE 30 bus .....	40
Gambar 4.15 Evolusi perubahan suhu saluran metode DLR periode 24 jam .....	40
Gambar 4.16 Evolusi perubahan suhu saluran metode SLR periode 24 jam .....	41
Gambar 4.16 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya .....	41

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data pembangkit sistem IEEE 9 bus.....	30
Tabel 4.2 <i>Objective function value</i> sistem IEEE 9 Bus.....	34
Tabel 4.3 Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus.....	36
Tabel 4.4 <i>Objective function value</i> sistem IEEE 30 bus.....	38
Tabel 4.5 Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus modifikasi.....	39
Tabel 4.6 <i>Objective function value</i> sistem IEEE 30 bus periode 24 jam.....	42

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kapasitas transfer daya saluran transmisi adalah batasan penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Batasan ini memiliki peran penting dalam pengelolaan sistem tenaga yang aman dan ekonomis. Secara konvensional, rating kapasitas saluran didefinisikan dengan nilai statis berdasarkan asumsi kondisi cuaca konservatif. Rating statis dihitung berdasarkan kondisi cuaca terburuk yaitu saat suhu lingkungan tinggi dan kecepatan angin rendah yang membuat pendinginannya kecil serta saat radiasi matahari tinggi yang membuat pemanasan salurannya besar [1].

Dengan mempertimbangkan kondisi meteorologi dan memantau keadaan termal dari saluran transmisi maka rating saluran yang disesuaikan secara dinamis memungkinkan kapasitas transmisi yang lebih tinggi [2], [3]. Berbeda dengan rating saluran statis, rating saluran dinamis dihitung berdasarkan kondisi operasi aktual saluran transmisi pada saat-saat tertentu, bukan pada asumsi tetap. Penerapan rating saluran dinamis pada saluran transmisi berpotensi meningkatkan tingkat ekonomi sistem menjadi lebih baik jika dibandingkan dengan rating saluran statis [4]. DLR terbukti dapat memaksimalkan kemampuan operasi sistem tenaga untuk mengatasi ketidakpastian output pembangkit listrik tenaga angin dan memfasilitasi pemanfaatannya secara bersamaan [5].

Standar perhitungan rating saluran transmisi berdasarkan hubungan arus dan temperatur dibahas mendetail dalam [6], termasuk dijelaskannya dua persamaan keseimbangan panas yaitu *steady state* dan *non-steady state*. Beberapa penelitian lebih banyak menggunakan pendekatan persamaan keseimbangan panas *steady state*, karena aplikasinya pada permasalahan *optimal power flow* (OPF) lebih mudah seperti pada penelitian [2], [5], [7], [8]. Namun penggunaan persamaan tersebut tidak sesuai dengan konsep energi panas, karena tidak menghubungkan suhu saluran antar waktu.

Penelitian ini sama dengan penelitian [8], yaitu menggunakan pemodelan *direct current optimal power flow*. Untuk sistem yang kompleks dengan ukuran

matriks yang besar akibat beban dinamis dan penambahan *dynamic line rating*, DCOPF dipilih karena bentuknya lebih sederhana, dengan variabel kontrol yang lebih sedikit, sehingga mendapatkan hasil lebih cepat. Namun di sisi lain, hasil perhitungannya tidak memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan ACOPF [9], [10].

Banyak cara digunakan untuk memodelkan aplikasi dari *dynamic line rating*. Penelitian [1] dan [4] menggunakan metode dekomposisi Bender untuk menyederhanakan permasalahan dan melakukan pendekatan linear untuk variabel kehilangan panas (pendinginan) konveksi dan radiasi. Penelitian [7] menggunakan metode *prima-dual interior point* sebagai solusi permasalahan *weather-based optimal power flow*.

Penelitian [11] melakukan aplikasi *dynamic line rating* dalam *optimal power flow* tradisional dengan membuat koordinasi *electro-thermal*. Penelitian [8] menggunakan metode *quadratic programming* karena didalamnya tetap mempertahankan permasalahan dalam batasan linear dan fungsi objektif kuadratik.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian [8]. Bedanya pada penelitian ini persamaan keseimbangan panas yang digunakan adalah model *non-steady state* dan sistem mempertimbangkan rugi-rugi saluran. Model persamaan keseimbangan panas *non-steady state* lebih sesuai dengan konsep energi panas pada saluran. Perhitungan rating saluran melibatkan komponen waktu dengan adanya hubungan suhu saluran awal dan suhu saluran akhir. Metode yang digunakan juga berbeda dengan penelitian [8] yaitu pada penelitian ini menggunakan metode *quadratically constrained quadratic programming* dengan model permasalahan DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Hal yang menjadi permasalahan dan akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana membuat program pembebanan ekonomis pembangkit dalam permasalahan DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan *constraint* persamaan keseimbangan panas dan suhu maksimal saluran.

2. Bagaimana perbedaan pembebanan ekonomis pembangkit antara rating saluran menggunakan daya dibandingkan rating saluran berdasarkan suhu.
3. Bagaimana perbedaan pembebanan ekonomis pembangkit antara *static line rating* dibandingkan *dynamic line rating*.
4. Bagaimana perbedaan evolusi perubahan suhu saluran antara *dynamic line rating*, *static line rating* dan rating daya.

### 1.3 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat program pembebanan ekonomis pembangkit dalam permasalahan DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan *constraint* persamaan keseimbangan panas dan suhu maksimal saluran.
2. Mengetahui dan mendapatkan hasil perbedaan pembebanan ekonomis pembangkit antara rating saluran menggunakan daya dibandingkan rating saluran berdasarkan suhu.
3. Mengetahui dan mendapatkan hasil perbedaan pembebanan ekonomis pembangkit antara *static line rating* dibandingkan *dynamic line rating*.
4. Mengetahui evolusi perubahan suhu saluran antara *dynamic line rating*, *static line rating* dan rating daya.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi dalam keadaan menyala.
2. *Ramp up* pembangkit sama dengan *ramp down* pembangkit.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *Matlab*.
4. Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah *quadratically constrained quadratic program*.
5. Efisiensi masing-masing pembangkit dianggap 100%.
6. Kondisi meteorologi pada setiap saluran transmisi sama.
7. Sistem yang dipakai adalah sistem IEEE 9 bus dan 30 bus.

8. Jenis saluran yang digunakan adalah ACSR (*aluminium conductor steel-reinforced*).

## 1.5 Kontribusi

Pada [8], dilakukan perhitungan *direct current optimal power flow* mempertimbangkan batas keamanan sistem menggunakan rating saluran dinamis berdasarkan kondisi cuaca. Di [8], persamaan keseimbangan panas untuk perhitungan *dynamic line rating* masih menggunakan yang *steady state* serta sistem tidak mempertimbangkan rugi-rugi saluran. Metode yang digunakan adalah *quadratic programming*.

Sesuai referensi [6], persamaan keseimbangan panas *steady state* merupakan perhitungan dengan asumsi nilai variabel yang konstan sepanjang waktu. Variabel ini meliputi arus yang mengalir pada saluran, suhu saluran dan kondisi cuaca (suhu lingkungan dan koefisien konveksi). Sehingga persamaan ini, tidak cocok untuk diaplikasikan pada permasalahan *dynamic optimal power flow* dengan arus saluran berubah-ubah, dan kondisi nyata dari cuaca yang nilainya dinamis.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian [8]. Kontribusi dalam penelitian ini adalah melakukan perhitungan *direct current optimal power flow* dengan *dynamic line rating* berdasarkan persamaan keseimbangan panas *non-steady state* mempertimbangkan rugi-rugi saluran menggunakan metode *quadratically constrained quadratic program*.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Penelitian Terkait**

Penelitian ini terkait dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Standar perhitungan rating saluran transmisi berdasarkan hubungan arus dan temperature dibahas mendetail dalam IEEE Std. 738 [6]. Penelitian [11] melakukan aplikasi *dynamic line rating* dalam *optimal power flow* tradisional dengan membuat koordinasi *electro-thermal* berdasarkan persamaan keseimbangan panas.

Penelitian [1] mengintegrasikan DLR pada saluran transmisi dalam permasalahan *alternating current optimal power flow* (ACOPF) dengan membandingkan penggunaan SLR. Hasilnya menunjukkan bahwa DLR lebih ekonomis untuk sistem jika dibandingkan dengan SLR.

Lalu pada penelitian [4], DLR diaplikasikan dalam permasalahan *security constrained unit commitment* yang berpotensi untuk meningkatkan keamanan sistem di samping meningkatkan tingkat ekonominya. Karena permasalahan yang kompleks akibat integrasi DLR maka pada penelitian tersebut, digunakanlah metode dekomposisi Bender untuk menyederhanakan permasalahan dan dilakukan pendekatan linear untuk variabel kehilangan panas (pendinginan) konveksi dan radiasi.

Penelitian [2] mengaplikasikan DLR dengan tujuan untuk mengatasi peningkatan integrasi energi terbarukan yang jauh dari pusat beban yang membuat muatan jalur transmisi menjadi padat. Sehingga dengan DLR akan memberikan pilihan untuk tidak membutuhkan pembangunan jalur transmisi baru yang biayanya besar. Disebutkan dalam penelitian [5] bahwa DLR terbukti dapat memaksimalkan kemampuan operasi sistem tenaga untuk mengatasi ketidakpastian output pembangkit listrik tenaga angin dan memfasilitasi pemanfaatannya secara bersamaan. Namun, implementasi DLR akan menimbulkan ketidakpastian tambahan, karena rating saluran aktual tidak dapat diprediksi secara akurat sebelumnya.

Penelitian [7] membahas *weather-based optimal power flow* dengan integrasi tenaga angin. Aplikasi DLR dalam penelitian tersebut telah terbukti

menunjukkan nilai resistansi yang lebih *real* dan mengurangi kerugian dari sistem serta meningkatkan potensi penggunaan tenaga angin. Namun dalam penelitian tersebut persamaan keseimbangan panas yang digunakan adalah yang *steady state* yang tidak cocok untuk kondisi dinamis termal.

Penelitian [8] mengaplikasikan DLR dalam permasalahan *security constrained optimal power flow*. Hasilnya menunjukkan DLR dapat meningkatkan kapasitas maksimal saluran dalam perencanaan serta dapat memberikan keuntungan ketika penetrasi tinggi saat kondisi kontingensi. Namun dalam penelitian tersebut metodenya masih menggunakan *direct current optimal power flow* tanpa mempertimbangkan rugi-rugi saluran. Selain itu persamaan keseimbangan panas menggunakan yang *steady state* sehingga tidak ada pengaruh suhu kondisi sebelum terhadap kapasitas maksimal saluran di waktu selanjutnya.

## 2.2 Teori Dasar

### 2.2.1 *Direct Current Optimal Power Flow (DCOPF)*

*Optimal Power Flow* adalah gabungan dari dua studi yaitu *power flow* dan *economic dispatch*. Melalui studi *power flow* akan didapat data berupa *magnitude* dan sudut fasa tegangan pada bus, besar pembangkitan daya aktif dan reaktif generator, serta rugi-rugi jaringan, dan besar pembebanan. Metode *power flow* menemukan solusi matematis namun tidak memperhitungkan optimasi dari sisi ekonomi pembangkit. *Economic dispatch* menggambarkan berbagai formulasi untuk menentukan biaya pembangkitan termurah untuk melayani beban tertentu berdasarkan beberapa batasan. Namun formulasi ini terlalu menyederhanakan dengan mengabaikan batasan aliran daya. *Optimal power flow* mencari solusi optimal dari fungsi objektif sistem yang berupa total biaya pembangkitan generator. Metode *optimal power flow* dilakukan berdasarkan batasan aliran daya dan batasan operasional lainnya seperti batasan minimum output generator, batasan tegangan dan batasan saluran transmisi.

*DC power flow* merupakan bentuk penyederhanaan dari pemodelan *AC power flow*. Pemodelan *DC power flow* lebih mudah diselesaikan dan dipahami, serta hasilnya tidak terlalu beda dengan pemodelan *AC power flow*. Fungsi tujuan

dari DCOPF sama dengan ACOPF yaitu mendapatkan biaya minimal total pembangkitan sesuai dengan batasan-batasan sistem. Berikut adalah fungsi objektif dari DCOPF:

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (2.1)$$

Dimana:

$F_i$  = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (Rp)

$P_{gi}$  = Daya output dari pembangkit ke-i (MW)

$a_i, b_i, c_i$  = koefisien biaya pembangkitan ke-i

Perbedaan DCOPF dengan ACOPF terlihat pada variabel yang akan dihitung untuk mendapatkan fungsi tujuan. Pada DCOPF hanya memperhitungkan daya aktif dan sudut fasa tegangan. Daya reaktif diabaikan dan magnitud tegangan besarnya diasumsikan tetap 1.0 p.u. Berikut adalah aliran daya pada setiap saluran dan daya yang diinjeksikan setiap bus pada permasalahan DCOPF:

$$P_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i^t - \theta_j^t) \quad (2.2)$$

$$P_i = \sum_j^N P_{ij} = \sum_j^N \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i^t - \theta_j^t) \quad (2.3)$$

Dimana:

$P_{ij}$  = Daya yang mengalir dari bus i ke bus j

$P_i$  = Daya yang diinjeksikan oleh bus i

$\theta_i, \theta_j$  = Sudut tegangan yang dihasilkan pada bus i atau bus j

$x_{ij}$  = Reaktansi saluran yang menghubungkan bus i dan bus j

Dalam permasalahan optimasi seperti DCOPF ada dua batasan secara umum yaitu *equality* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* dalam permasalahan DCOPF adalah persamaan keseimbangan daya aktif pada tiap bus sistem dimana daya yang masuk harus sama dengan yang keluar. Selain itu, ditambahkan dengan aliran daya pada saluran sesuai persamaan (2.3). Sedangkan *Inequality constraint* merupakan batasan pertidaksamaan yang biasanya digunakan untuk batas keamanan sistem. *Inequality constraint* dalam permasalahan DCOPF

adalah batasan pembangkitan daya generator, sudut tegangan bus dan aliran daya di kapasitas saluran.

Berikut adalah bentuk matematis dari semua constraint DCOPF:

1. Keseimbangan daya aktif

$$P_{gi}^t - P_i^t - P_{Li}^t = 0 \quad (2.4)$$

Dimana  $P_{gi}^t$  adalah daya pembangkitan generator  $i$  pada waktu  $t$ .

Sedangkan  $P_{Li}^t$  adalah daya beban pada bus  $i$  pada waktu  $t$ .

2. DC Power Flow

$$P_i = \sum_j^N P_{ij} = \sum_j^N \frac{1}{x_{ij}} (\theta_i^t - \theta_j^t) \quad (2.5)$$

3. Batasan daya pembangkitan generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.6)$$

4. Batasan sudut tegangan

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad (2.7)$$

5. Batasan saluran transmisi

$$P_{ij} \leq P_{ij,max} \quad (2.8)$$

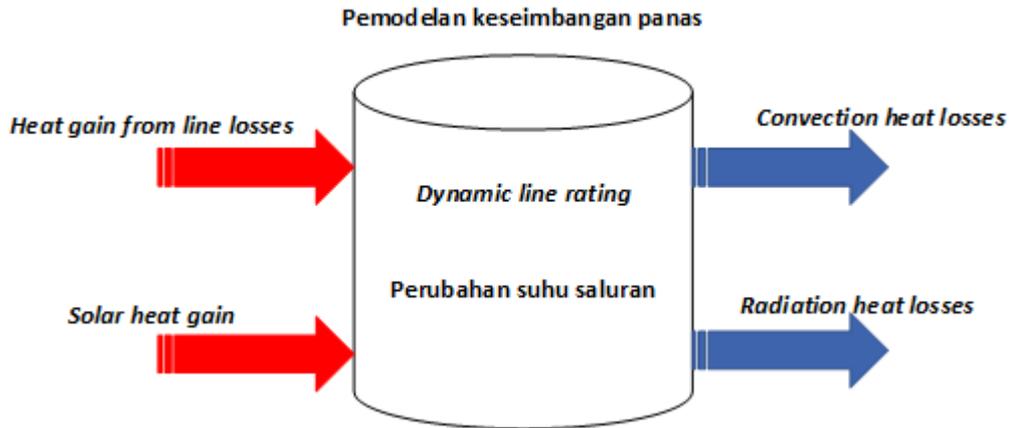
Untuk menyelesaikan permasalahan dengan beban dinamis maka DCOPF harus dikembangkan menjadi *dynamic DCOPF*. Beban dinamis pada penelitian ini merupakan beban yang berubah-ubah dalam selang waktu satu jam. Pemodelan *dynamic DCOPF* mengharuskan adanya penambahan batasan ramp rate [9]. *Ramp rate* merupakan batasan kenaikan atau penurunan pembangkitan generator pada waktu tertentu terhadap waktu sebelumnya. Berikut adalah bentuk matematis dari batasan *ramp rate*:

$$P_{RUp} \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq P_{Rdown} \quad (2.9)$$

Dimana  $P_{gi}^{t+1}$  adalah pembangkitan daya generator pada waktu  $t + 1$ , sedangkan  $P_{RUp}$  dan  $P_{Rdown}$  adalah *ramp up* dan *ramp down* pembangkit yang pada penelitian ini diasumsikan nilainya sama.

### 2.2.2 Dynamic Line Rating

Menurut penelitian [6] suhu konduktor jaringan tergantung pada arus yang mengalir melalui konduktor, ukuran konduktor dan resistansi serta kondisi cuaca sekitar (misalnya suhu, kecepatan angin dan radiasi matahari).



Gambar 2.1 Model keseimbangan panas pada saluran

Terdapat dua persamaan keseimbangan panas pada saluran, yaitu *steady state heat balance* dan *non-steady state heat balance*. Gambar 2.1 mengilustrasikan pemodelan keseimbangan panas pada saluran. Berikut ini adalah persamaan matematis *steady state heat balance* :

$$q_l + q_s = q_c + q_r \quad (2.10)$$

Dimana  $q_l$  adalah penambahan panas akibat rugi-rugi transmisi (*heat gain from line losses*) dan  $q_s$  adalah *solar heat gain* sedangkan  $q_c$  adalah kehilangan panas konveksi (*convection heat loss*) dan  $q_r$  adalah kehilangan panas radiasi (*radiated heat loss*).

Kehilangan panas konveksi  $q_c$  adalah fungsi linear dari temperatur konduktor yang diformulasikan sebagai berikut :

$$q_c = K_c \cdot (T_c - T_a) \quad (2.11)$$

Sedangkan kehilangan panas radiasi  $q_r$  adalah sebuah fungsi nonlinear dengan formulasinya adalah:

$$q_r = K_r \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (2.12)$$

Dimana  $K_c$  merupakan koefisien *convection heat loss* yang nilainya tergantung dari kecepatan angin, sedangkan  $K_r$  merupakan koefisien *radiation heat loss* yang nilainya jauh lebih kecil dibandingkan  $K_c$ .  $T_c$  adalah suhu saluran sedangkan  $T_a$  adalah suhu lingkungan (*ambient*).

Menggunakan persamaan (2.11), (2.12) dan  $q_l = P_{loss}$  maka persamaan (2.10) secara keseluruhan dapat ditulis:

$$P_{loss} + q_s = K_c \cdot (T_c - T_a) + K_r \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (2.13)$$

Jika  $P_{loss}$  kemudian dihubungkan dengan besar arus yang mengalir pada saluran. Maka sesuai referensi [6], nilai arus maksimal yang dibolehkan mengalir pada saluran pada kasus persamaan keseimbangan kondisi *steady state* dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$I_{max} = \sqrt{\frac{K_c \cdot (T_c - T_a) + K_r \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R}} \quad (2.14)$$

Dimana R adalah nilai resistansi saluran.

Untuk persamaan *non-steady-state heat balance* sedikit berbeda dengan persamaan *steady state heat balance*. Dimana di kondisi ini, selisih antara penambahan dan pengurangan panas, akan menyebabkan suhu konduktor akan naik atau turun. Jika lebih banyak energi panas yang masuk, maka suhu konduktor akan naik. Namun jika energi panas yang keluar lebih banyak maka suhu konduktor akan turun. Berikut adalah persamaan *non-steady-state heat balance* :

$$\frac{\rho_{ik} (T_c^{t+1} - T_c^t)}{\Delta t} = q_l + q_s - q_c - q_r \quad (2.15)$$

Dimana  $\rho_{ik}$  adalah line heat capacity yang menghubungkan antara perubahan suhu saluran dengan energi panas yang masuk atau keluar dari saluran.  $\Delta t$  adalah HBE time step discretization.  $T_c^t$  adalah suhu konduktor pada waktu sekarang sedangkan  $T_c^{t+1}$  adalah suhu konduktor pada waktu berikutnya yang berubah sesuai dengan besaran energi yang masuk atau keluar.

Menggunakan persamaan (2.11), (2.12) dan  $q_l = P_{loss}$  maka persamaan (2.15) secara keseluruhan dapat ditulis:

$$\begin{aligned} \rho_{ik} (T_c^{t+1} - T_c^t) = \Delta t \{ & P_{loss} + q_s - K_c \cdot (T_c^t - T_a^t) \\ & - K_r \cdot [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Karena nilai *radiation heat loss* yang jauh lebih kecil dibandingkan *convection heat loss* maka variabel *radiation heat loss* pada (2.16) dapat dihilangkan sehingga persamaan menjadi lebih mudah dan dapat diselesaikan dengan metode *quadratically constrained quadratic program*. Persamaan (2.16) tersebut kemudian menjadi:

$$T_c^{t+1} = T_c^t + \frac{\Delta t}{\rho_{ik}} [(P_{loss} + q_s - K_c \cdot (T_c^t - T_a^t))] \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.17) dapat dilihat bahwa suhu saluran pada waktu berikutnya tergantung dari suhu saluran sebelumnya ditambah dengan total energi panas yang masuk atau keluar dari saluran dibagi dengan *heat capacity* saluran. Jika energi panas yang masuk lebih besar maka suhu konduktor akan naik, dan sebaliknya jika energi panas yang keluar lebih besar maka suhu konduktor akan turun.

### 2.2.3 Rugi-rugi Saluran Pada Sistem DC

Pada umumnya pemodelan DCOPF tidak mempertimbangkan rugi-rugi saluran berbeda dengan ACOPF. Namun untuk mengintegrasikan DLR ke dalam permasalahan OPF memerlukan sistem yang mempertimbangkan rugi-rugi transmisi. Dari sumber referensi [12], ditunjukkan bahwa pemodelan DCOPF bisa mempertimbangkan rugi-rugi transmisi, dengan bentuk yang lebih sederhana dibandingkan rugi-rugi transmisi pada pemodelan ACOPF.

Aliran daya transmisi ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.18)$$

Dimana:

- $P_{ij}$  = Aliran daya aktif dari bus  $i$  ke bus  $j$
- $g_{ij}$  = Konduktansi saluran
- $b_{ij}$  = Subseptansi saluran
- $V_i V_j$  = Magnitude tegangan pada bus  $i$  dan bus  $j$

$\theta_i \theta_j$  = Sudut tegangan pada bus  $i$  dan bus  $j$

Rugi-rugi daya saluran merupakan selisih aliran daya yang disalurkan dengan yang diterima pada sebuah bus. Secara matematis rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (2.19)$$

Dimana:

$P_{lij}$  = Rugi daya saluran yang menghubungkan bus  $i$  bus  $j$

$P_{ij}$  = Aliran daya aktif dari bus  $i$  ke bus  $j$

$P_{ji}$  = Aliran daya aktif dari bus  $j$  ke bus  $i$

Selanjutnya dilakukan penjabaran persamaan (2.19) menggunakan persamaan (2.18). Persamaan rugi daya saluran yang baru menjadi:

$$P_{lij} = (V_i^2 + V_j^2)g_{ij} - 2V_iV_jg_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2.20)$$

Sesuai dengan pemodelan *DC power flow*, nilai tegangan bus diasumsikan 1 p.u, maka persamaan menjadi lebih sederhana :

$$P_{lij} = 2g_{ij} - 2g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2.21)$$

Karena perbedaan sudut fasa yang sangat kecil, maka menggunakan pendekatan deret taylor, fungsi cosinus menjadi :

$$\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1 - 0.5(\theta_i - \theta_j)^2 \quad (2.22)$$

Sehingga jika persamaan (2.22) disubstitusikan kedalam persamaan (2.21), hasilnya menjadi :

$$P_{lij} \approx g_{ij}(\theta_i - \theta_j)^2 \quad (2.23)$$

Hasil akhir persamaan (2.23) ini nanti yang kemudian digabungkan dalam pemodelan DCOPF, sehingga sistem menjadi mempertimbangkan rugi-rugi transmisi, dan kemudian bisa digabungkan dengan persamaan keseimbangan panas.

## 2.2.4 *Quadratically Constrained Quadratic Program*

*Quadratically constrained quadratic program* adalah metode yang bisa digunakan untuk permasalahan optimasi dengan fungsi objektif berbentuk kuadrat

dan *constraint* berbentuk linear atau kuadrat. Metode ini adalah pengembangan dari *quadratic programming*. Dimana dalam metode *quadratic programming*, fungsi objektifnya berbentuk kuadrat yang sesuai dengan bentuk fungsi tujuan pemodelan DCOPF yaitu pembangkitan daya generator yang bentuknya juga kuadrat. Batasan dari *quadratic programming* hanya bisa menampung maksimal dalam bentuk linear. Hal ini cocok jika diaplikasikan dalam pemodelan DCOPF tanpa mempertimbangkan rugi-rugi saluran, karena semua batasannya berbentuk linear. Namun metode ini tidak cocok jika diaplikasikan dalam sistem yang mempertimbangkan rugi-rugi saluran karena persamaan (2.27) berbentuk kuadrat. Untuk itu metode yang cocok digunakan dalam pemodelan DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi saluran adalah metode *quadratically constrained quadratic program*.

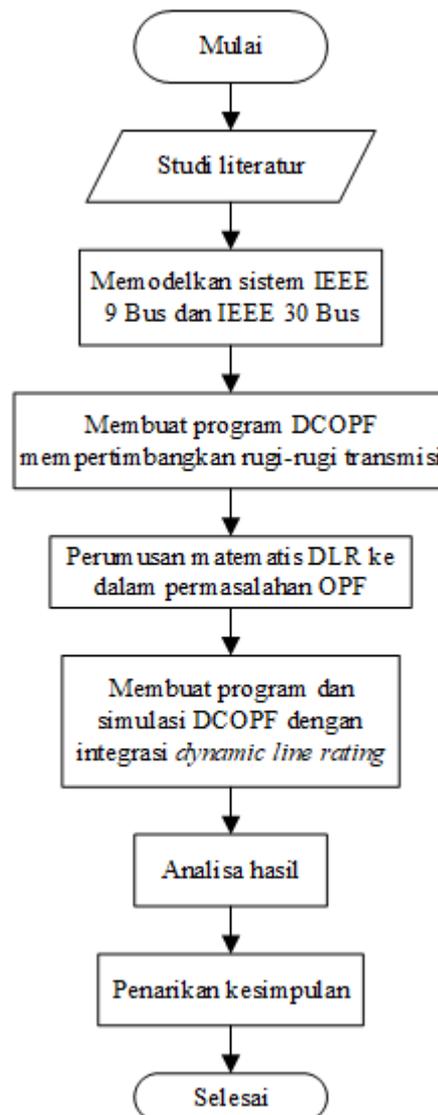
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Algoritma

Pada penelitian ini, DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan rating saluran dinamis berdasarkan persamaan keseimbangan panas diselesaikan dengan metode *quadratically constrained quadratic program*. Pemodelan sistem dan simulasi dilakukan menggunakan *software MATLAB* dengan *Toolbox OPTI*. Algoritma alur penyelesaian penelitian ini sesuai ditunjukkan Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram algoritma alur penyelesaian penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur mengenai *optimal power flow*, *dynamic line rating*, persamaan keseimbangan panas, DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi serta metode *quadratically constrained quadratic program*. Dari hal tersebut, kemudian dilakukan kajian tentang pemahaman konsep dan teori.

Lalu dilanjutkan dengan pengumpulan data mengenai sistem IEEE 9 bus dan 30 bus yang akan digunakan untuk simulasi *optimal power flow*. Data yang dikumpulkan meliputi data bus, saluran, beban dan *cost function* pembangkit serta kapasitas minimum dan maksimum pembangkit. Kemudian dilanjutkan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk perhitungan DLR yang meliputi suhu lingkungan, koefisien konveksi, dan *solar heat gain*.

Langkah selanjutnya yaitu membuat dan mensimulasikan program DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi. Hasil simulasi program ini akan dibandingkan dengan simulasi OPF menggunakan Matpower. Sistem yang disimulasikan adalah sistem IEEE 9 bus yang datanya telah didapat sebelumnya.

Kemudian dilanjutkan dengan perumusan matematis untuk mengintegrasikan DLR ke dalam permasalahan OPF. Perumusan aplikasi DLR ke dalam permasalahan OPF didasarkan pada persamaan keseimbangan panas *non-steady state*. Dimana dari persamaan tersebut akan terdapat hubungan antara suhu saluran yang mewakili permasalahan DLR dengan rugi-rugi transmisi yang mewakili permasalahan OPF. Dengan menggunakan persamaan keseimbangan panas *non-steady state*, rugi-rugi transmisi yang terjadi pada saluran akan menyebabkan perubahan suhu pada saluran selain juga dipengaruhi oleh transfer panas yang lain, seperti konveksi. Kemudian suhu akhir dari saluran tersebut, akan menjadi suhu awal saluran di waktu selanjutnya. Akibatnya akan ada keterkaitan suhu saluran antar waktu. Dan pembatasan suhu saluran yang tidak boleh melebihi kapasitas maksimalnya menjadi batas rugi-rugi transmisi, yang kemudian berhubungan dengan batas daya yang bisa disalurkan oleh saluran transmisi.

Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan program DCOPF dengan integrasi *dynamic line rating*. Dengan adanya penambahan *dynamic line rating* ke dalam permasalahan DCOPF, maka variabel kontrolnya akan bertambah satu, yaitu suhu saluran. Batasan persamaannya menjadi lebih rumit dengan adanya persamaan

keseimbangan panas. Pembuatan program DCOPF dengan DLR akan mengacu sesuai permasalahan tersebut serta perumusan matematis di tahap sebelumnya.

Kemudian pembuatan program dilanjutkan dengan bentuk *dynamic*. Perubahan tersebut meliputi masukan beban yang dinamis dan penambahan batasan *ramp rate* generator. Setiap program yang dibuat akan dilakukan cek performansi. Yang pertama, cek performansi didasarkan pada informasi konvergen program. Konvergensi pertama dilihat dari tidak adanya bentuk matriks yang tidak sesuai, dengan tidak adanya peringatan kesalahan dimensi matriks. Lalu konvergensi kedua dilihat dari program yang memberikan hasil masuk akal, jika sistem tidak konvergen, maka akan banyak muncul angka 0, termasuk variabel kontrol. Konvergensi yang ketiga bisa dilihat dari informasi program, seperti info *exitflag*. Cek performansi kedua adalah dengan melihat efek penambahan variabel pada program berdasarkan hasil *optimal power flow*. Misalnya, dalam pembuatan program DCOPF dengan batasan *ramp rate*. Maka kita harus simulasikan program tersebut dimana batasan *ramp rate* mempengaruhi hasil penjadwalan, dengan cara memberikan perubahan beban yang besar. Sampai hasilnya menunjukkan program terbukti memperhitungkan batasan *ramp rate* dalam perhitungan optimasi dan nilainya menunjukkan hasil yang sesuai.

Analisa hasil yang pertama yaitu cek validasi program dengan membandingkannya dengan hasil menggunakan *matpower*. Kemudian dilanjutkan dengan studi kasus menggunakan sistem IEEE 9 bus dan 30 bus.

Studi kasus yang pertama yaitu sistem dengan pemodelan *dynamic line rating*. Dimana pemodelan ini dilakukan sesuai dengan program yang sebelumnya telah dibuat, dengan constraint persamaan keseimbangan panas dan batasan suhu maksimal saluran. Data suhu lingkungan, koefisien konveksi dan *solar heat gain*, menggunakan model dinamis yang berubah-ubah sesuai waktunya.

Studi kasus yang kedua yaitu sistem dengan pemodelan *static line rating*. Pemodelan ini mirip dengan *dynamic line rating*. Namun data untuk perhitungan *heat balance equation* menggunakan kondisi statis terburuknya, yaitu saat nilai suhu lingkungan dan *solar heat gain* yang tinggi dan saat nilai koefisien konveksinya rendah.

Studi kasus yang ketiga yaitu sistem dengan pemodelan rating daya. Pada studi kasus ini tidak menggunakan batasan suhu maksimal saluran. Namun rating saluran menggunakan daya, yang nilainya tetap. Dari ketiga studi kasus itu, kemudian akan dianalisa dan dibandingkan hasilnya. Kemudian dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan hasil dan analisa yang didapatkan.

### **3.2 Penerapan *Quadratically Constrained Quadratic Program* pada *MATLAB* untuk Menyelesaikan Permasalahan DCOPF dengan *Dynamic Line Rating***

#### **3.2.1 *Quadratically Constrained Quadratic Program* pada *MATLAB***

Penyelesaian *Quadratic Constrained Quadratic Program* (QCQP) pada *MATLAB* menggunakan *OPTIToolbox*. Permasalahan QCQP menggunakan fungsi *Quadratic Programming* tetapi dengan penambahan fungsi kuadrat sebagai salah satu batasannya. Berikut ini adalah variabel input dan output pada QCQP:

1. **H** adalah matriks simetris yang berisi koefisien kuadrat dari fungsi obyektif. Pada permasalahan OPF, matriks H berisi koefisien kuadrat dari fungsi biaya pembangkitan.
2. **f** adalah vektor baris yang isinya adalah koefisien linear dari fungsi obyektif. Pada OPF, vektor f berisi koefisien linear dari fungsi biaya pembangkitan.
3. **A** adalah matriks yang berisi koefisien linear dari *linear constraints* baik *equality constraints* ataupun *inequality constraint*.
4. **lb** dan **ub** adalah vektor kolom yang berisi konstanta dari *linear constraints*. Vektor lb sebagai batas bawah dan vektor ub sebagai batas atas. Untuk *equality constraints* maka vektor lb dan ub mempunyai nilai yang sama.
5. **Q** adalah matriks simetris yang isinya adalah koefisien kuadrat dari *quadratic constraints*.
6. **l** adalah vektor kolom yang isinya adalah koefisien linear dari *linear constraints*.

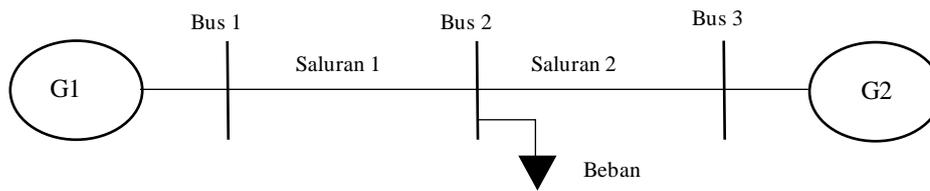
7. **r** adalah skalar yang menyatakan konstanta *quadratic constraints*. Jika *quadratic constraints* memiliki batas atas dan bawah, maka digantikan skalar **qrl** dan **qru** sebagai batas atas dan bawah.
8. **xmin** dan **xmax** adalah vektor kolom yang merupakan batas atas dan bawah dari variabel kontrol **x**.

Variabel-variabel input diatas, kemudian akan diproses untuk menghasilkan variabel-variabel output sebagai berikut :

1. **x** merupakan vektor kolom yang berisi variabel kontrol yang dioptimasi. Pada DCOPF biasa, **x** terdiri dari sudut tegangan masing-masing bus dan daya aktif pembangkitan masing-masing generator.
2. **fval** adalah nilai total hasil fungsi obyektif yang telah dioptimasi. Pada DCOPF **fval** merupakan total nilai biaya pembangkitan, namun dikurangi dengan bagian konstanta biaya pembangkitan, karena fungsi obyektif pada QCQP hanya bagian yang mengandung variabel.
3. **exitflag** adalah kode yang digunakan untuk menunjukkan status dari proses optimasi. Nilai **exitflag** 1 menunjukkan bahwa hasil optimasi konvergen dan **exitflag** 0 menunjukkan bahwa hasil optimasi tidak konvergen.
4. **Info** berisi informasi tambahan yang menunjukkan detail dari proses optimasi seperti jenis solver yang digunakan, lama waktu optimasi dan informasi lain.

### 3.2.2 Penerapan *Quadratically Constrained Quadratic Program* untuk Menyelesaikan Permasalahan DCOPF dengan *Dynamic Line Rating*

Untuk mempermudah memahami pembentukan matriks penerapan *quadratically constrained quadratic* program pada permasalahan DCOPF dengan *dynamic line rating*, digunakan contoh sistem kecil. Yaitu sistem dengan tiga bus, dan dua saluran yang menghubungkan bus 1 dengan bus 2, dan bus 2 dengan bus 3. Sistem mempunyai dua pembangkit di bus 1 dan bus 3, serta satu beban berada di bus 2. Ilustrasi sistem kecil ditunjukkan oleh gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sistem kecil 3 bus

### 3.2.2.1 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang akan dioptimasi dan dicari nilainya. Pada permasalahan DCOPF biasa variabel kontrol meliputi daya pembangkitan generator dan sudut tegangan. Pada *quadratically constrained quadratic program* variabel yang dikontrol nilainya adalah  $x$ . Untuk memudahkan proses pembentukan matriks, aliran daya saluran juga akan dimasukkan dalam variabel kontrol  $x$ . Pada permasalahan *dynamic line rating*, maka variabel kontrol selain tiga hal tersebut, akan ditambahkan dengan variabel baru lagi, yaitu suhu saluran. Sehingga jika ditotal secara keseluruhan jumlah variabel kontrol dengan sistem 3 bus, periode satu jam adalah  $ngen + nbus + (4 * nline)$ .  $ngen$  adalah jumlah generator, yang merepresentasikan daya pembangkitan generator.  $nbus$  adalah jumlah bus, yang merepresentasikan sudut tegangan.  $nline$  adalah jumlah saluran.  $nline$  pertama merepresentasikan suhu awal saluran.  $2 * nline$  berikutnya merepresentasikan aliran daya masuk dan keluar pada saluran. Lalu  $nline$  terakhir menunjukkan suhu akhir saluran. Untuk sistem lebih dari satu jam, maka setiap penambahan satu jamnya, variabel kontrol ditambahkan  $(ngen + nbus + 3 * nline)$ . Misal untuk sistem dengan  $t=2$ , maka jumlah variabel kontrol adalah  $(ngen + nbus + 3 * nline) * t + nline$ . Variabel kontrol  $x$  untuk  $t=1$  maka dituliskan  $x^1$ , sedangkan untuk  $t=2$  maka dituliskan  $x^2$ . Berikut ini adalah  $x^1$  dan  $x^2$  untuk sistem dengan 3 bus:

$$x^1 = \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix} \quad x^2 = \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \\ P_{g1}^2 \\ P_{g2}^2 \\ \theta_1^2 \\ \theta_2^2 \\ \theta_3^2 \\ P_{12}^2 \\ P_{23}^2 \\ P_{21}^2 \\ P_{32}^2 \\ T_{12}^3 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix}$$

### 3.2.2.2 Pembentukan Matriks Fungsi Objektif

Pembentukan matriks fungsi objektif menyesuaikan model persamaan QCQP untuk fungsi objektif yaitu :

$$\text{Min } F(x) = \frac{1}{2}x^T * H * x + x^T * f \quad (3.1)$$

Dari persamaan (3.1) maka fungsi objektif dalam permasalahan DCOPF merupakan fungsi biaya keseluruhan sistem berbentuk *quadratic* yang koefisien matriksnya disusun dalam matriks H dan f. Koefisien kuadrat dimasukkan dalam matriks H, sedangkan koefisien linear dimasukkan dalam matriks f. Ukuran baris dan kolom matriks H adalah sesuai jumlah variabel kontrol. Ukuran baris matriks f adalah sejumlah variabel kontrol, sedangkan ukuran kolomnya adalah 1.

Fungsi biaya sesuai contoh sistem dengan 2 generator dan t=1 adalah sebagai berikut :

$$F = a_1^1(P_{g1}^1)^2 + b_1^1P_{g1}^1 + c_1^1 + a_2^1(P_{g2}^1)^2 + b_2^1P_{g2}^1 + c_2^1 \quad (3.2)$$

Sehingga koefisien persamaan tersebut dituliskan dalam matriks H sebagai berikut :

$$H = 2 * \begin{matrix} [T_{12}^1 & T_{23}^1 & P_{g1}^1 & P_{g2}^1 & \theta_1^1 & \theta_2^1 & \theta_3^1 & P_{12}^1 & P_{23}^1 & P_{21}^1 & P_{32}^1 & T_{12}^2 & T_{23}^2] \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Vektor bagian atas H adalah matriks  $x^T$  sebagai variabel yang melekat pada H sesuai kolomnya, sedangkan vektor bagian kanan H adalah  $x$  yang melekat pada H sesuai barisnya. Sebagai contoh koefisien  $a_1^1$  pada H terletak di baris ke-3 dan kolom ke-3, berarti koefisien tersebut dikalikan dengan variabel  $x$  kolom ke-3 dan variabel  $x^T$  kolom ke-3, sehingga secara keseluruhan mewakili  $a_1^1(P_{g1}^1)^2$ .

Untuk matriks  $f$  bentuknya adalah sebagai berikut:

$$f^T = [0 \quad 0 \quad b_1^1 \quad b_2^1 \quad 0 \quad 0]$$

Matriks  $f$  dituliskan dalam bentuk *transpose*, sehingga berbentuk mendatar agar lebih mudah dalam penulisan, tidak memanjang ke bawah. Bagian atas  $f$  adalah matriks  $x^T$  sebagai indeks variabel matriks f, sebagai contoh koefisien  $b_2^1$  terletak pada kolom ke-4, sehingga koefisien tersebut dikalikan variabel  $P_{g2}^1$  yang terletak pada kolom ke-4 matriks  $x^T$ , sehingga secara keseluruhan mewakili  $b_2^1P_{g2}^1$ .

Untuk  $t$  lebih dari satu jam, maka matriks  $H$  disusun secara diagonal sebanyak  $t$  kali. Sedangkan matriks  $f^T$  disusun sebanyak  $t$  kali dengan arah mendatar. Sebagai contoh, penyusunan matriks  $H$  dan  $f^T$  dengan periode  $t=2$  adalah sebagai berikut :

$$H = \begin{bmatrix} H^1 & \text{zeros} \\ \text{zeros} & H^2 \end{bmatrix}$$

$$f^T = [f_1^T \quad f_2^T]$$

*zeros* adalah matriks yang isinya adalah angka 0 semua, ukuran barisnya menyesuaikan ukuran baris matriks yang terletak di kiri atau di kanannya, ukuran kolomnya menyesuaikan ukuran kolom matriks yang berada di atas atau di bawahnya.

### 3.2.2.3 Pembentukan matriks linear constraint

Pembentukan *linear constraint* menyesuaikan model persamaan QCQP untuk *linear constraint* yaitu :

$$lb \leq A * x \leq ub \quad (3.3)$$

*Linear constraint* pada permasalahan DCOPF dengan *dynamic line rating* terdapat lima batasan secara umum, yaitu persamaan *active power balance*, *DC power flow*, *slack bus* dan keseimbangan panas, serta batasan *ramp rate*.

Persamaan *active power balance* pada sistem dengan 3 bus sesuai contoh dengan periode  $t=1$  adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} -P_{g1}^1 + P_{12}^1 &= 0 \\ P_{21}^1 + P_{23}^1 &= -P_{d1} \\ -P_{g2}^1 + P_{32}^1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Persamaan *DC power flow* pada sistem dengan 3 bus sesuai contoh adalah berikut:

$$\begin{aligned} \frac{P_{12}^1 - P_{21}^1}{2} &= \frac{1}{x_{12}} [\theta_1^1 - \theta_2^1] \\ \frac{P_{23}^1 - P_{32}^1}{2} &= \frac{1}{x_{23}} [\theta_2^1 - \theta_3^1] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Persamaan *slack bus* pada sistem dengan 3 bus sesuai contoh adalah berikut:

$$\theta_1^1 = 0 \quad (3.6)$$

Sehingga secara keseluruhan, tiga *linear constraint* tersebut koefisiennya dapat ditulis dalam matriks A sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} T_{12}^1 & T_{23}^1 & P_{g1}^1 & P_{g2}^1 & \theta_1^1 & \theta_2^1 & \theta_3^1 & P_{12}^1 & P_{23}^1 & P_{21}^1 & P_{32}^1 & T_{12}^2 & T_{23}^2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{x_{12}} & -\frac{1}{x_{12}} & 0 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{x_{23}} & -\frac{1}{x_{23}} & 0 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Lalu untuk vektor konstanta lb dan ub adalah sebagai berikut :

$$lb = \begin{bmatrix} 0 \\ -P_{d1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad ub = \begin{bmatrix} 0 \\ -P_{d1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Persamaan *heat balance* secara umum adalah sebagai berikut :

$$T_{ij}^{t+1} = T_{ij}^t + \frac{\Delta t}{\rho_{ik}} [(P_{ij}^t + P_{ji}^t + q_s - K_c \cdot (T_{ij}^t - T_a^t))] \quad (3.7)$$

Kemudian jika ingin dipisahkan antara koefisien yang melekat dengan variabel kontrol dan konstanta sehingga mudah untuk dibuat matriksnya, maka persamaan 3.01 menjadi :

$$\left(-\frac{\rho_{ik}}{\Delta t} + K_c\right) * T_{ij}^t + \frac{\rho_{ik}}{\Delta t} * T_{ij}^{t+1} - P_{ij}^t - P_{ji}^t = q_s + K_c * T_a^t \quad (3.8)$$

Persamaan *heat balance equation* pada sistem 3 bus, dengan dua saluran dan t=1 adalah sebagai berikut:

$$\left(-\frac{\rho_{ik}}{\Delta t} + K_c\right) * T_{12}^1 + \frac{\rho_{ik}}{\Delta t} * T_{12}^2 - P_{12}^t - P_{21}^t = q_s + K_c * T_a^1 \quad (3.9)$$

$$\left(-\frac{\rho_{ik}}{\Delta t} + K_c\right) * T_{23}^1 + \frac{\rho_{ik}}{\Delta t} * T_{23}^2 - P_{23}^t - P_{32}^t = q_s + K_c * T_a^1 \quad (3.10)$$

Sehingga koefisien dari batasan *linear heat balance equation* dapat ditulis sebagai berikut:

$Ahb$

$$= \begin{bmatrix} -\rho_{ik}/\Delta t + K_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & \rho_{ik}/\Delta t & 0 \\ 0 & -\rho_{ik}/\Delta t + K_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & \rho_{ik}/\Delta t \end{bmatrix}$$

Sedangkan vektor konstanta untuk *heat balance equation* yaitu  $lhb$  dan  $uhb$  adalah sebagai berikut:

$$lhb = \begin{bmatrix} q_s + K_c * T_a^1 \\ q_s + K_c * T_a^1 \end{bmatrix} \quad uhb = \begin{bmatrix} q_s + K_c * T_a^1 \\ q_s + K_c * T_a^1 \end{bmatrix}$$

Sedangkan persamaan *ramp rate* untuk sistem 3 bus, dengan periode  $t=2$  sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_{RUp1} &\leq P_{g1}^2 - P_{g1}^1 \leq P_{Rdown1} \\ P_{RUp1} &\leq P_{g1}^2 - P_{g1}^1 \leq P_{Rdown1} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Untuk sistem dengan periode  $t=2$ , maka *linear constraint* secara keseluruhan disusun sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} A^1 & \text{zeros} \\ \text{zeros} & A^2 \\ \text{Ramp rate} & \\ Ahb^1 & \text{zeros} \\ \text{zeros} & Ahb^2 \end{bmatrix}$$

#### 3.2.2.4 Pembentukan Matriks Quadratic Constraint

Pembentukan *quadratic constraint* menyesuaikan model persamaan QCQP untuk *quadratic constraint* yaitu :

$$l^T * x + x^T * Q * x = r \quad (3.12)$$

*Quadratic constraint* pada penelitian ini adalah persamaan rugi-rugi transmisi. Berikut adalah persamaan rugi-rugi transmisi untuk sistem sesuai contoh dengan dua saluran dan periode  $t=1$ :

$$\begin{aligned} -P_{12}^1 - P_{21}^1 + g_{12} (\theta_1^1 - \theta_2^1)^2 &= 0 \\ -P_{23}^1 - P_{32}^1 + g_{23} (\theta_2^1 - \theta_3^1)^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Setiap persamaan memiliki matriksnya masing-masing. Kemudian dari masing-masing matriks itu nanti ditumpuk bersama sehingga membentuk matriks  $Q$  dan  $l$  secara keseluruhan.

$$Q_{12} = \begin{matrix} & [T_{12}^1 & T_{23}^1 & P_{g1}^1 & P_{g2}^1 & \theta_1^1 & \theta_2^1 & \theta_3^1 & P_{12}^1 & P_{23}^1 & P_{21}^1 & P_{32}^1 & T_{12}^2 & T_{23}^2] \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{12} & -g_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{12} & g_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$Q_{23} = \begin{matrix} & [T_{12}^1 & T_{23}^1 & P_{g1}^1 & P_{g2}^1 & \theta_1^1 & \theta_2^1 & \theta_3^1 & P_{12}^1 & P_{23}^1 & P_{21}^1 & P_{32}^1 & T_{12}^2 & T_{23}^2] \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{23} & -g_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{23} & g_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$l_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad l_{23} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} T_{12}^1 \\ T_{23}^1 \\ P_{g1}^1 \\ P_{g2}^1 \\ \theta_1^1 \\ \theta_2^1 \\ \theta_3^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{23}^1 \\ P_{21}^1 \\ P_{32}^1 \\ T_{12}^2 \\ T_{23}^2 \end{bmatrix}$$

Jadi bentuk  $Q$  dan  $l$  secara keseluruhan yaitu:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{12} \\ Q_{23} \end{bmatrix} \quad l = [l_{12} \quad l_{23}]$$

Sedangkan matriks  $r$  nya adalah

$$r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk sistem dengan periode  $t=2$ , maka *quadratic constraint* secara keseluruhan disusun sebagai berikut:

$$Q = \begin{bmatrix} Q^1 & \text{zeros} \\ \text{zeros} & Q^2 \end{bmatrix}$$

$$l = \begin{bmatrix} l^1 & \text{zeros} \\ \text{zeros} & l^2 \end{bmatrix}$$

$$r = \begin{bmatrix} r^1 \\ r^2 \end{bmatrix}$$

### 3.2.2.5 Pembentukan matriks bound

Pembentukan *matriks bound* menyesuaikan model persamaan QCQP untuk batas atas dan bawah variabel kontrol yaitu :

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.14)$$

Matriks  $xmin$  dan  $xmax$  pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{array}{l}
 xmin = \begin{bmatrix} T_{12}^1 \ min \\ T_{23}^1 \ min \\ P_{g1}^1 \ min \\ P_{g2}^1 \ min \\ \theta_1^1 \ min \\ \theta_2^1 \ min \\ \theta_3^1 \ min \\ P_{12}^1 \ min \\ P_{23}^1 \ min \\ P_{21}^1 \ min \\ P_{32}^1 \ min \\ T_{12}^2 \ min \\ T_{23}^2 \ min \end{bmatrix}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 xmax = \begin{bmatrix} T_{12}^1 \ max \\ T_{23}^1 \ max \\ P_{g1}^1 \ max \\ P_{g2}^1 \ max \\ \theta_1^1 \ max \\ \theta_2^1 \ max \\ \theta_3^1 \ max \\ P_{12}^1 \ max \\ P_{23}^1 \ max \\ P_{21}^1 \ max \\ P_{32}^1 \ max \\ T_{12}^2 \ max \\ T_{23}^2 \ max \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Untuk periode  $t=2$  maka matriksnya disusun ke bawah sebagai berikut:

$$\begin{array}{l}
 xmin = \begin{bmatrix} xmin^1 \\ xmin^2 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 xmax = \begin{bmatrix} xmax^1 \\ xmax^2 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

## BAB 4

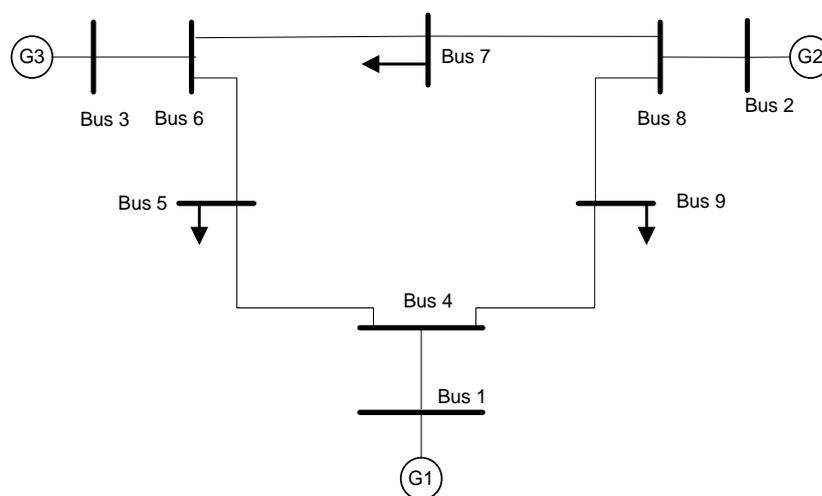
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan *dynamic line rating* berdasarkan persamaan keseimbangan panas disimulasikan dalam dua sistem yaitu pada sistem IEEE 9 bus dan IEEE 30 bus. Studi kasus yang dilakukan langsung difokuskan dalam inti penelitian yaitu mengetahui perbedaan integrasi *dynamic line rating* dibandingkan dengan *static line rating* dan rating daya.

#### 4.1 Studi Kasus IEEE 9 Bus

Gambar 4.1 menunjukkan SLD dari sistem IEEE 9 bus. Dilakukan modifikasi dengan menambahkan nilai *ramp rate* pembangkit dan mengubah kapasitas saluran dari bus 2 ke bus 8. Data pembangkit sistem ditunjukkan oleh tabel 4.1.

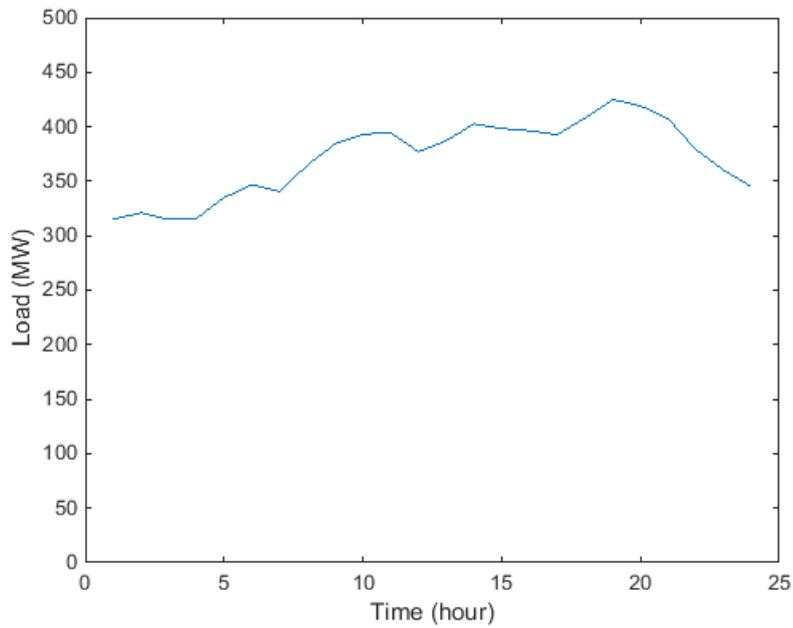
Simulasi sistem akan dilakukan dalam tiga metode rating saluran yang berbeda, yaitu pertama dengan *static line rating*, kemudian yang kedua dengan *dynamic line rating*, lalu yang terakhir dengan rating daya saluran. Simulasi dilakukan dengan beban harian 24 jam. Data beban, suhu lingkungan ( $T_a$ ), *coefficient convection* ( $K_c$ ) dan *solar heat gain* ( $q_s$ ) masing-masing ditunjukkan oleh gambar 2,3,4 dan 5. Suhu awal semua saluran diasumsikan sama, yaitu  $40^\circ\text{C}$ . Suhu maksimal saluran diasumsikan  $85^\circ\text{C}$  [1].



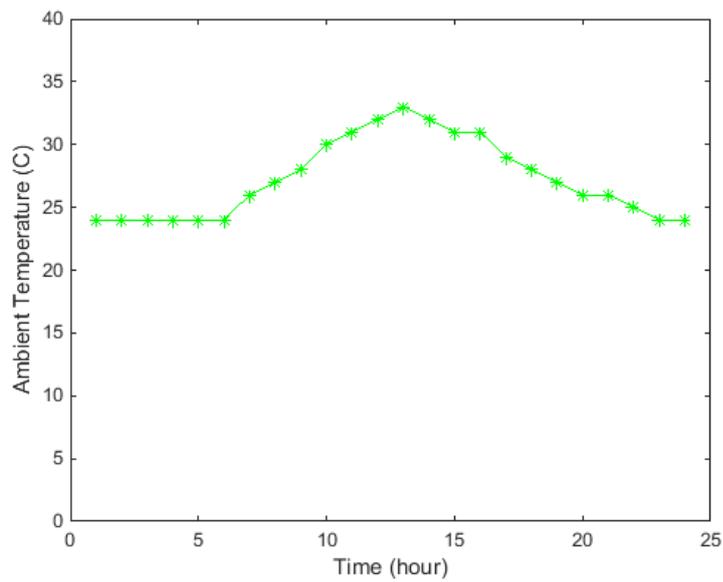
Gambar 4.1 SLD sistem IEEE 9 bus

Tabel 4.1 Data pembangkit sistem IEEE 9 bus

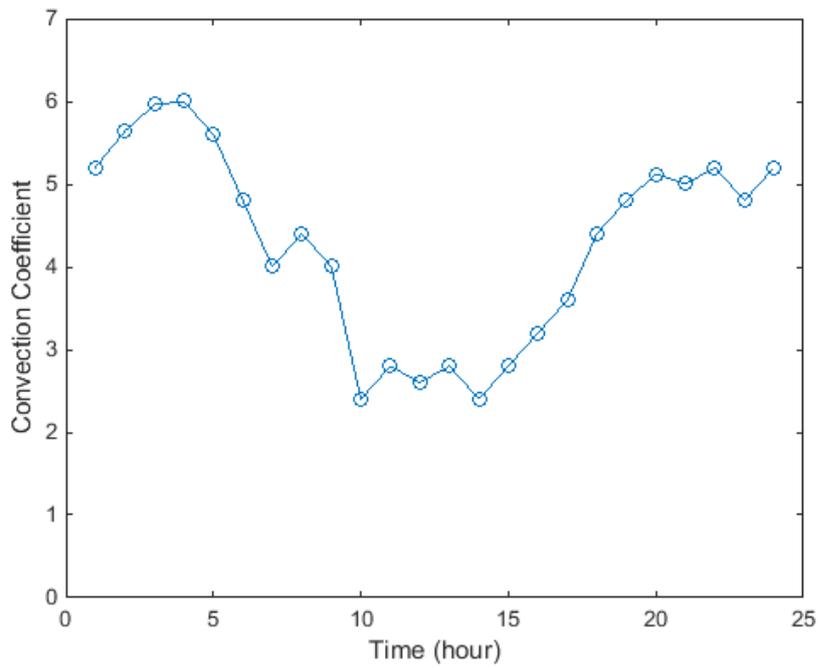
Unit	Bus	$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)	Koefisien biaya			Ramp Rate (MW)
				a	b	c	
P1	1	10	250	0.110	5.0	150	37.5
P2	2	10	300	0.085	1.2	600	45.0
P3	3	10	270	0.123	1.0	335	40.5



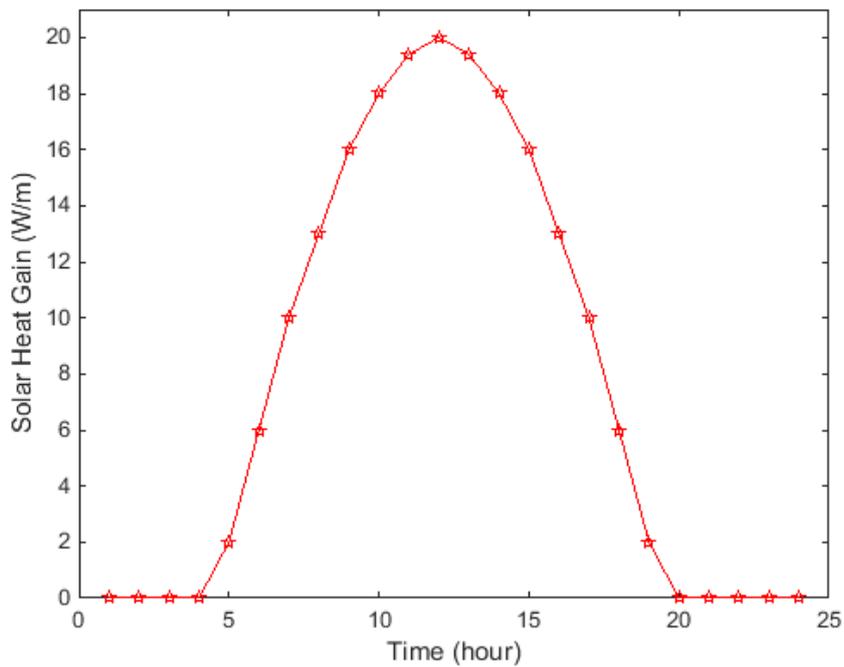
Gambar 4.2 Profil beban



Gambar 4.3 Daily ambient temperature



Gambar 4.4 *Daily convection coefficient*

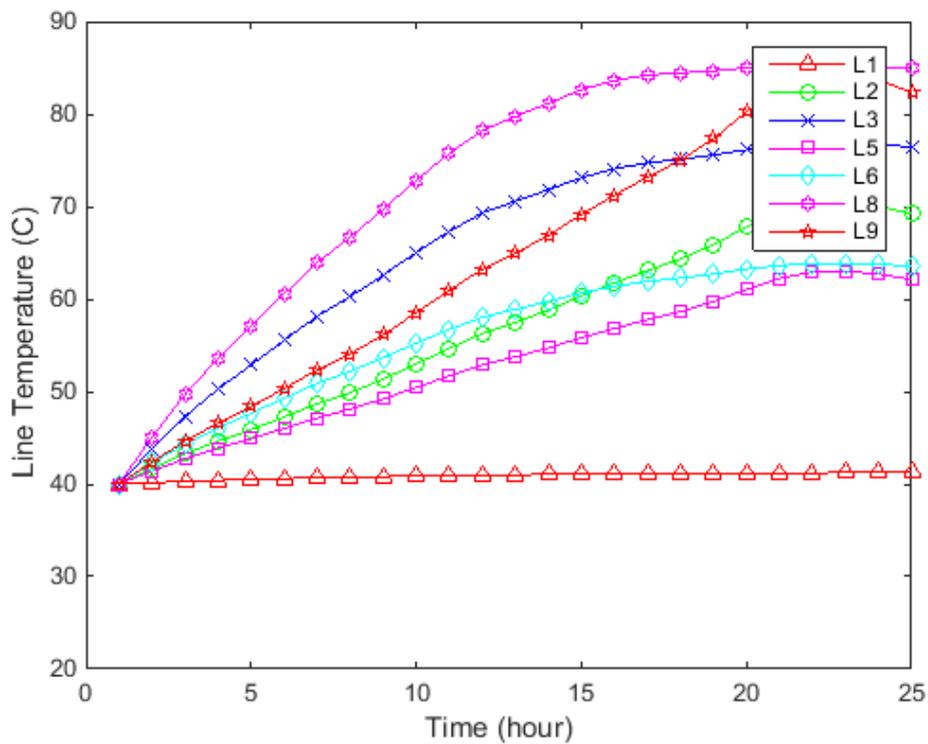


Gambar 4.5 *Daily solar heat gain*

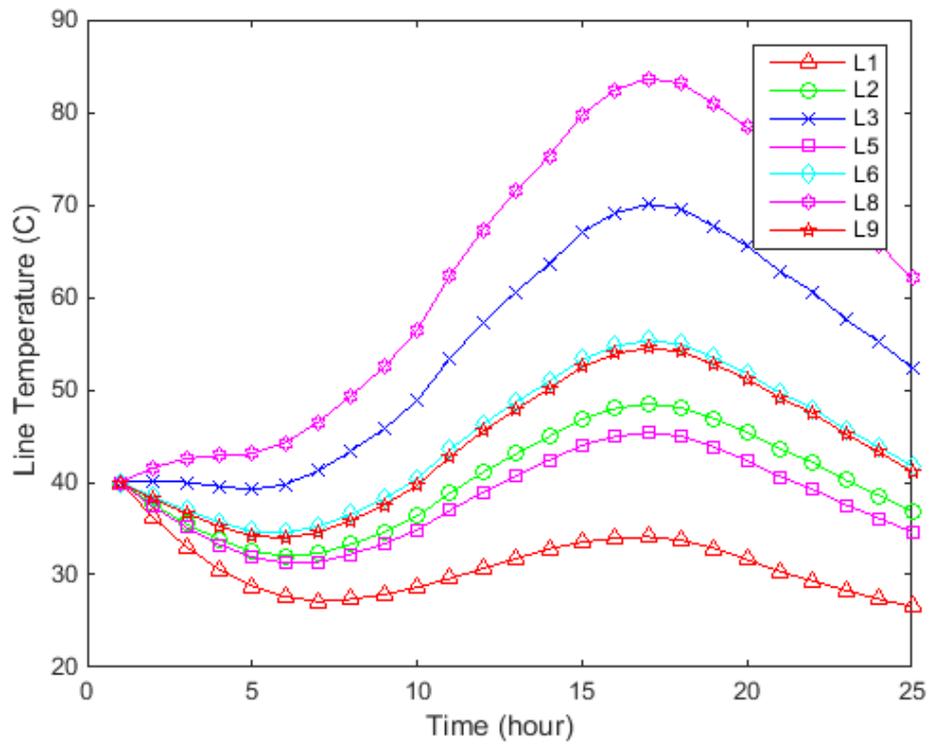
Gambar 4.6 menunjukkan perubahan suhu saluran dengan metode *static line rating*. Metode ini dilakukan dengan data kondisi cuaca yang konstan, pada kondisi terburuknya. Yaitu dengan suhu lingkungan 33°C, *convection coefficient*

2,4 dan solar heat gain 20 W/m. Saluran empat (L4) dan saluran tujuh (L7) tidak disertakan dalam hasil grafik karena kedua saluran tersebut profil perubahan suhunya sama dengan saluran satu (L1). Karena ketiga saluran tersebut sesuai data sistem IEEE 9 bus tidak memiliki nilai R (resistansi), sehingga profil perubahan suhunya hanya dipengaruhi oleh kondisi cuaca tetapi tidak dipengaruhi oleh rugi-rugi saluran. Dan karena ketiganya mempunyai profil cuaca yang sama, sehingga profil perubahan suhunya selama 24 jam juga sama.

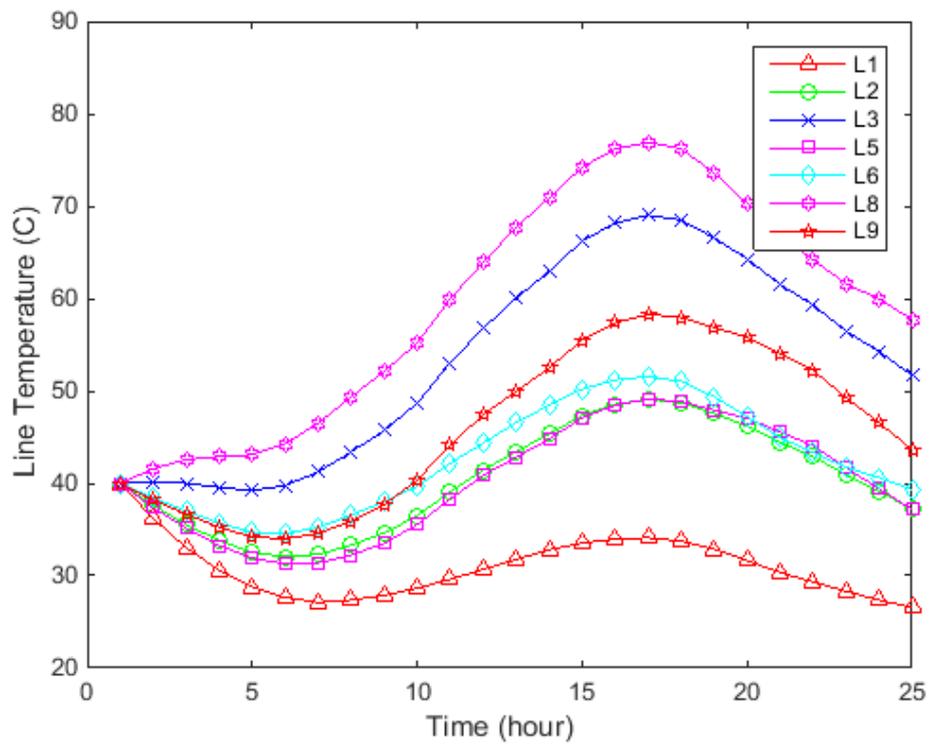
Gambar 4.7 menunjukkan perubahan suhu saluran dengan metode *dynamic line rating*. Jika dibandingkan dengan gambar 4.6, maka bisa dilihat bahwa pada metode DLR memberikan perubahan suhu yang lebih rendah dan fluktuatif sesuai dengan kondisi cuaca yang berubah-ubah. Sedangkan pada metode SLR, suhu saluran nilainya terus menerus naik, sampai kemudian terbatas dengan nilai maksimal salurannya, seperti terjadi pada saluran delapan (L8). Pembatasan ini kemudian akan menyebabkan sistem tidak dalam kondisi optimal ekonomisnya atau sistem menjadi tidak konvergen.



Gambar 4.6 Evolusi perubahan suhu saluran metode *static line rating*



Gambar 4.7 Evolusi perubahan suhu saluran metode *dynamic line rating*



Gambar 4.8 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya

Tabel 4.2 *Objective function value* sistem IEEE 9 Bus

Metode	Biaya total pembangkitan 24 jam (\$)
SLR	167470
DLR	165140
Rating daya saluran	165860

Gambar 4.8 menunjukkan perubahan suhu saluran dengan metode rating daya saluran. Metode ini berbeda dengan SLR dan DLR yakni pada metode ini tidak menggunakan batasan suhu maksimal saluran, namun batasan saluran menggunakan batasan daya (MW). Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa grafik perubahan suhu saluran dengan metode rating daya saluran mirip dengan metode DLR, namun nilainya lebih rendah, yang cukup jelas ditunjukkan dengan grafik saluran delapan (L8). Pada metode DLR, suhu saluran delapan (L8) maksimal melebihi 80°C, sedangkan pada metode rating daya saluran suhu maksimalnya tidak melebihi 80°C.

Tabel 4.2 menunjukkan masing-masing total biaya pembangkitan dari ketiga metode. Dari tabel tersebut, menunjukkan bahwa metode DLR memiliki nilai ekonomis lebih baik dibandingkan dengan metode SLR dan rating daya saluran. Hasil tersebut selaras dengan grafik perubahan suhu masing-masing metode. Pada metode SLR suhu saluran terlalu tinggi, sehingga terbatas dengan batas suhu maksimal saluran. Sehingga hal tersebut membuat saluran tidak bisa dimaksimalkan seperti pada kondisi DLR, yang kemudian mengurangi nilai ekonomis metode SLR. Pada metode rating daya saluran, suhu saluran terlalu rendah, karena terbatas dengan kapasitas maksimal daya saluran. Padahal disisi lain suhu saluran tersebut sebenarnya masih bisa naik sesuai dengan persamaan *heat balance* dan batas suhu maksimal saluran. Pembatasan tersebut kemudian menjadikan nilai ekonomis metode rating daya saluran lebih rendah dibanding metode DLR.

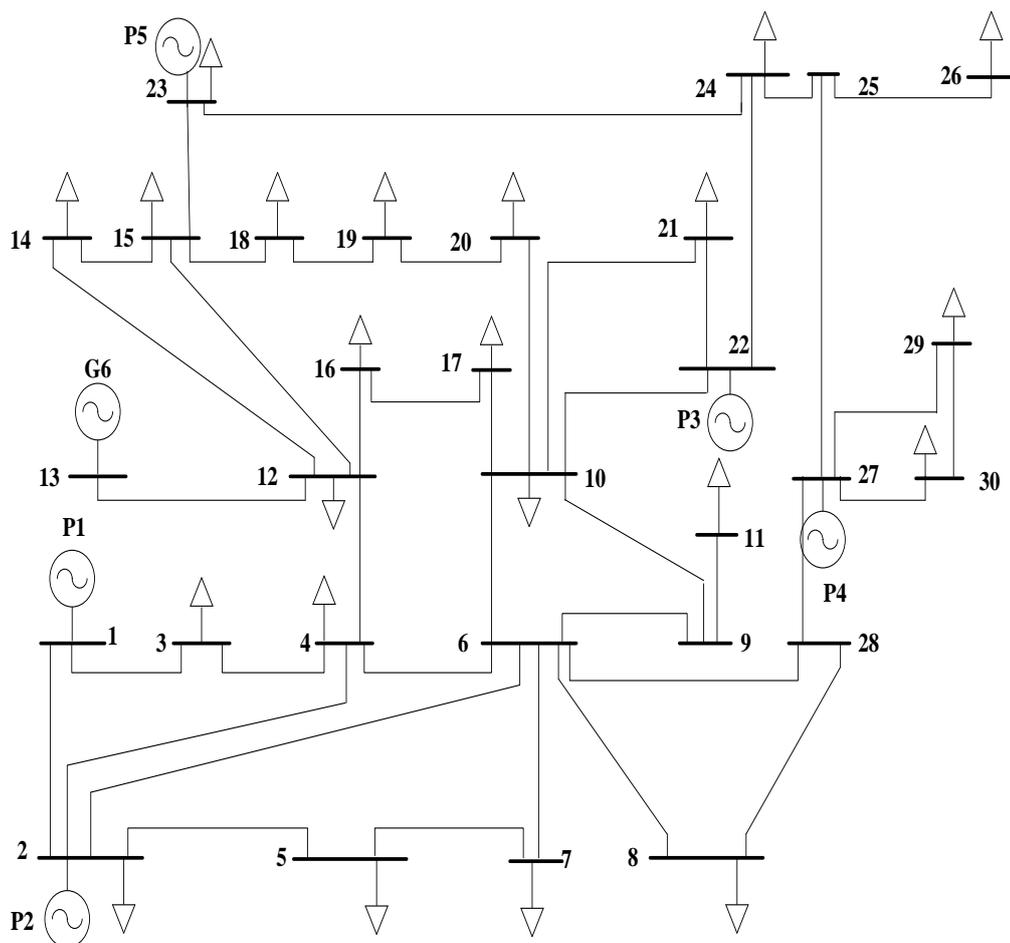
#### 4.2 Studi Kasus IEEE 30 Bus

Gambar 4.9 menunjukkan SLD sistem IEEE 30 bus. Simulasi sistem 30 bus dilakukan dalam dua studi kasus, yaitu periode 5 jam dan periode 24 jam.

Dengan perbedaan, pada studi kasus periode 24 jam dilakukan modifikasi pada data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus dan menggunakan suhu awal saluran yang berbeda.

#### 4.2.1 Sistem IEEE 30 Bus Periode Waktu 5 Jam

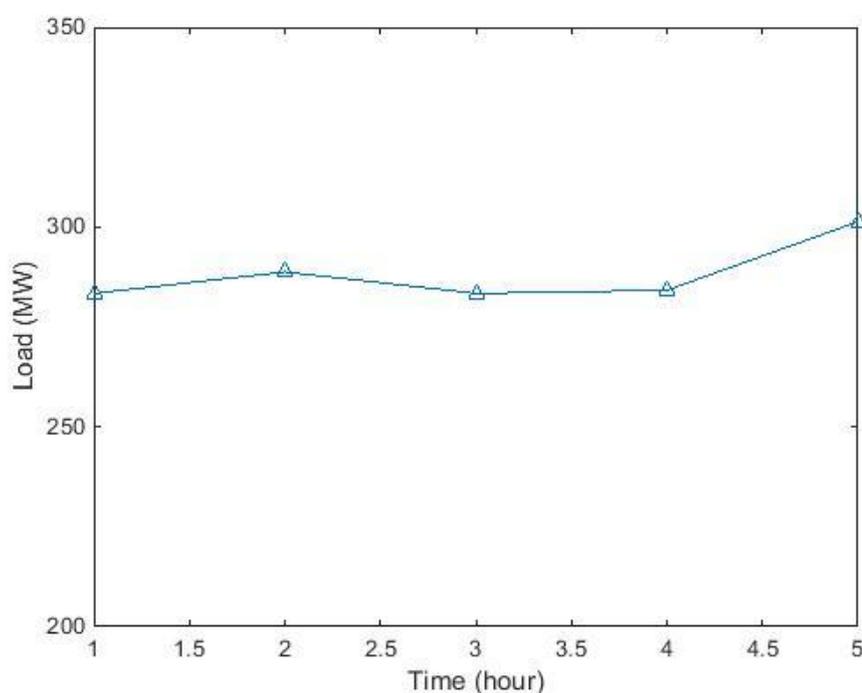
Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus ditunjukkan oleh tabel 4.3. Profil beban periode 5 jam sesuai ditunjukkan oleh gambar 4.10 Sistem disimulasikan sama dengan IEEE 9 bus yaitu dilakukan dalam tiga metode rating saluran yang berbeda, *static line rating*, *dynamic line rating*, lalu yang terakhir dengan rating daya. Data parameter untuk persamaan keseimbangan panas juga sama dengan IEEE 9 bus namun hanya mengambil jam ke-11 sampai ke-15 karena simulasi dilakukan dalam periode 5 jam. Suhu awal semua saluran diasumsikan sama, yaitu 55°C. Suhu maksimal saluran adalah 85°C.



Gambar 4.9 Sistem IEEE 30 bus

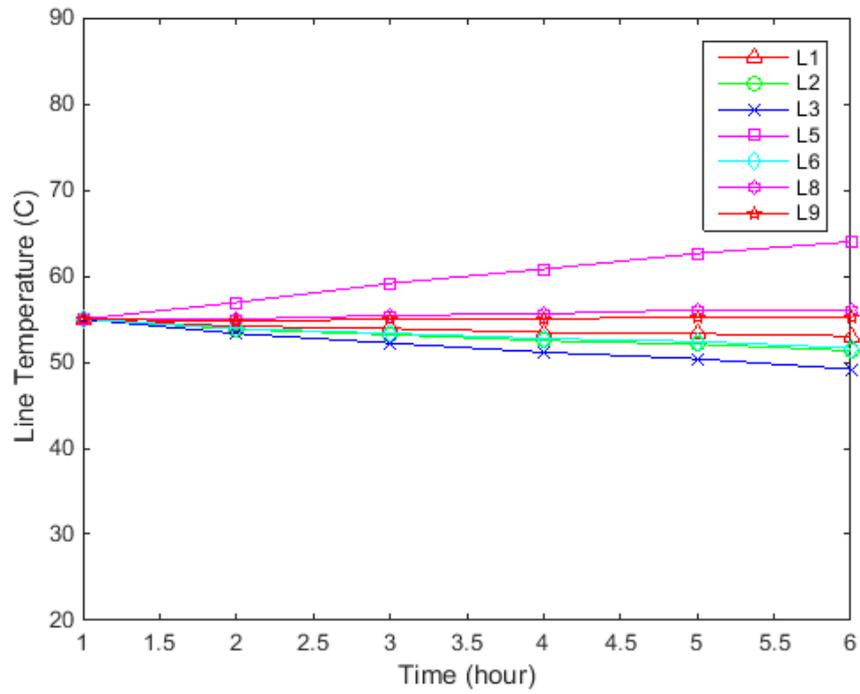
Tabel 4.3 Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus

Unit	Bus	$P_{min}$ (MW)	$P_{max}$ (MW)	Koefisien biaya			Ramp Rate (MW)
				a	b	c	
P1	1	0	80	0.02000	2.00	0	12.00
P2	2	0	80	0.01750	1.75	0	12.00
P3	22	0	50	0.06250	1.00	0	7.50
P4	27	0	55	0.00834	3.25	0	8.25
P5	23	0	30	0.02500	3.00	0	4.50
P6	13	0	40	0.02500	3.00	0	6.00

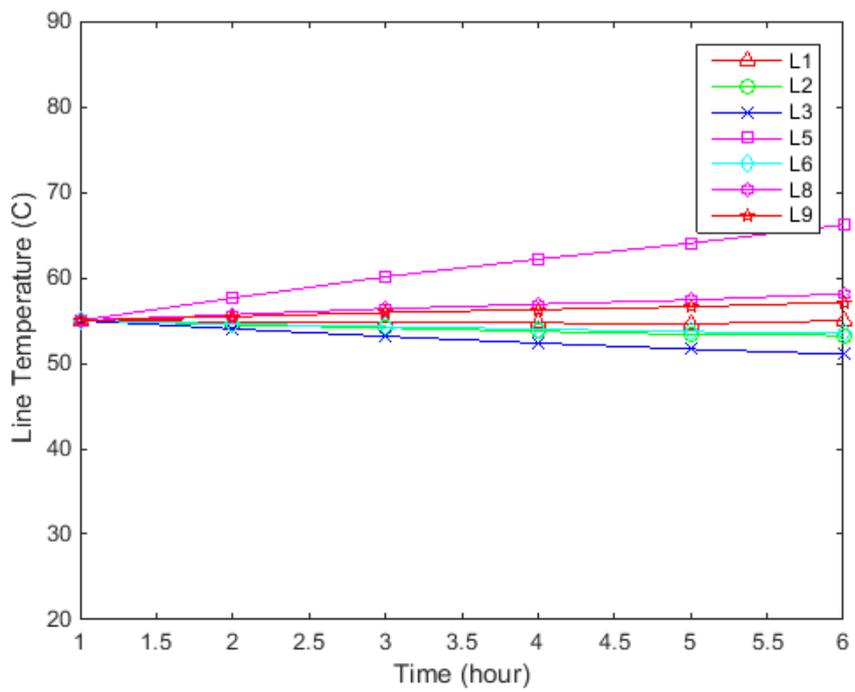


Gambar 4.10 Profil pembebanan sistem IEEE 30 bus

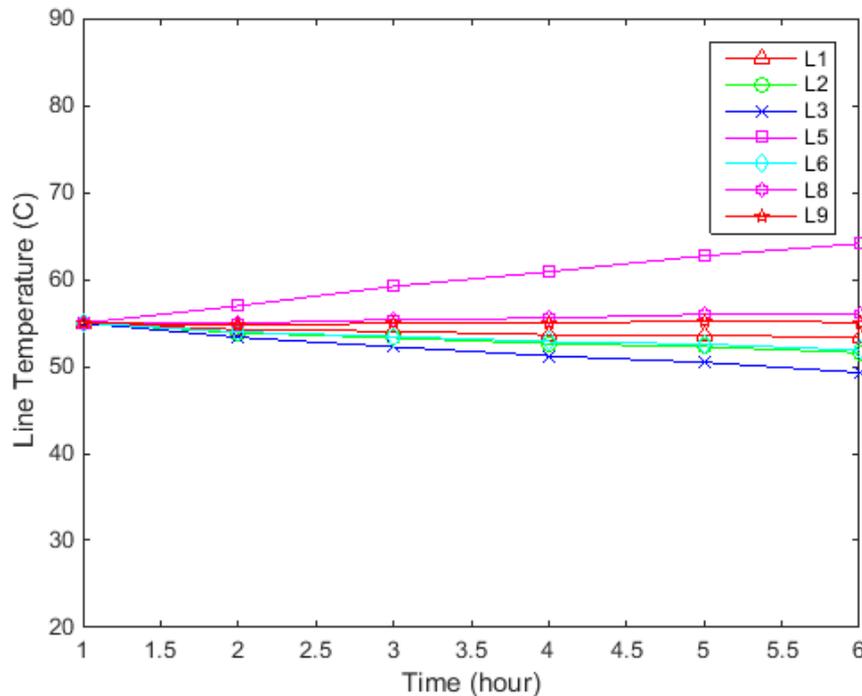
Berdasarkan hasil grafik evolusi perubahan suhu saluran dari ketiga metode sesuai gambar 4.11, gambar 4.12 dan gambar 4.13. Menunjukkan hasil yang mirip dengan studi kasus pada sistem IEEE 9 bus. Dimana metode SLR memberikan perubahan suhu saluran yang lebih tinggi dibandingkan metode DLR. Dan terlihat bahwa evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya mirip dengan metode DLR. Dari tujuh saluran yang diplot grafiknya, terlihat bahwa suhu saluran ke-5 mengalami kenaikan suhu yang terbesar. Hal itu dikarenakan pada saluran ke-5 memiliki nilai rugi-rugi daya terbesar dibandingkan enam saluran lainnya. Data selengkapnya rugi-rugi transmisi dapat dilihat di lampiran.



Gambar 4.11 Evolusi perubahan suhu saluran metode DLR sistem 30 bus



Gambar 4.12 Evolusi perubahan suhu saluran metode SLR sistem 30 bus



Gambar 4.13 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya

Tabel 4.4 *Objective function value* sistem IEEE 30 bus

Metode	Biaya total pembangkitan sistem 30 bus (\$)
SLR	5006.1
DLR	5006.1
Rating daya saluran	5011.7

Tabel 4.4 menunjukkan masing-masing total biaya pembangkitan dari ketiga metode menggunakan sistem IEEE 30 bus. Dilihat dari tabel tersebut, menunjukkan hasil yang sedikit beda dengan simulasi sistem 9 bus. Dari tabel tersebut, menunjukkan bahwa metode DLR memiliki nilai ekonomis lebih baik dibandingkan dengan metode rating daya saluran. Namun jika dibandingkan dengan metode SLR nilai ekonomisnya sama. Nilai ekonomis DLR yang lebih baik dari metode rating daya pada sistem 30 bus ini memiliki alasan yang sama sesuai dengan sistem 9 bus. Sementara alasan kenapa nilai fungsi objektif metode SLR dan DLR pada sistem ini sama adalah karena walaupun metode SLR perubahan suhu salurannya besar, namun rating suhunya masih jauh dengan nilai maksimal suhu saluran sehingga saluran tetap bisa dimanfaatkan sebaik metode DLR.

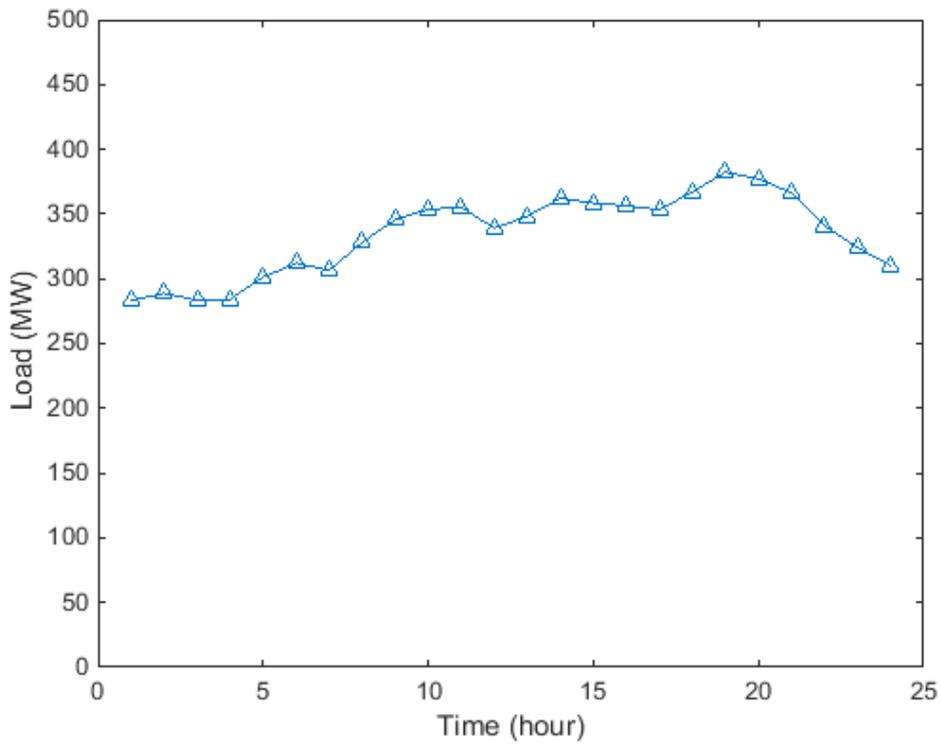
#### 4.2.2 Sistem IEEE 30 Bus Periode Waktu 24 Jam

Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus modifikasi ditunjukkan oleh tabel 4.5. Profil beban periode 24 jam sesuai ditunjukkan oleh gambar 4.14. Sistem disimulasikan sama dengan IEEE 9 bus yaitu dilakukan dalam tiga metode rating saluran yang berbeda, *static line rating*, *dynamic line rating*, lalu yang terakhir dengan rating daya. Data parameter untuk persamaan keseimbangan panas juga sama dengan IEEE 9 bus. Suhu awal semua saluran diasumsikan sama, yaitu 40°C. Suhu maksimal saluran adalah 85°C.

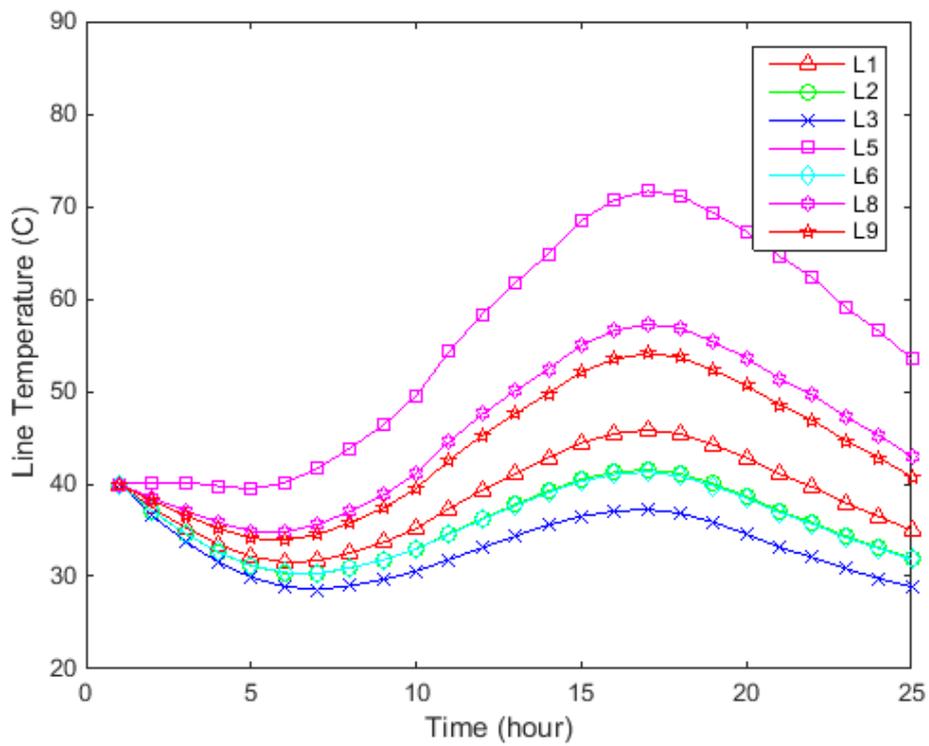
Berdasarkan hasil grafik evolusi perubahan suhu saluran dari ketiga metode sesuai gambar 4.15, gambar 4.16 dan gambar 4.17, menunjukkan hasil yang mirip dengan studi kasus pada sistem IEEE 9 bus. Dimana metode SLR memberikan perubahan suhu saluran yang lebih tinggi dibandingkan metode DLR. Dan terlihat bahwa evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya mirip dengan metode DLR. Saluran ke-5 pada metode SLR suhu akhirnya mencapai suhu maksimal saluran yaitu 85°C. Terdapat saluran yang mencapai nilai maksimal ini tidak terjadi pada studi kasus dengan periode 5 jam.

Tabel 4.5 Data parameter pembangkit sistem IEEE 30 bus modifikasi

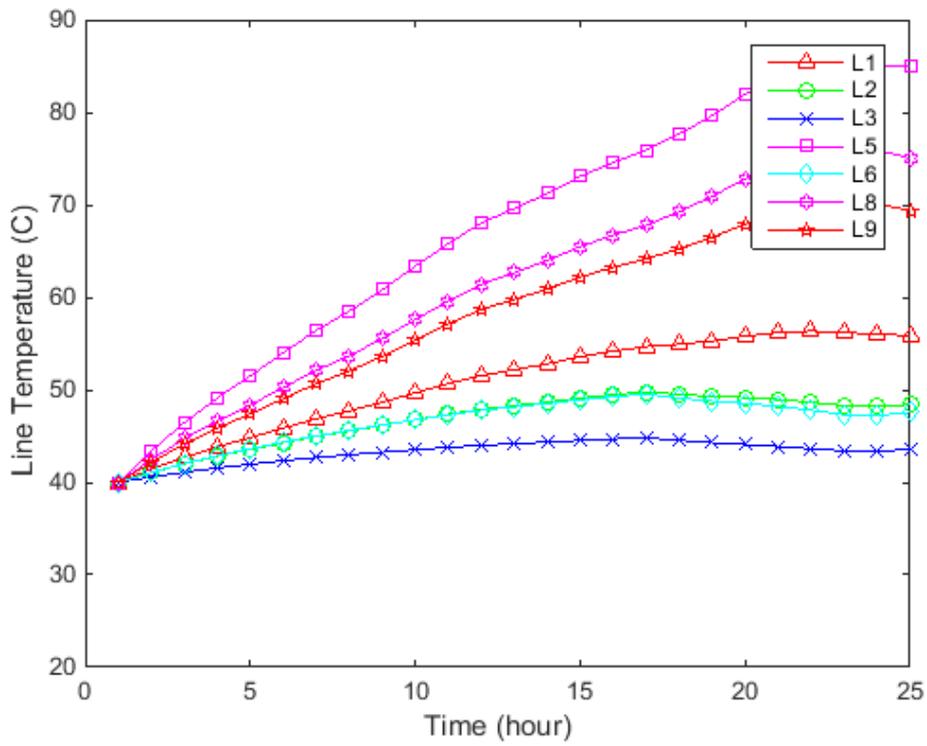
Unit	Bus	P <sub>min</sub> (MW)	P <sub>max</sub> (MW)	Koefisien biaya			Ramp Rate (MW)
				a	b	c	
P1	1	0	100	0.02000	2.00	0	12.00
P2	2	0	120	0.01750	1.75	0	12.00
P3	22	0	50	0.06250	1.00	0	7.50
P4	27	0	90	0.00834	3.25	0	8.25
P5	23	0	50	0.02500	3.00	0	4.50
P6	13	0	70	0.02500	3.00	0	6.00



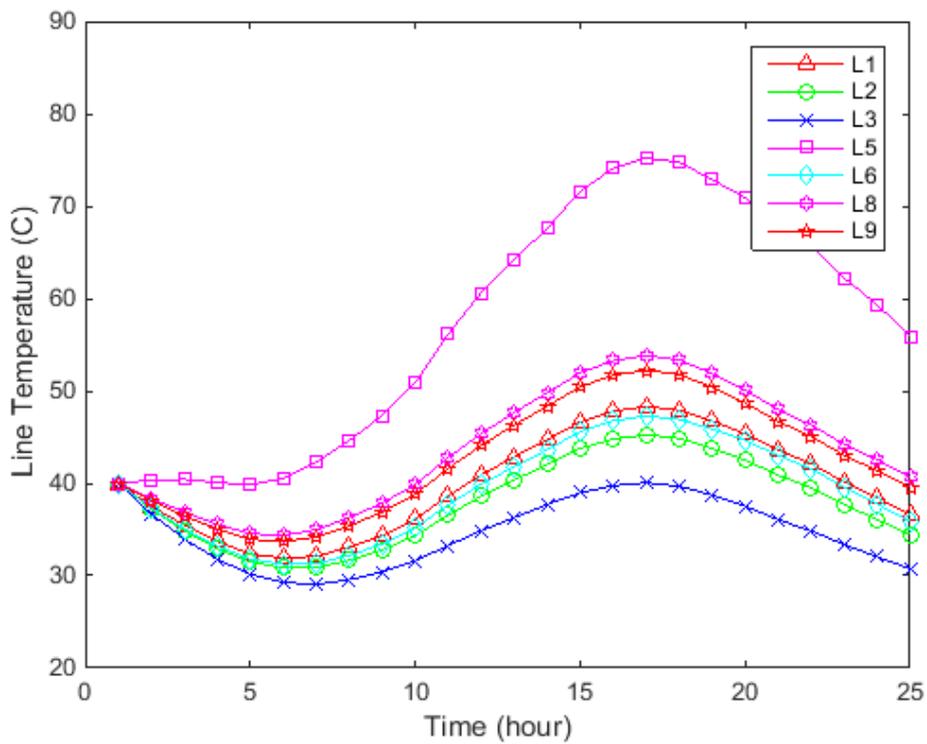
Gambar 4.14 Profil pembebanan sistem IEEE 30 bus



Gambar 4.15 Evolusi perubahan suhu saluran metode DLR periode 24 jam



Gambar 4.16 Evolusi perubahan suhu saluran metode SLR periode 24 jam



Gambar 4.16 Evolusi perubahan suhu saluran metode rating daya

Tabel 4.6 *Objective function value* sistem IEEE 30 bus periode 24 jam

<b>Metode</b>	<b>Biaya total pembangkitan sistem 30 bus (\$)</b>
SLR	29423.2
DLR	29553.1
Rating daya saluran	29856.6

Tabel 4.6 menunjukkan masing-masing total biaya pembangkitan dari ketiga metode menggunakan sistem IEEE 30 bus studi kasus periode waktu 24 jam. Dari tabel tersebut, menunjukkan hasil yang sedikit beda dengan simulasi sistem 30 bus studi kasus periode waktu 5 jam. Dari tabel tersebut, menunjukkan bahwa metode DLR mempunyai nilai ekonomis yang lebih baik dibandingkan kedua metode lainnya. Penyebab hal tersebut sama dengan studi kasus pada sistem IEEE 9 bus. Yakni pada metode SLR suhu saluran terlalu tinggi, sehingga terbatas dengan batas suhu maksimal saluran. Suhu maksimal saluran mencapai nilai batasan maksimal suhu saluran, yang terjadi pada saluran ke-5 (L5), sehingga hal tersebut membuat saluran tidak bisa dimaksimalkan seperti pada kondisi DLR, yang kemudian mengurangi nilai ekonomis metode SLR. Dimana hal ini tidak terjadi pada studi kasus periode 5 jam, karena tidak adanya saluran yang mencapai batasan suhu maksimal saluran. Yang menyebabkan tidak adanya perbedaan nilai fungsi objektif antara metode SLR dan DLR.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis penelitian DCOPF mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dengan *dynamic line rating* berdasarkan keseimbangan panas didapatkan poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *quadratically constrained quadratic program* yang diusulkan terbukti bisa menyelesaikan permasalahan DCOPF dengan batasan persamaan *heat balance* dan mempertimbangkan rugi-rugi transmisi.
2. Dari hasil simulasi terbukti bahwa metode DLR mampu memaksimalkan saluran transmisi lebih baik dibandingkan metode SLR dan rating daya saluran dengan tetap menjaga suhu saluran tidak melebihi batas suhu maksimalnya.
3. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa biaya total pembangkitan pada sistem IEEE 9 bus selama 24 jam dengan metode DLR lebih ekonomis dibandingkan metode lainnya, 1.391% lebih murah dibanding metode SLR, dan 0.434% lebih murah dibanding metode rating daya saluran.
4. Hasil simulasi pada sistem IEEE 30 bus periode 24 jam juga menunjukkan hasil yang sama, yaitu metode DLR lebih ekonomis dibandingkan metode lainnya, 0.439% lebih murah dibanding metode SLR, dan 1.451% lebih murah dibanding metode rating daya saluran.

#### **5.2 Saran**

Untuk pengembangan penelitian lebih lanjut, terdapat beberapa hal yang disarankan penulis terkait penelitian ini:

1. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan pada bidang *unit commitment*.
2. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan *renewable energy generator* dan *energy storage*.
3. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan memperhitungkan transfer panas radiasi pada persamaan keseimbangan panas ke dalam permasalahan DCOPF.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Nick, O. A. Mousavi, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Integration of Transmission Lines Dynamic Thermal rating into real-time Optimal dispatching of power systems," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, vol. 2015-Novem, pp. 0–5, 2015, doi: 10.1109/UPEC.2015.7339943.
- [2] M. A. Bucher and G. Andersson, "Robust Corrective Control Measures in Power Systems with Dynamic Line Rating," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2034–2043, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2449753.
- [3] H. Zhang, M. Du, Q. Zhao, L. Xue, Z. Wei, and Q. Zhang, "Security constrained economic dispatch with dynamic thermal rating technology integration," *2016 IEEE Int. Conf. Power Renew. Energy, ICPRE 2016*, pp. 709–713, 2017, doi: 10.1109/ICPRE.2016.7871172.
- [4] M. Nick, O. Alizadeh-Mousavi, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Security Constrained Unit Commitment with Dynamic Thermal Line Rating," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2014–2025, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2445826.
- [5] C. Wang, R. Gao, F. Qiu, J. Wang, and L. Xin, "Risk-based distributionally robust optimal power flow with dynamic line rating," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6074–6086, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2844356.
- [6] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors IEEE Power and Energy Society*, vol. 738, no. January. 2007.
- [7] J. Cao, W. Du, and H. F. Wang, "Weather-Based Optimal Power Flow with Wind Farms Integration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3073–3081, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2488662.
- [8] S. Triwijaya, N. Sugiantoro, Y. Prasetyo, Firdaus, R. S. Wibowo, and O. Penangsang, "Security constrained optimal power flow considering dynamic line rating," in *Proceedings of 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Smart Technology for Better Society, ICITEE 2018*, 2018, pp. 46–51, doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534755.
- [9] R. S. Wibowo, Nursidi, H. Satriyadi, P. Uman, A. Soeprijanto, and O. Penangsang, "Dynamic DC optimal power flow using quadratic programming," *Proc. - 2013 Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng. "Intelligent Green Technol. Sustain. Dev. ICITEE 2013*, no. 5, pp. 360–364, 2013, doi: 10.1109/ICITEED.2013.6676268.
- [10] R. S. Wibowo, R. Maulana, A. Taradini, F. A. Pamuji, A. Soeprijanto, and O. Penangsang, "Quadratic programming approach for security constrained optimal power flow," *Proc. - 2015 7th Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng.*

*Envisioning Trend Comput. Inf. Eng. ICITEE 2015*, pp. 200–203, 2015, doi: 10.1109/ICITEED.2015.7408941.

- [11] M. X. Wang and X. S. Han, “Study on electro-thermal coupling optimal power flow model and its simplification,” *IEEE PES Gen. Meet. PES 2010*, pp. 1–6, 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589644.
- [12] H. Zhong, Q. Xia, Y. Wang, and C. Kang, “Dynamic economic dispatch considering transmission losses using quadratically constrained quadratic program method,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2232–2241, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2254503.

## LAMPIRAN

**Tabel 1.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode *dynamic line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Periode					
	i	j	1	2	3	4	5	6
1	1	2	55.00	54.15	53.91	53.46	53.30	53.03
2	1	3	55.00	53.81	53.19	52.49	52.09	51.33
3	2	4	55.00	53.32	52.21	51.14	50.38	49.18
4	3	4	55.00	52.96	51.54	50.21	49.20	47.8
5	2	5	55.00	56.93	59.15	60.81	62.63	63.98
6	2	6	55.00	53.91	53.35	52.73	52.40	51.63
7	4	6	55.00	53.29	52.19	51.10	50.33	49.20
8	5	7	55.00	54.99	55.43	55.62	56.07	56.09
9	6	7	55.00	54.76	54.99	55.00	55.28	55.13

**Tabel 2.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode *dynamic line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)				
			Periode				
	i	j	1	2	3	4	5
1	1	2	0.2948	0.3243	0.2948	0.2963	0.4019
2	1	3	0.2205	0.2321	0.2205	0.2199	0.2629
3	2	4	0.1121	0.1130	0.1121	0.1110	0.1163
4	3	4	0.0346	0.0365	0.0346	0.0345	0.0415
5	2	5	1.8023	1.8697	1.8023	1.8102	2.0340
6	2	6	0.2418	0.2489	0.2418	0.2412	0.2676
7	4	6	0.1064	0.1137	0.1064	0.1075	0.1318
8	5	7	0.4768	0.4966	0.4768	0.4806	0.5432
9	6	7	0.8521	0.8868	0.8521	0.8581	0.9693

**Tabel 3.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode *static line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Periode					
	i	j	1	2	3	4	5	6
1	1	2	55.00	54.85	54.85	54.71	54.6	54.98
2	1	3	55.00	54.51	54.12	53.73	53.37	53.25
3	2	4	55.00	54.01	53.14	52.35	51.65	51.05
4	3	4	55.00	53.66	52.47	51.40	50.45	49.64
5	2	5	55.00	57.63	60.12	62.18	64.03	66.20
6	2	6	55.00	54.61	54.29	53.97	53.69	53.55
7	4	6	55.00	53.98	53.12	52.31	51.59	51.07
8	5	7	55.00	55.68	56.38	56.91	57.40	58.12
9	6	7	55.00	55.45	55.93	56.28	56.6	57.14

**Tabel 4.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode *static line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)				
			Periode				
	i	j	1	2	3	4	5
1	1	2	0.2949	0.3243	0.2948	0.2963	0.4019
2	1	3	0.2205	0.2321	0.2205	0.2199	0.2629
3	2	4	0.1121	0.1130	0.1121	0.1110	0.1163
4	3	4	0.0346	0.0365	0.0346	0.0345	0.0415
5	2	5	1.8023	1.8697	1.8023	1.8102	2.0340
6	2	6	0.2419	0.2489	0.2418	0.2412	0.2676
7	4	6	0.1064	0.1137	0.1063	0.1075	0.1318
8	5	7	0.4768	0.4965	0.4768	0.4806	0.5432
9	6	7	0.8521	0.8867	0.8521	0.8581	0.9693

**Tabel 5.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode rating daya

Saluran	Bus i to bus j		Periode					
	i	j	1	2	3	4	5	6
1	1	2	55.00	54.23	54.04	53.64	53.54	53.38
2	1	3	55.00	53.86	53.28	52.62	52.26	51.58
3	2	4	55.00	53.34	52.25	51.20	50.47	49.3
4	3	4	55.00	52.97	51.56	50.23	49.23	47.85
5	2	5	55.00	56.96	59.20	60.88	62.72	64.11
6	2	6	55.00	53.96	53.44	52.86	52.57	51.85
7	4	6	55.00	53.31	52.22	51.15	50.39	49.27
8	5	7	55.00	54.96	55.39	55.56	55.98	55.96
9	6	7	55.00	54.74	54.96	54.96	55.23	55.06

**Tabel 6.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 5 jam studi kasus metode rating daya

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)				
			Periode				
	i	j	1	2	3	4	5
1	1	2	0.3103	0.3377	0.3103	0.3143	0.4322
2	1	3	0.2314	0.2411	0.2314	0.2328	0.2840
3	2	4	0.1176	0.1173	0.1176	0.1175	0.1267
4	3	4	0.0366	0.0381	0.0366	0.0368	0.0453
5	2	5	1.8146	1.8803	1.8146	1.8242	2.0545
6	2	6	0.2527	0.2582	0.2527	0.2535	0.2856
7	4	6	0.1104	0.1178	0.1104	0.1115	0.1359
8	5	7	0.4709	0.4915	0.4709	0.4739	0.5334
9	6	7	0.8457	0.8812	0.8457	0.8509	0.9586

**Tabel 7.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 24 jam studi kasus metode *dynamic line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	40.00	37.45	35.28	33.47	32.13	31.55	31.67	32.55	33.68
2	1	3	40.00	37.08	34.62	32.62	31.14	30.37	30.25	30.91	31.79
3	2	4	40.00	36.61	33.79	31.55	29.90	28.92	28.57	29.00	29.66
4	3	4	40.00	36.32	33.28	30.89	29.13	28.05	27.59	27.91	28.49
5	2	5	40.00	40.20	40.17	39.78	39.47	40.09	41.64	43.87	46.35
6	2	6	40.00	37.10	34.66	32.67	31.21	30.42	30.29	30.95	31.80
7	4	6	40.00	36.58	33.74	31.49	29.83	28.86	28.53	28.98	29.68
8	5	7	40.00	38.47	37.13	35.84	34.89	34.82	35.58	37.03	38.81
9	6	7	40.00	38.19	36.62	35.19	34.13	33.92	34.50	35.79	37.39

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	2	33.68	35.19	37.34	39.33	41.13	42.82	44.46	45.43	45.83
2	1	3	31.79	32.98	34.66	36.27	37.8	39.23	40.52	41.25	41.54
3	2	4	29.66	30.57	31.83	33.10	34.36	35.56	36.52	37.05	37.25
4	3	4	28.49	29.31	30.39	31.54	32.69	33.80	34.62	35.07	35.25
5	2	5	46.35	49.55	54.33	58.36	61.76	64.87	68.50	70.71	71.66
6	2	6	31.80	32.94	34.58	36.14	37.65	39.06	40.32	41.03	41.30
7	4	6	29.68	30.65	31.97	33.31	34.60	35.84	36.86	37.43	37.66
8	5	7	38.81	41.17	44.57	47.55	50.07	52.44	55.00	56.57	57.27
9	6	7	37.39	39.52	42.58	45.28	47.60	49.78	52.09	53.49	54.11

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	2	45.83	45.40	44.23	42.82	41.08	39.68	37.95	36.49	35.00
2	1	3	41.54	41.11	40.03	38.69	37.09	35.83	34.37	33.15	31.97
3	2	4	37.25	36.83	35.86	34.60	33.15	32.04	30.84	29.80	28.86
4	3	4	35.25	34.86	33.94	32.73	31.36	30.32	29.22	28.24	27.38
5	2	5	71.66	71.15	69.30	67.29	64.61	62.32	59.09	56.54	53.53
6	2	6	41.30	40.85	39.78	38.48	36.91	35.65	34.20	33.00	31.85
7	4	6	37.66	37.25	36.30	35.08	33.66	32.53	31.27	30.16	29.15
8	5	7	57.27	56.85	55.37	53.61	51.41	49.64	47.25	45.26	43.01
9	6	7	54.11	53.69	52.29	50.62	48.56	46.89	44.68	42.83	40.80

**Tabel 8.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 8 jam studi kasus metode *dynamic line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	0.2764	0.2858	0.2763	0.2777	0.3086	0.3289	0.3181	0.3605
2	1	3	0.1959	0.2002	0.1958	0.1965	0.2107	0.2200	0.2150	0.2342
3	2	4	0.0939	0.0948	0.0939	0.0941	0.0969	0.0987	0.0978	0.1015
4	3	4	0.0303	0.0309	0.0303	0.0304	0.0324	0.0337	0.0330	0.0357
5	2	5	1.7539	1.8164	1.7539	1.7631	1.9665	2.1003	2.0290	2.3084
6	2	6	0.2013	0.2045	0.2013	0.2018	0.2122	0.2189	0.2153	0.2293
7	4	6	0.0875	0.0900	0.0875	0.0879	0.0959	0.1012	0.0984	0.1094
8	5	7	0.5006	0.5228	0.5006	0.5038	0.5766	0.6249	0.5991	0.7005
9	6	7	0.8777	0.9150	0.8777	0.8831	1.0053	1.0862	1.0430	1.2129

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	2	0.3968	0.4137	0.4168	0.3831	0.4022	0.4370	0.4263	0.4206
2	1	3	0.2504	0.2579	0.2592	0.2443	0.2528	0.2723	0.2653	0.2616
3	2	4	0.1048	0.1062	0.1065	0.1035	0.1052	0.1122	0.1091	0.1074
4	3	4	0.0379	0.0389	0.0391	0.0371	0.0382	0.0411	0.0401	0.0395
5	2	5	2.5479	2.6601	2.6804	2.4576	2.5837	2.7970	2.7357	2.7030
6	2	6	0.2411	0.2465	0.2475	0.2366	0.2428	0.2624	0.2544	0.2501
7	4	6	0.1188	0.1232	0.1240	0.1153	0.1202	0.1330	0.1281	0.1256
8	5	7	0.7881	0.8294	0.8368	0.7550	0.8013	0.8675	0.8517	0.8432
9	6	7	1.3597	1.4288	1.4413	1.3042	1.3817	1.4971	1.4682	1.4527

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	2	0.4131	0.4512	0.4978	0.4820	0.4495	0.3866	0.3520	0.3255
2	1	3	0.2576	0.2816	0.3122	0.3018	0.2805	0.2459	0.2304	0.2184
3	2	4	0.1062	0.1163	0.1298	0.1252	0.1158	0.1039	0.1008	0.0984
4	3	4	0.0389	0.0426	0.0473	0.0457	0.0424	0.0373	0.0351	0.0335
5	2	5	2.6561	2.8782	3.1441	3.0541	2.8686	2.4810	2.2524	2.0778
6	2	6	0.2464	0.2732	0.3089	0.2967	0.2719	0.2378	0.2265	0.2178
7	4	6	0.1231	0.1394	0.1609	0.1536	0.1386	0.1162	0.1072	0.1003
8	5	7	0.8279	0.8885	0.9567	0.9337	0.8860	0.7636	0.6801	0.6168
9	6	7	1.4263	1.5354	1.6604	1.6181	1.5309	1.3186	1.1787	1.0726

**Tabel 9.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 24 jam studi kasus metode *static line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	40.00	41.41	42.71	43.83	44.82	45.85	46.86	47.71	48.66
2	1	3	40.00	41.04	41.99	42.82	43.55	44.28	44.96	45.55	46.15
3	2	4	40.00	40.58	41.09	41.55	41.96	42.33	42.68	42.98	43.26
4	3	4	40.00	40.29	40.54	40.77	40.97	41.16	41.33	41.48	41.63
5	2	5	40.00	43.36	46.46	49.11	51.49	53.98	56.43	58.49	60.83
6	2	6	40.00	41.07	42.03	42.88	43.63	44.35	45.02	45.60	46.18
7	4	6	40.00	40.55	41.05	41.48	41.87	42.25	42.61	42.92	43.25
8	5	7	40.00	42.44	44.71	46.63	48.36	50.23	52.11	53.67	55.52
9	6	7	40.00	42.16	44.16	45.86	47.39	49.02	50.66	52.03	53.63

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	2	48.66	49.67	50.65	51.54	52.17	52.82	53.56	54.17	54.68
2	1	3	46.15	46.77	47.35	47.88	48.28	48.67	49.11	49.47	49.78
3	2	4	43.26	43.53	43.77	43.99	44.17	44.34	44.53	44.68	44.80
4	3	4	41.63	41.77	41.90	42.02	42.11	42.20	42.29	42.37	42.44
5	2	5	60.83	63.36	65.81	68.03	69.60	71.23	73.06	74.59	75.88
6	2	6	46.18	46.76	47.29	47.77	48.14	48.51	48.92	49.25	49.53
7	4	6	43.25	43.58	43.90	44.18	44.40	44.61	44.86	45.06	45.23
8	5	7	55.52	57.57	59.59	61.41	62.66	63.99	65.47	66.72	67.79
9	6	7	53.63	55.39	57.12	58.68	59.76	60.9	62.18	63.25	64.17

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	2	54.68	54.92	55.27	55.80	56.18	56.34	56.20	55.99	55.87
2	1	3	49.78	49.51	49.29	49.16	48.96	48.66	48.26	48.17	48.42
3	2	4	44.80	44.54	44.29	44.08	43.86	43.63	43.39	43.35	43.58
4	3	4	42.44	42.41	42.38	42.37	42.34	42.3	42.24	42.24	42.29
5	2	5	75.88	77.65	79.64	81.96	83.76	84.88	85.00	85.00	84.96
6	2	6	49.53	49.12	48.77	48.52	48.21	47.79	47.31	47.21	47.56
7	4	6	45.23	45.29	45.42	45.63	45.78	45.83	45.74	45.67	45.65
8	5	7	67.79	69.25	70.92	72.79	74.42	75.73	76.33	75.98	75.00
9	6	7	64.17	65.23	66.47	67.91	69.12	70.04	70.37	70.08	69.38

**Tabel 10.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 24 jam studi kasus metode *static line rating*

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	0.2763	0.2858	0.2763	0.2777	0.3086	0.3289	0.3181	0.3605
2	1	3	0.1958	0.2002	0.1959	0.1965	0.2107	0.2199	0.2151	0.2342
3	2	4	0.0939	0.0948	0.0939	0.0941	0.0969	0.0987	0.0978	0.1016
4	3	4	0.0303	0.0309	0.0303	0.0304	0.0324	0.0337	0.0330	0.0357
5	2	5	1.7539	1.8164	1.7539	1.7631	1.9665	2.1003	2.0290	2.3084
6	2	6	0.2013	0.2045	0.2013	0.2018	0.2122	0.2189	0.2154	0.2293
7	4	6	0.0875	0.0900	0.0875	0.0879	0.0959	0.1012	0.0984	0.1094
8	5	7	0.5006	0.5228	0.5006	0.5038	0.5767	0.6249	0.5991	0.7005
9	6	7	0.8777	0.915	0.8777	0.8831	1.0053	1.0862	1.0430	1.2129

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	2	0.3967	0.4137	0.4168	0.3831	0.4022	0.4370	0.4263	0.4206
2	1	3	0.2503	0.2579	0.2592	0.2443	0.2528	0.2723	0.2653	0.2616
3	2	4	0.1047	0.1062	0.1065	0.1036	0.1052	0.1122	0.1091	0.1075
4	3	4	0.0379	0.0389	0.0391	0.0371	0.0382	0.0411	0.0401	0.0395
5	2	5	2.5479	2.6601	2.6805	2.4576	2.5837	2.7970	2.7357	2.7030
6	2	6	0.2411	0.2465	0.2475	0.2366	0.2428	0.2625	0.2544	0.2501
7	4	6	0.1188	0.1232	0.1240	0.1153	0.1202	0.1330	0.1281	0.1256
8	5	7	0.7881	0.8294	0.8368	0.7550	0.8013	0.8675	0.8517	0.8432
9	6	7	1.3597	1.4288	1.4413	1.3042	1.3817	1.4971	1.4682	1.4527

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	2	0.3715	0.4037	0.4497	0.4296	0.3921	0.3282	0.3124	0.3252
2	1	3	0.1435	0.1485	0.164	0.1438	0.1161	0.0894	0.1474	0.2178
3	2	4	0.0257	0.0236	0.0255	0.0174	0.0090	0.0046	0.0400	0.0980
4	3	4	0.0196	0.0201	0.0223	0.0191	0.0149	0.0112	0.0210	0.0334
5	2	5	2.4299	2.6137	2.8502	2.7347	2.5269	2.1424	2.0960	2.0770
6	2	6	0.1072	0.1106	0.1251	0.1031	0.0749	0.0494	0.1223	0.2172
7	4	6	0.1081	0.1231	0.1440	0.1352	0.1189	0.0875	0.0901	0.1003
8	5	7	0.9532	1.0350	1.1184	1.1112	1.0790	0.9572	0.7646	0.6172
9	6	7	1.5589	1.6907	1.8324	1.8065	1.7347	1.5219	1.2682	1.0730

**Tabel 11.** Evolusi perubahan suhu saluran dalam °C sistem 30 bus periode 24 jam studi kasus metode rating daya

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	40.00	37.54	35.45	33.68	32.38	31.88	32.11	33.06	34.36
2	1	3	40.00	37.21	34.87	32.93	31.50	30.84	30.88	31.66	32.78
3	2	4	40.00	36.71	33.98	31.78	30.17	29.28	29.04	29.56	30.40
4	3	4	40.00	36.34	33.32	30.94	29.19	28.13	27.70	28.04	28.66
5	2	5	40.00	40.33	40.42	40.08	39.82	40.56	42.26	44.61	47.32
6	2	6	40.00	37.32	35.07	33.18	31.80	31.20	31.33	32.18	33.42
7	4	6	40.00	36.68	33.93	31.71	30.09	29.21	29.00	29.54	30.41
8	5	7	40.00	38.35	36.89	35.54	34.54	34.36	34.97	36.30	37.85
9	6	7	40.00	38.12	36.49	35.02	33.94	33.67	34.17	35.40	36.88

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	2	34.36	36.13	38.63	40.90	42.85	44.73	46.65	47.81	48.33
2	1	3	32.78	34.36	36.55	38.59	40.35	42.06	43.76	44.79	45.25
3	2	4	30.40	31.61	33.26	34.86	36.30	37.70	38.98	39.74	40.07
4	3	4	28.66	29.55	30.72	31.95	33.13	34.29	35.18	35.69	35.90
5	2	5	47.32	50.90	56.16	60.60	64.22	67.59	71.62	74.10	75.21
6	2	6	33.42	35.19	37.65	39.92	41.79	43.64	45.58	46.75	47.29
7	4	6	30.41	31.65	33.31	34.94	36.39	37.81	39.11	39.88	40.22
8	5	7	37.85	39.85	42.78	45.36	47.67	49.78	51.97	53.27	53.82
9	6	7	36.88	38.8	41.60	44.09	46.29	48.33	50.44	51.70	52.23

Saluran	Bus i to bus j		Periode								
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	2	48.33	47.93	46.75	45.37	43.59	42.12	40.16	38.46	36.67
2	1	3	45.25	44.86	43.79	42.52	40.88	39.51	37.70	36.09	34.45
3	2	4	40.07	39.69	38.72	37.53	36.05	34.86	33.38	32.04	30.76
4	3	4	35.90	35.51	34.60	33.40	32.02	30.97	29.80	28.75	27.81
5	2	5	75.21	74.74	72.89	70.91	68.16	65.77	62.23	59.33	55.90
6	2	6	47.29	46.92	45.87	44.66	43.02	41.59	39.57	37.75	35.88
7	4	6	40.22	39.84	38.88	37.67	36.2	35.01	33.52	32.17	30.87
8	5	7	53.82	53.35	51.88	50.10	47.98	46.30	44.22	42.55	40.71
9	6	7	52.23	51.78	50.39	48.72	46.68	45.06	43.03	41.36	39.54

**Tabel 12.** Rugi-rugi saluran transmisi sistem 30 bus periode 24 jam studi kasus metode rating daya

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	0.2957	0.3087	0.2957	0.2976	0.3401	0.3682	0.3532	0.4189
2	1	3	0.2241	0.2334	0.2241	0.2255	0.2559	0.2761	0.2653	0.3192
3	2	4	0.1156	0.1201	0.1156	0.1162	0.1311	0.1409	0.1357	0.1657
4	3	4	0.0353	0.0368	0.0353	0.0355	0.0403	0.0435	0.0418	0.0505
5	2	5	1.8095	1.8819	1.8095	1.8201	2.0565	2.2126	2.1294	2.4754
6	2	6	0.2482	0.2596	0.2481	0.2499	0.2874	0.3123	0.2990	0.3686
7	4	6	0.1083	0.1146	0.1083	0.1092	0.1302	0.1443	0.1367	0.1713
8	5	7	0.4733	0.4907	0.4733	0.4759	0.5324	0.5696	0.5497	0.6186
9	6	7	0.8483	0.8804	0.8483	0.8530	0.9576	1.0264	0.9897	1.1242

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	2	0.4812	0.5108	0.5162	0.4576	0.4906	0.5435	0.5292	0.5216
2	1	3	0.3755	0.4025	0.4074	0.3541	0.3841	0.4324	0.4193	0.4123
3	2	4	0.1998	0.2162	0.2192	0.1868	0.2050	0.2345	0.2265	0.2222
4	3	4	0.0597	0.0642	0.0650	0.0562	0.0611	0.0691	0.0669	0.0658
5	2	5	2.7887	2.9364	2.9632	2.6702	2.8357	3.0991	3.0281	2.9901
6	2	6	0.4437	0.4799	0.4866	0.4151	0.4552	0.5204	0.5027	0.4932
7	4	6	0.2057	0.2224	0.2254	0.1926	0.2110	0.2409	0.2328	0.2285
8	5	7	0.6706	0.6948	0.6992	0.6510	0.6783	0.7213	0.7097	0.7036
9	6	7	1.232	1.2824	1.2915	1.1914	1.2481	1.3376	1.3135	1.3007

Saluran	Bus i to bus j		Rugi-rugi saluran (MW)							
			Periode							
	i	j	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	2	0.5097	0.5624	0.6249	0.6037	0.5602	0.4637	0.4045	0.3635
2	1	3	0.4015	0.4498	0.5075	0.4879	0.4477	0.3596	0.3063	0.2727
3	2	4	0.2156	0.2452	0.2809	0.2688	0.2439	0.1901	0.1580	0.1393
4	3	4	0.0640	0.0719	0.0814	0.0782	0.0716	0.0571	0.0484	0.0430
5	2	5	2.9311	3.1933	3.5022	3.3977	3.1821	2.7009	2.4025	2.1864
6	2	6	0.4787	0.5441	0.6227	0.5959	0.5412	0.4224	0.3515	0.3081
7	4	6	0.2218	0.2517	0.2878	0.2755	0.2504	0.1960	0.1634	0.1419
8	5	7	0.6939	0.7365	0.7860	0.7693	0.7347	0.6561	0.6063	0.5633
9	6	7	1.2806	1.3694	1.4731	1.4381	1.3657	1.2019	1.0989	1.0148

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Nurdin Sugiantoro. Penulis lahir pada tanggal 10 Desember 1994 di Kabupaten Nganjuk, Jawa Timur, Indonesia. Penulis merupakan anak ke-7 dari pasangan Paimin dan Sumini. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Jatirejo 1 Nganjuk pada tahun 2000-2007. Penulis kemudian melanjutkan sekolah di SMPN 1 Nganjuk pada tahun 2007-2010 dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Nganjuk pada tahun 2010-2013. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro. Penulis lulus S1 pada tahun 2018. Di tahun yang sama, penulis kemudian melanjutkan ke jenjang Strata 2 di kampus dan jurusan yang sama, dengan bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga. Di sela-sela jadwal kuliah, penulis biasanya mengajar privat untuk siswa SMP, SMA dan mahasiswa, baik pribadi maupun melalui lembaga bimbingan belajar. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: [nurdin.ngk@gmail.com](mailto:nurdin.ngk@gmail.com).