

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING
MEMPERTIMBANGKAN HISTORICAL AND FORECASTED
WEATHER DATA SERTA KONTINGENSI**

(Skripsi)

Oleh
MUHAMMAD HAKIM SUHAIDI
NPM 2215031017



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG

2026

ABSTRAK

ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING MEMPERTIMBANGKAN HISTORICAL AND FORECASTED WEATHER DATA SERTA KONTINGENSI

Oleh

MUHAMMAD HAKIM SUHAIDI

Optimalisasi kapasitas transmisi menggunakan *Dynamic Line Rating* (DLR) lebih efisien daripada membangun saluran baru. Integrasi DLR ke dalam *Optimal Power Flow* (OPF) memerlukan perhitungan cuaca presisi. Penelitian ini mengusulkan model *linear programming* OPF (LP-OPF) berbasis aliran daya DC (DC-OPF) yang menyematkan batasan DLR secara dinamis ke dalam fungsi optimasi. Penjadwalan pembangkit dan pelepasan beban dilakukan pada sistem kelistrikan subsistem Lampung selama 24 jam. Model diuji menggunakan data cuaca prediksi (BMKG) dan historis (ERA5) pada skenario operasi normal serta kontingensi beruntun (N-1-1-1). Hasil simulasi menunjukkan bahwa DLR mampu mendeteksi *derating* akibat fluktuasi cuaca. Hasil simulasi menunjukkan DLR akurat mendeteksi *derating* akibat fluktuasi cuaca. Pada kondisi normal, sistem berhasil menyuplai seluruh permintaan daya. Pada skenario N-1-1-1, batasan DLR dan perubahan topologi memaksa *solver* mengeksekusi pelepasan beban saat Waktu Beban Puncak (WBP) demi keamanan jaringan. Kesimpulannya, kerangka OPF terintegrasi DLR berbasis cuaca ini menghasilkan algoritma operasi yang adaptif, aman, dan andal secara komputasi. Kemudian cuaca memberikan dampak terhadap perubahan temperatur konduktor dan rating-nya. Dampak tersebut yang kemudian akan mempengaruhi penjadwalan pembangkitan dan juga alokasi pelepasan beban.

Kata Kunci: Rating Saluran Dinamis, *Line Derating*, Pemrograman Linier, Aliran Daya Optimal, Analisis Kontingensi.

ABSTRACT

OPTIMAL POWER FLOW WITH DYNAMIC LINE RATING CONSIDERING HISTORICAL AND FORECASTED WEATHER DATA AND CONTINGENCY

By

MUHAMMAD HAKIM SUHAIDI

Optimizing transmission capacity using Dynamic Line Rating (DLR) is more efficient than building new lines. Integrating DLR into Optimal Power Flow (OPF) requires precise weather calculations. This study proposes a linear programming-based OPF (LP-OPF) model derived from DC power flow (DC-OPF) that dynamically incorporates DLR constraints into the optimization function. Generator scheduling and load shedding are performed on the Lampung power system for a 24-hour period. The model is tested using forecast (BMKG) and historical (ERA5) weather data under normal operation and consecutive contingency (N-1-1-1) scenarios. Simulation results show that DLR is capable of detecting derating caused by weather fluctuations. Under normal conditions, the system successfully supplied the entire power demand. In the N-1-1-1 scenario, DLR constraints and topology changes forced the solver to execute load shedding during Peak Load Time (PLT) to ensure grid security. In conclusion, this weather-based DLR-integrated OPF framework produces an adaptive, safe, and computationally reliable operation algorithm. Then the weather has an impact on the change in conductor temperature and its rating. These impacts will then affect generation scheduling and also load shedding allocation.

Key words: Dynamic Line Rating, Line Derating, Linear Programming, Optimal Power Flow, Contingency Analysis.

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING
MEMPERTIMBANGKAN HISTORICAL AND FORECASTED
WEATHER DATA SERTA KONTINGENSI**

Oleh

MUHAMMAD HAKIM SUHAIDI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi : **ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN DYNAMIC LINE RATING MEMPERTIMBANGKAN HISTORICAL AND FORECASTED WEATHER DATA SERTA KONTINGENSI**

Nama Mahasiswa : **MUHAMMAD HAKIM SUHAIDI**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215031017**

Jurusan : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M.
NIP. 19720923 200012 1 002

Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.
NIP. 19880624 201903 1 015

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

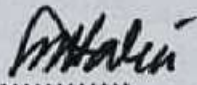
Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

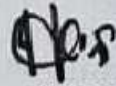
Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim S.T., M.Sc., I.P.M. 

Sekretaris : Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng. 

**Penguji
Bukan Pembimbing : Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M.** 



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 28 April 2026

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 22 Mei 2026



Muhammad Hakim Suhaidi

NPM. 2215031017

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Sumatera Selatan, Palembang pada tanggal 18 Desember 2004, sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara, dari Bapak Suhaidi dan Ibu Yuliyana.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari SD Muhammadiyah 6 Palembang pada tahun 2010 hingga 2016, SMP Muhammadiyah 4 Palembang pada tahun 2016 hingga tahun 2019, dan SMA Muhammadiyah 1 Palembang pada tahun 2019 hingga tahun 2022.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2022 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik sejak tahun 2024 s.d. tahun 2025. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) sebagai anggota Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri tahun 2023 s.d. 2024. Penulis juga pernah menjadi asisten dosen pada Mata Kuliah Algoritma dan Pemrograman dan Mata Kuliah Probabilitas dan Statistika sejak tahun 2025 s.d. 2026. Penulis melaksanakan kerja praktik di ULTG Tarahan dan membuat laporan yang berjudul **“EVALUASI MUTU GAS SF₆ SEBAGAI MEDIA PROTEKSI MTU PEMUTUS TENAGA (PMT) 150 KV PADA BAY TRAF0 II DI GARDU INDUK NEW TARAHAN”**.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Kupersembahkan skripsi ini untuk:

Ayah dan Ibu Tercinta

Suhaidi

&

Yuliyana

Serta:

Kurniati Shafira

Alfina Dwi Cahyani

Lasmina

Samsu Rijal & Keluarga

Keluarga Besar, Dosen, Teman

dan

Almamater

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain), dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap.”

(Q.S Al-Insyirah: 6-8)

“Allah tidak membebani seseorang, kecuali menurut kesanggupannya.”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

“Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah kepunyaan mereka yang senantiasa berusaha”

(Alm. B.J. Habibie)

“Someone who has never made a mistake has never tried anything new”

(Albert Einstein)

“The only way to do great work is to love what you do”

(Steve Jobs)

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus.

Tugas akhir dengan judul “Aliran Daya Optimal dengan *Dynamic Line Rating* Mempertimbangkan *Historical and Forecasted Weather Data* serta Kontingensi” merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukamanul Hakim, S.T., M.T., I.P.M. selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran, serta memberikan arahan, motivasi, semangat, nasehat dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

6. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat dan saran kepada penulis dengan baik dan ramah.
7. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M. selaku dosen penguji yang memberikan kritik, masukan, dan saran yang membangun kepada penulis.
8. Bapak Dr. Eng. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan dengan baik dan tulus kepada penulis selama perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Keluarga Tercinta terkhusus Ayah, Ibu, dan Saudari. Terimakasih atas segala pengorbanan dan tulus kasih yang di berikan. Senantiasa memberikan yang terbaik, tidak kenal lelah mendoakan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana. Semoga senantiasa diberikan kesehatan, panjang umur, dan dapat melihat anaknya meraih kesuksesan.
12. Wak Rijal dan keluarga, merupakan wali penulis selama penulis melaksanakan studi di Unila. Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan, perhatian, kehangatan, dukungan moral, serta doa yang diberikan.
13. Keluarga Asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik 22 dan 23 yang sudah membersamai penulis selama menjadi Asisten Lab dan saat mengerjakan Tugas Akhir ini.
14. Pharrel, Alif, Luthfi, Adnan, Andri, para petarung lab yang membersamai penulis selama proses pengerjaan skripsi.
15. Deri, Hatta, Rizky, Tegar, Gusti, Aditya, selaku sahabat penulis sedari Sekolah Menengah yang memberikan *support* dan menjadi teman diskusi bagi penulis.
16. Teman-teman konsentrasi Teknik Tenaga Listrik dan Kelas Teknik Elektro A 2022 yang selalu memberikan bantuan selama berkuliah.

17. Ketua Angkatan dan Keluarga Besar Angkatan Rectical 22 yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, menemani penulis selama perkuliahan, dan bantuan dalam berbagai hal.
18. Keluarga Besar Himatro Unila, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan masyarakat pada umumnya.

Bandar Lampung, 22 Mei 2026

Muhammad Hakim Suhaidi

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Hipotesis Penelitian.....	5
1.7 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 <i>Dynamic Line Rating</i>	10
2.2.1 <i>Joule Heating</i>	12
2.2.2 <i>Solar Heating</i>	13
2.2.3 <i>Convective Cooling</i>	14
2.2.4 <i>Radiative Cooling</i>	15
2.2.5 <i>Conductor electrical resistance</i>	15
2.3 <i>DC Power Flow</i>	15
2.4 <i>Contingency Analysis</i>	16
2.5 Aliran Daya Optimal dan <i>Linear Programming</i>	20
2.6 <i>Value of Loss Load (VoLL)</i>	24
2.7 <i>Gurobi Optimizer</i>	24
2.8 Andongan dan Jarak Bebas	24

III. METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1 Waktu dan Tempat	28
3.2 Alat dan Bahan	29
3.3 Metodologi Penelitian	29
3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian	30
3.5 Radiasi matahari dengan <i>clear sky model</i>	31
3.6 Analisis Dynamic Line Rating	32
3.6.1 Perhitungan Dynamic Line Rating	32
3.7 Model Aliran Daya DC (<i>DC Power Flow</i>)	33
3.7.1 Persamaan P_{flow} dan matriks B	33
3.7.2 Pembuatan model profil beban	33
3.7.3 Model optimasi (LP-OPF)	34
3.7.4 Skenario Simulasi	35
3.8 Diagram Alir Komputasi	36
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Data Parameter	37
4.1.1 Bus Data	37
4.1.2 <i>Branch Data</i>	37
4.1.3 Data konduktor	38
4.1.4 Ramp Rate Pembangkit	38
4.1.5 Kapasitas Pembangkit	38
4.1.6 Biaya <i>Load Shedding</i>	38
4.1.7 Fungsi Biaya Pembangkit	39
4.2 Simulasi dengan Sumber Cuaca BMKG untuk Prediksi Cuaca pada Tanggal 16 Mei 2026:	40
4.2.1 Parameter Cuaca	40
4.2.2 <i>Heat Balance Parameter</i>	43
4.2.3 Fenomena Derating pada Saluran	45
4.2.4 <i>Generator Scheduling and Load Profile</i> dengan Data BMKG	47
4.2.5 <i>Line Loading Heatmap with BMKG Forecasted Weather</i>	50
4.2.6 <i>Ramp Rate Generator</i> dengan Data Cuaca BMKG	53

4.3 Simulasi dengan Sumber Cuaca ERA5 untuk Data Cuaca Historis pada Tanggal 16 Mei 2026	55
4.3.1 Parameter Lingkungan.....	55
4.3.2 <i>Heat Balance Parameter</i> dengan Data Cuaca Historis ERA5	57
4.3.3 Fenomena Derating pada Saluran dengan Data ERA5.....	58
4.3.4 <i>Generator Scheduling and Load Profile</i> dengan Data ERA5.....	61
4.3.5 <i>Line Loading Heatmap</i> dengan Data Cuaca ERA5	64
4.3.6 <i>Ramp Rate Generator</i> dengan Data Cuaca ERA5.....	67
V. PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	76

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Kondisi Operasi dalam Sistem Tenaga[23].....	18
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 3.2 Skenario Simulasi	35
Gambar 3.3 Diagram Alir Komputasi	36
Gambar 4.1 Fungsi Biaya Generator (<i>Piece-Wise Linear Model Approach</i>).....	40
Gambar 4.2 Iradiasi Matahari	40
Gambar 4.3 Temperatur Lingkungan	41
Gambar 4.4 Kecepatan dan Arah Angin.....	41
Gambar 4.5 <i>Heat Balance</i> pada Saluran 57 (Bus 36-44).....	43
Gambar 4.6 Perbandingan <i>Static Rating</i> Terhadap <i>Dynamic Line Rating</i> Pada Normal Operation (BMKG).....	45
Gambar 4.7 Perbandingan <i>Static Rating</i> Terhadap <i>Dynamic Line Rating</i> Pada Kontingensi N-1-1-1 (BMKG)	45
Gambar 4.8 <i>Generator Scheduling and Load Profile in Normal Operation</i>	47
Gambar 4.9 <i>Generator Scheduling with BMKG Forecasted Weather Data and Contingency Scheme</i>	47
Gambar 4.10 <i>Line Loading Heatmap with BMKG Forecasted Weather Data in Normal Operation</i>	50
Gambar 4.11 <i>Line Loading Heatmap with BMKG Forecasted Weather Data and Contingency Scheme</i>	51
Gambar 4.12 <i>Ramp Rate Generator in Normal Operation with BMKG Forecasted Weather Data</i>	53
Gambar 4.13 <i>Ramp Rate Generator in Contingency Scheme with BMKG Forecasted Weather Data</i>	53
Gambar 4.14 Iradiasi Matahari.....	55
Gambar 4.15 Temperatur Lingkungan	55
Gambar 4.16 Kecepatan dan Arah Angin	56
Gambar 4.17 <i>Heat Balance</i> pada Saluran 57 (Bus 36-44)	57
Gambar 4.18 Perbandingan <i>Static Rating</i> Terhadap <i>Dynamic Line Rating</i> Pada Normal Operation (ERA5).....	58

Gambar 4.19	Perbandingan <i>Static Rating</i> Terhadap <i>Dynamic Line Rating</i> Pada Kontingensi N-1-1-1 (ERA5).....	59
Gambar 4.20	<i>Generator Scheduling and Load Profile in Normal Operation</i>	61
Gambar 4.21	<i>Generator Scheduling with ERA5 Historical Weather Data and Contingency Scheme</i>	61
Gambar 4.22	<i>Line Loading Heatmap</i> dengan Data Cuaca ERA5 pada Simulasi Operasi Normal	64
Gambar 4.23	<i>Line Loading Heatmap</i> dengan Data Cuaca ERA5 pada Simulasi N-1-1-1	65
Gambar 4.24	<i>Ramp Rate Generator in Normal Operation with ERA5 Data</i>	67
Gambar 4.25	<i>Ramp Rate Generator in Contingency Scheme with ERA5</i>	67

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai konduktor maksimum berdasarkan tipe tower dan jenis konduktor	26
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian.....	28

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi merupakan bagian di mana energi listrik dihantarkan pada tingkat tegangan yang tinggi dengan jarak yang jauh. Saluran transmisi udara perlu dirancang secara tepat agar jaringan listrik mampu memenuhi pertumbuhan kebutuhan energi tanpa menimbulkan beban ekonomi besar. Dengan meningkatnya kebutuhan konsumsi, produksi, dan distribusi energi, dibutuhkan peningkatan kapasitas transmisi pada jaringan yang sudah ada atau pembangunan saluran baru. Namun, proses pembangunan saluran baru sering kali tidak dapat dilakukan karena keterbatasan ekonomi, lingkungan, peraturan, maupun faktor politik [1]. Alih-alih membangun saluran baru langkah yang dapat diterapkan yaitu dengan *reconductoring* dan *dynamic line rating* [2]. Kapasitas saluran juga dapat ditingkatkan dengan menaikkan level tegangan, tetapi metode ini umumnya memerlukan proses yang lebih kompleks dan biaya yang tinggi, sehingga peningkatan kemampuan hantar arus pada saluran *existing* menjadi alternatif yang lebih efisien dan menguntungkan [3].

Dynamic Line Rating (DLR) merupakan *rating* saluran secara *real-time* yang mempertimbangkan kondisi lingkungan seperti suhu udara sekitar dan kecepatan angin, serta pengukuran status konduktor seperti arus sirkuit, kekencangan (*tension*) dan lendutan konduktor [4]. DLR harus diperhatikan untuk menerapkan batasan aliran saluran dalam hal arus maksimum atau aliran daya. Kegunaan DLR secara umum mengizinkan aliran daya lebih besar daripada yang seharusnya diizinkan dan penggunaannya juga dapat mendeteksi situasi di mana aliran daya harus dikurangi untuk menjaga operasi sistem yang aman dan andal serta menghindari keausan yang tidak perlu pada peralatan transmisi [5][6].

Dengan *line rating* yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aliran daya, maka dapat dilakukan pengaturan pada aliran daya sehingga dapat meminimalkan aliran arus yang dihantarkan oleh konduktor. Di mana arus ini menyebabkan panas pada konduktor. Pemuaian ini yang menyebabkan bertambahnya lendutan konduktor atau memperkecil jarak vertikal konduktor terhadap objek di bawahnya. Semakin tinggi arus pembebanan maka semakin besar rugi-rugi berupa panas yang pada akhirnya mengurangi *tension* kawat konduktor. Lendutan akan meningkat ketika konduktor memanjang akibat kenaikan suhu yang tinggi serta beban mekanis [7]. Dengan demikian DLR akan memberikan keuntungan bagi operator dengan merelaksasi batasan termal ketika kecepatan angin di atas rata-rata atau suhu lingkungan sedang dingin. Semakin tinggi rating saluran maka dapat mengurangi tingkat keparahan pelanggaran kontingensi dari yang memerlukan pemutusan beban listrik pelanggan, sehingga operator memiliki lebih banyak waktu untuk merencanakan respon pada kondisi tersebut [8].

Pada masalah aliran daya optimal, operator meminimalkan biaya pembangkitan dengan tetap memenuhi batasan sistem, seperti level tegangan, batasan sudut, dan kapasitas transmisi. Masalah ACOPF adalah pada nonlinear dan masalah nonconvex dan sulit dipecahkan[9]. Untuk mengurangi kompleksitas komputasi, industri sering menggunakan pendekatan linier DCOPF, meskipun menurunkan akurasi dibawah kondisi pembebanan tinggi[10]. Salah satu pendekatan yang mudah untuk mengintegrasikan DLR dengan OPF adalah dengan menerapkan persamaan diferensial *heat balance* yang dilinierisasi sebagai bagian dari optimasi (termasuk suhu) [11].

Terjadinya *blackout* yang terjadi pada sistem transmisi italia dan juga sistem transmisi sumatera sebelumnya menjadi perhatian yang menarik untuk ditinjau penyebabnya. Berdasarkan *blackout* italia pada 28 September 2003, pasokan energi hilang sebesar 177 GWh dan butuh waktu 13.5 jam untuk menyala kembali dua jaringan transmisi utamanya. Penyebabnya diawali dengan terputusnya saluran transmisi 380 kV yang menghubungkan swiss dan italia. Saluran ini terputus karena terjadinya kontak dengan pohon (*tree flashover*). Hal ini bisa terjadi karena saluran mengalami overheating, sehingga membuat saluran

memuai dan melendut ke bawah. Kemudian *tree flashover* terjadi kembali karena pemuaiian akibat oberheating pada saluran lainnya yang menanggung aliran daya dari saluran yang putus sebelumnya [12].

Dengan demikian, penyebab dari *black out* tersebut diasumsikan terjadi karena terjadinya *short circuit/flashover* antar konduktor terhadap objek di bawahnya. Dengan masalah tersebut lendutan konduktor dan parameter yang mempengaruhinya terutama DLR menjadi perhatian dan fokus pada penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengembangkan suatu model yang mengoptimasi *dynamic line rating* dengan mempertimbangkan data cuaca aktual dan juga melibatkan skenario kontingensi. Skenario kontingensi dilibatkan karena terjadi perubahan signifikan pada sistem baik pada tegangan, arus, dan nilai Y_{bus} . Dengan dinamisnya kondisi lingkungan dan aliran daya pada sistem listrik maka hal ini juga akan berdampak pada *line rating*.

Untuk meminimasi *line rating* agar mencegah terjadinya lendutan maka dilakukan optimasi pada *dynamic line rating* dengan menyesuaikan dua parameter yaitu *reschedulling generation* dan juga *load shedding* yang akan memberikan dampak langsung pada *dyanamic line rating*. Metode optimasi yang digunakan yaitu *Linear Programming Optimal Power Flow (LPOPF)* dengan menerapkan DC-OPF karena bersifat linear dan unggul dalam komputasinya yang cepat. Dengan demikian, program akan menghitung *schedule* pembangkit sebagai prioritas utama dan akan melakukan *load shedding* sebagai pilihan terakhir apabila di sisi pembangkit tidak *feasible* untuk kondisi yang disimulasikan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Merancang dan membangun *framework* optimasi OPF multi periode berbasis pemrograman linier yang menggunakan model DC *power flow* yang terintegrasi dengan data cuaca (BMKG dan ERA5) sebagai *constraint*.
2. Menentukan penjadwalan pembangkit (*generator dispatch*) dan alokasi pelepasan beban (*load shedding*) yang optimal selama 24 jam pada skenario operasi normal dan kontingensi.
3. Menganalisis dampak cuaca terhadap *line rating* dan *generator dispatch*.

4. Membandingkan *energy dispatch* pada simulasi dengan kedua data cuaca (BMKG dan ERA5)

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menghitung nilai DLR 24 jam ke depan secara akurat dengan mengintegrasikan data cuaca (suhu, angin) dari BMKG dan ERA5 serta data pemanasan radiasi matahari (Q_s)?
2. Bagaimana model optimasi LPOPF dapat menentukan jadwal *dispatch* pembangkit dan alokasi *load shedding* dengan biaya terendah (optimal) dengan tetap mematuhi batasan DLR yang dinamis?
3. Apa dampak dari skenario kontingensi (*trip* saluran atau generator) terhadap jadwal *dispatch optimal*, dan potensi terjadinya *load shedding* ketika batasan DLR diberlakukan?

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Model optimasi menggunakan *Linear Programming Optimal Power Flow* (LP-OPF) berbasis aliran daya DC (*DC Power Flow*).
2. Perhitungan DLR berfokus pada keseimbangan termal konduktor. Penelitian ini tidak menghitung lendutan (*sag*) aktual dalam satuan meter, melainkan hanya memastikan aliran daya tidak melebihi batas DLR.
3. Data cuaca dari BMKG/ERA5 dan simulasi radiasi surya dari pvlib diasumsikan seragam (*uniform*) pada seluruh saluran transmisi.
4. Simulasi radiasi matahari untuk data prediksi (BMKG) diasumsikan kondisi langit cerah (*clear-sky*), sedangkan untuk data historis (ERA5) menggunakan data iradiasi global aktual.
5. Studi kasus menggunakan topologi sistem kelistrikan subsistem lampung

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan alat bantu keputusan (*Decision Support Tool*) bagi operator sistem dalam operasi sistem yang mempertimbangkan kapasitas saluran yang sebenarnya berdasarkan data cuaca.
2. Mengembangkan model OPF yang lebih realistis dengan mengintegrasikan data cuaca dinamis (BMKG dan ERA5) dan faktor pemanasan surya.
3. Meningkatkan keandalan sistem dengan mengurangi risiko *blackout* yang disebabkan oleh *flashover* akibat lendutan (*sag*) konduktor yang berlebihan.

1.6 Hipotesis Penelitian

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini yaitu *Dynamic Line Rating* memberikan pengaruh dalam perencanaan operasi sistem tenaga khususnya penjadwalan pembangkitan

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini terbagi ke dalam lima bab dengan sistematik sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang masalah yang mendasari penelitian ini, tujuan penelitian yang ingin dicapai, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori dan referensi yang relevan yang digunakan dalam penelitian ini, termasuk *heat balance*, *dynamic line rating*, *DC power flow*, dan analisis kontingensi.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian yang diterapkan, dan diagram penelitian yang menunjukkan alur kerja dalam menyelesaikan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan, termasuk analisis data mengenai profil *dynamic line rating* terhadap *static line rating*, analisis *scheduling generator* skenario operasi normal dan kontingensi, analisis *heatmap line*

loading, dan perbandingan antara hasil simulasi dengan data cuaca BMKG dan ERA5.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir ini berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan berdasarkan hasil dan pembahasan, serta memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut atau implementasi praktis dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian [13] mengusulkan integrasi *Dynamic Line Rating* (DLR) ke dalam masalah *Optimal Power Flow* (OPF). Metodologi yang digunakan adalah *Quadratically Constrained Quadratic Program* (QCQP) untuk menyelesaikan model DC-OPF yang telah dimodifikasi untuk memperhitungkan rugi-rugi transmisi (*transmission losses*). Penelitian ini secara khusus menggunakan persamaan *non-steady-state heat balance*, yang menambahkan variabel kontrol temperatur konduktor dan batasan persamaan neraca panas ke dalam masalah optimasi. Pengujian pada sistem IEEE 9 bus dan 30 bus menunjukkan bahwa metode QCQP berhasil mengakomodasi model DLR yang kompleks dan membuktikan bahwa integrasi DLR membuat operasi sistem menjadi lebih ekonomis dibandingkan dengan *Static Line Rating* (SLR).

Studi [4] melakukan perbandingan komprehensif antara *Static Line Ratings* (SLR), *Ambient Adjusted Ratings* (AAR), dan DLR pada jaringan sintesis ERCOT. Dengan menggunakan model *Security-Constrained Optimal Power Flow* (SC-DCOPF), penelitian ini mengestimasi DLR dan AAR menggunakan persamaan neraca panas dan data cuaca beresolusi tinggi. Hasil numerik menunjukkan bahwa penerapan DLR dapat menggandakan manfaat yang diperoleh dari AAR (relatif terhadap SLR), baik dalam hal pengurangan biaya sistem, *curtailment* (pembatasan) energi terbarukan, maupun emisi. Studi ini secara khusus menyoroti korelasi positif antara kecepatan angin (yang meningkatkan kapasitas saluran DLR) dan ketersediaan pembangkit angin, yang secara signifikan membantu mengurangi *curtailment* terutama pada jam-jam produksi angin tinggi.

Penelitian [14] menyajikan kerangka kerja untuk mengevaluasi dampak *Weather Adjusted Line Ratings* (WALR), yang mencakup AAR dan DLR, menggunakan analisis *time-series* selama satu tahun penuh. Studi ini menggunakan sistem sintesis WECC 10.000-bus dan menghitung WALR jam-jaman berdasarkan standar IEEE 738-2012, dengan memasukkan data cuaca seperti suhu ambien, kecepatan dan arah angin, serta radiasi matahari. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan WALR secara strategis dapat secara efektif mengurangi *thermal overload*. Selain itu, analisis sensitivitas dalam penelitian ini mengidentifikasi bahwa kecepatan angin memiliki dampak paling signifikan terhadap peningkatan rating, diikuti oleh suhu ambien dan sudut angin.

Kajian [1] berfokus pada studi eksperimental DLR yang diterapkan secara khusus pada konduktor *High-Temperature Low-Sag* (HTLS). Studi ini membandingkan model teoretis standar (IEEE dan CIGRE) dengan pengukuran empiris dari prototipe fisik. Hasil utamanya menunjukkan bahwa model teoretis yang ada memiliki deviasi yang signifikan ketika diterapkan pada kondisi beban tinggi dan suhu tinggi yang menjadi ciri khas konduktor HTLS. Secara khusus, penelitian ini mengidentifikasi kelemahan dalam perhitungan pendinginan konvektif (terutama terkait sudut datang angin) dan interpolasi linear resistansi AC pada suhu tinggi, yang dapat menyebabkan model melebih-lebihkan kapasitas (*ampacity*) konduktor.

Penelitian [15] mengembangkan metodologi untuk meningkatkan akurasi estimasi *Dynamic Rating Management* (DRM) pada saluran transmisi udara dengan meminimalkan kesalahan akibat ketidakpastian data cuaca. Metodologi yang diusulkan membandingkan dua pendekatan, yaitu Metode Iterasi dan Metode Monte Carlo, untuk mendapatkan nilai parameter cuaca efektif (suhu sekitar, kecepatan angin, dan radiasi matahari) guna mengoreksi perhitungan suhu konduktor berdasarkan standar IEEE 738 dan CIGRE TB601. Penelitian ini secara khusus memanfaatkan data pengukuran suhu *real-time* dari sistem *Distributed Temperature Sensor* (DTS) untuk memvalidasi dan menyesuaikan input cuaca dalam algoritma termal. Pengujian pada saluran transmisi riil 220 kV sepanjang 30 km di Spanyol menunjukkan bahwa kedua metode berhasil mengurangi *Root Mean Squared Error* (RMSE) suhu konduktor sekitar 30%, namun metode Iterasi dinilai

lebih unggul untuk aplikasi *real-time* karena waktu komputasi yang jauh lebih cepat (8 ms per sampel) dibandingkan metode Monte Carlo (98,4 ms per sampel).

Penelitian [16] menerapkan pendekatan *machine learning* (ML) untuk prediksi cuaca hiper-lokal untuk prediksi *dynamic line rating*. Tidak seperti metode konvensional yang bergantung pada sensor, pendekatan dengan ML dilatih untuk memprediksi parameter cuaca hiper-lokal pada skala seluruh jaringan. Mengintegrasikan data topografis akan meningkatkan akurasi prediksi dengan memperhitungkan fitur bentangan alam dan hambatan di sekitar saluran listrik. Paper ini menggunakan studi kasus sistem estonia untuk menyoroti efektifitasnya di dunia nyata. Penelitian ini mengimplementasikan DLR menggunakan *confidence intervals* (CIs) untuk kecepatan angin, arah angin, dan suhu lingkungan. Tujuannya untuk meningkatkan keandalan dari perhitungan DLR tak langsung dengan menggabungkannya dengan model prediksi cuaca hiper-lokal bersamaan dengan penggabungan statistika dan probabilitas. Hasil yang ditunjukkan yaitu efektifitas dari pendekatan ini pada prediksi *maximum ampacity* dari saluran udara lebih akurat daripada metode tradisional. Studi ini disimulasikan selama periode satu tahun dalam interval waktu yang spesifik. Didapati bahwa menggabungkan CIs mengurangi efektifitas DLR, membuat pengambilan keputusan operator lebih konservatif dan andal. Analisis menunjukkan 89% nilai DLR berdasarkan perhitungan data jatuh di dalam prediksi CI batas untuk stasiun cuaca yang spesifik. Penelitian ini juga mengkajipenerapan DLR pada granularitas *span-level* untuk satu tahun penuh, membandingkan rentang yang berbeda dalam satu jam dan menganalisis dampak kondisi cuaca hiper-lokal. Penggunaan *lower bound* CIs memberikan hasil yang lebih baik daripada menggunakan nilai rata-rata ataupun *upper bound*. Metodologi ini terbukti efektif untuk saluran udara dengan *span* yang memiliki beragam suhu maksimum yang diizinkan, menunjukkan peningkatan pemanfaatan kapasitas dan kemampuan adaptasi yang dinamis terhadap perubahan kondisi cuaca.

2.2 *Dynamic Line Rating*

Dynamic Line Rating (DLR) adalah sebuah teknologi yang digunakan untuk meningkatkan ampasitas saluran transmisi udara (*overhead*) secara dinamis berdasarkan pengamatan cuaca. *Ampacity* (daya hantar arus) sebuah konduktor didefinisikan sebagai arus konstan maksimum yang akan memenuhi kriteria desain, keamanan (*security*), dan keselamatan (*safety*) dari saluran tertentu tempat konduktor tersebut digunakan [17].

Secara khusus, kapasitas saluran udara yang dibatasi oleh suhu ditentukan oleh fenomena termodinamika, listrik, dan mekanik yang saling terkait. Dua faktor pembatas utama antara lain: pertama, *conductor sag* karena pemanjangan termal konduktor yang melanggar jarak aman; kedua, *conductor annealing and loss of tensile strength* yang disebabkan karena pemanasan yang melebihi titik kritisnya [18].

Untuk mendefinisikan *dynamic line rating* (DLR), penting untuk diketahui bahwa batasan arus dirancang untuk saluran listrik udara. Untuk menjaga batas jarak aman minimum antara saluran udara dan benda yang berada di bawahnya, suhu inti dari saluran harus dijaga lebih rendah daripada nilai *rated*-nya. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari *joules effect* terhadap temperatur, arus maksimal yang harus ditetapkan agar tetap mematuhi *constraint* (Batasan) [19].

Teknologi *dynamic line rating* terbagi dalam dua kategori, metode tak langsung (*indirect methods*) dan metode langsung (*direct methods*). Metode langsung bergantung pada pemasangan sensor fisik untuk mengukur sifat-sifat dari konduktor aktual untuk menentukan suhu saluran. Pada kasus *direct DLR technologies*, idealnya, setiap *span* harus dimonitor agar memastikan bahwa tidak adanya pelanggaran batas aman, tapi ini tidak layak secara ekonomi. Karena power grid mencakup ribuan kilometer, maka ini tidak ekonomis untuk memasang sensor di semua *span*. Pada arus tinggi, suhu dari konduktor OHL beragam yang diakibatkan efek pendingin angin dan suhu lingkungan disepanjang jalur yang memungkinkan penggunaan *indirect methods* untuk perhitungan suhu konduktor. Keuntungan *indirect methods* yaitu tidak bergantung pada peralatan fisik, tapi tergantung pada observasi meteorologi [16].

Penggunaan DLR dapat mengizinkan peningkatan yang signifikan pada arus yang dapat melalui saluran transmisi. Keuntungan yang berpotensi diperoleh antara lain[20]:

1. Meningkatkan integrasi dari energi terbarukan, secara khusus energi angin. Disebabkan erat hubungannya antara kecepatan angin dan kemampuan pendinginan saluran.
2. Mengurangi biaya dengan tidak membutuhkan pemasangan saluran baru untuk meningkatkan kapasitas saluran
3. Mengurangi biaya dari produksi energi listrik
4. Meningkatkan keandalan dari jaringan listrik

Panas yang tersimpan dalam konduktor menghasilkan variasi suhu selama periode waktu tertentu yang bergantung pada sifat material, dan lain-lain. Kenaikan dan kehilangan panas dihitung seperti pada kasus keadaan tunak, dengan mempertimbangkan karakteristik yang mungkin bergantung pada waktu. Dengan mengasumsikan bahwa kondisi *ambient* tetap konstan, waktu yang dibutuhkan konduktor untuk mencapai suhu tertentu setelah perubahan arus dapat dihitung dan digunakan untuk memprediksi *rating* darurat. Dengan juga mempertimbangkan perubahan parameter cuaca (kecepatan dan arah angin, suhu ambient, radiasi matahari), perilaku suhu konduktor seiring waktu, pemanasan atau pendinginan yang tergantung pada waktu. Dengan mengukur parameter cuaca ini sepanjang saluran, dan variasi arus seiring waktu, maka memungkinkan untuk melacak suhu konduktor selama periode waktu tertentu agar dapat digunakan dalam metode *dynamic line rating*. Pasokan panas diseimbangkan dengan disipasi panas, kondisi termal dari konduktor didefinisikan pada keadaan tunak. Persamaan *steady state heat balance* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \times R(T)$$

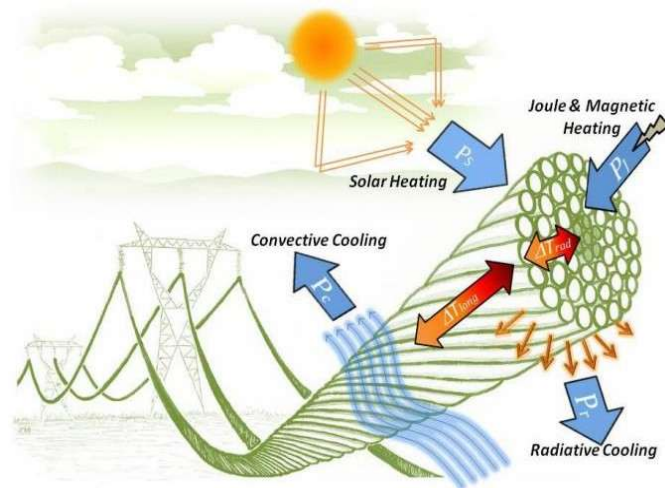
Di mana:

$q_J = \text{Joule Heating (W/m)}$

$q_S = \text{Solar Heating (W/m)}$

$q_C = \text{Convective Cooling (W/m)}$

$q_R = \text{Radiative Cooling (W/m)}$



Gambar 2.1 Pemanasan dan Pendinginan pada Saluran Udara[18]

Sementara, untuk *non-steady state heat balance*:

$$q_c + q_r + mC_p \times \frac{dT_{avg}}{dt} = q_s + I^2 \times R(T)$$

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{mC_p} [R(T) \times I^2 + q_s - q_c - q_r]$$

$$\Delta T_{avg} = \frac{1}{mC_p} [R(T) \times I^2 + q_s - q_c - q_r] \times \Delta t$$

2.2.1 Joule Heating

Joule heating adalah pemanasan pada konduktor yang disebabkan oleh efek dari arus beban dan mencakup efek joule, efek magnetik, dan efek kulit. *Joule heating* mengacu pada pemanasan konduktor yang disebabkan oleh resistansi konduktor. Efek magnetik mengacu pada pemanasan konduktor akibat fluks magnetik siklik (bolak-balik) yang menyebabkan pemanasan oleh arus eddy, histeresis, dan viskositas magnetik. Efek ini biasanya diabaikan pada konduktor non-ferrous pada frekuensi daya, namun dapat berpengaruh pada konduktor berinti baja [21]

$$q_J = I^2 \cdot R(T)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_R + q_c - q_s}{R(T)}}$$

Keterangan:

I = Arus yang mengalir pada konduktor

R(T) = Resistansi pada temperatur T

2.2.2 Solar Heating

Untuk menghitung *solar heating* dapat diketahui dengan rumus berikut [21]:

$$q_s = \alpha \times Q_{se} \times \sin(\theta) \times A'$$

$$\theta = \arccos [\cos(H_c) \times \cos(z_c - Z_l)]$$

2.2.2.1 Solar altitude

$$H_c = \arcsin [\cos(Lat) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(Lat) \times \sin(\delta)]$$

2.2.2.2 Hour angle

$$\omega = (Time - Noon) \times 15^\circ$$

2.2.2.3 Solar declination

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[\frac{284 + N}{365} \times 360 \right]$$

2.2.2.4 Solar azimuth

$$Z_c = C + \arctan(\chi)$$

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \times \cos(\omega) - \cos(Lat) \times \tan(\delta)}$$

2.2.2.5 Total solar and sky radiated heat intensity corrected for elevation

$$Q_{se} = K_{solar} \times Q_s$$

$$K_{solar} = A + B \times H_e + C \times H_e^2$$

Keterangan:

- α = Solar absorptivity
- Q_{se} = Total solar and sky radiated heat intensity corrected for elevation (W/m²)
- A' = Projected area of conductor ($\frac{m^2}{linear\ m}$)
- H_c = Solar altitude (deg)
- δ = Solar declination (deg)
- ω = Hour angle relative to solar noon (deg)
- Lat = Degrees of latitude (deg)
- θ = Effective angle of incidence of the sun's rays (deg)
- $Q_{diffuse\ Ground}(t)$: Perolehan panas surya pantulan (W/m) pada jam t
- α : Koefisien Absorptivitas Surya.
- N = day of the year

- $Z_c = \text{Solar azimuth (deg)}$
- $\chi = \text{Solar azimuth variable}$
- $Q_s = \text{Total solar and sky radiated haet intensitas at sea level (W/m}^2\text{)}$
- $K_{solar} = \text{Solar elevation correction factor}$
- $C = \text{Solar azimuth constant (deg)}$
- $D_0: \text{Diameter luar konduktor (m)}$

2.2.3 Convective Cooling

Untuk menghitung suhu lapisan udara yang bersentuhan dengan permukaan[21]:

$$q_c = \text{MAX}(q_{cn}, q_{c1}, q_{c2})$$

2.2.3.1 Force Convective Cooling

For low wind speed:

$$q_{c1} = K_{angle} \times [1.01 + 1.35 \times N_{Re}^{0.52}] \times k_f \times (T_s - T_a)$$

For high wind speed:

$$q_{c2} = K_{angle} \times 0.754 \times N_{Re}^{0.6} \times k_f \times (T_s - T_a)$$

2.2.3.2 Natural Convective Cooling

$$q_{cn} = 3.645 \times P_f^{0.5} \times D_0^{0.75} \times (T_s - T_a)^{1.25}$$

2.2.3.3 Reynolds number

$$N_{Re} = \frac{D_0 \times \rho_f \times v_w}{\mu_f}$$

2.2.3.4 Mean Film Temperature

$$T_{film} = \frac{T_s + T_a}{2}$$

2.2.3.5 Dynamic Viscosity of Air

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4}$$

2.2.3.6 Air density

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} \times H_e + 6.379 \times 10^{-9} \times H_e}{1 + 0.00367 \times T_{film}}$$

2.2.3.7 Thermal conductivity of air

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + 7.477 \times 10^{-5} \times t_{film} - 4.407 \times 10^{-9} \times t_{film}^2 \frac{W}{m} \times ^\circ C$$

2.2.3.8 Wind direction factor

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(\varphi) + 0.194 \times \cos(2\varphi) + 0.368 \times \sin(2\varphi)$$

2.2.4 Radiative Cooling

Untuk menghitung suhu lapisan udara yang bersentuhan dengan permukaan:

$$P_r = 17.8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

2.2.5 Conductor electrical resistance

$$R(T_{avg}) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] \times (T_{avg} - T_{low}) + R(T_{low})$$

Keterangan:

K_{angle} = wind direction factor

N_{Re} = Reynolds number

k_f = Thermal conductivity of air at temperature T_{film}

T_s = Conductor surface temperature (°C)

T_a = Ambient air temperature (°C)

P_f = Density of air (kg/m³)

D_0 = Outside diameter of conductor (m)

v_w = speed of air stream at conductor (m/s)

μ_f = Absolute (dynamic) viscosity of air ($\frac{kg}{(m \cdot s)}$)

H_e = Elevation of conductor above sea level (m)

φ = Angle between wind and axis of conductor

β = Angle between wind and perpendicular to conductor axis

ε = emissivity

D_0 = Conductor core diameter

T_{high} = High average conductor temperature for which ac resistance is specified

T_{low} = Low average conductor temperature for which ac resistance is specified

T_{avg} = Average temperature of aluminum strand layers

2.3 DC Power Flow

DC Power Flow merupakan metode perhitungan aliran daya yang disederhanakan dari *AC Power Flow* yang algoritma aliran daya melibatkan penghilangan persamaan Q-V seluruhnya. Hal ini menghasilkan algoritma aliran daya yang sepenuhnya linear. Untuk itu diasumsikan bahwa semua $|E| = 1$ pu dan

θ pada bus *slack* dibuat 0. *DC Power flow* hanya dapat diandalkan untuk menghitung aliran daya (MW) pada saluran transmisi dan transformator. DCPF dapat sangat menyederhanakan proses perhitungan dan memiliki performa komputasi dan secara analitis lebih baik. Namun, akurasi dari DCPF terbilang rendah dan ketidakmampuan dalam menghitung amplitudo tegangan dan daya reaktif yang membatasi penerapannya disebabkan oleh pengabaian dari turunan pada tegangan, daya reaktif, *branch resistance* dan lainnya. Maka, daya yang mengalir pada tiap saluran menggunakan *DC Power Flow* adalah [22][23]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$[B']^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j)$$

$$P_i = \sum_{\substack{k=bus \\ \text{connected to } i}}^N P_k$$

Keterangan:

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

X_{ij} = Reaktansi saluran transmisi yang menghubungkan bus i dan bus j

θ_i = Sudut fasa tegangan pada bus i

$[B']$ = Matriks suseptansi

$\Delta \theta$ = Perubahan sudut fasa tegangan pada setiap bus

ΔP = Perubahandaya aktif pada setiap bus

2.4 Contingency Analysis

Analisis kontingensi merupakan teknik yang digunakan untuk menilai keandalan sistem tenaga dengan melibatkan analisis perilaku sistem tenaga di bawah berbagai kontingensi untuk mengidentifikasi titik lemah potensial dan mengambil tindakan pencegahan [24]. Hasil dari analisis ini memungkinkan sistem untuk dioperasikan secara defensif. Banyak masalah yang terjadi pada sistem tenaga dapat menyebabkan gangguan serius dalam rentang waktu yang

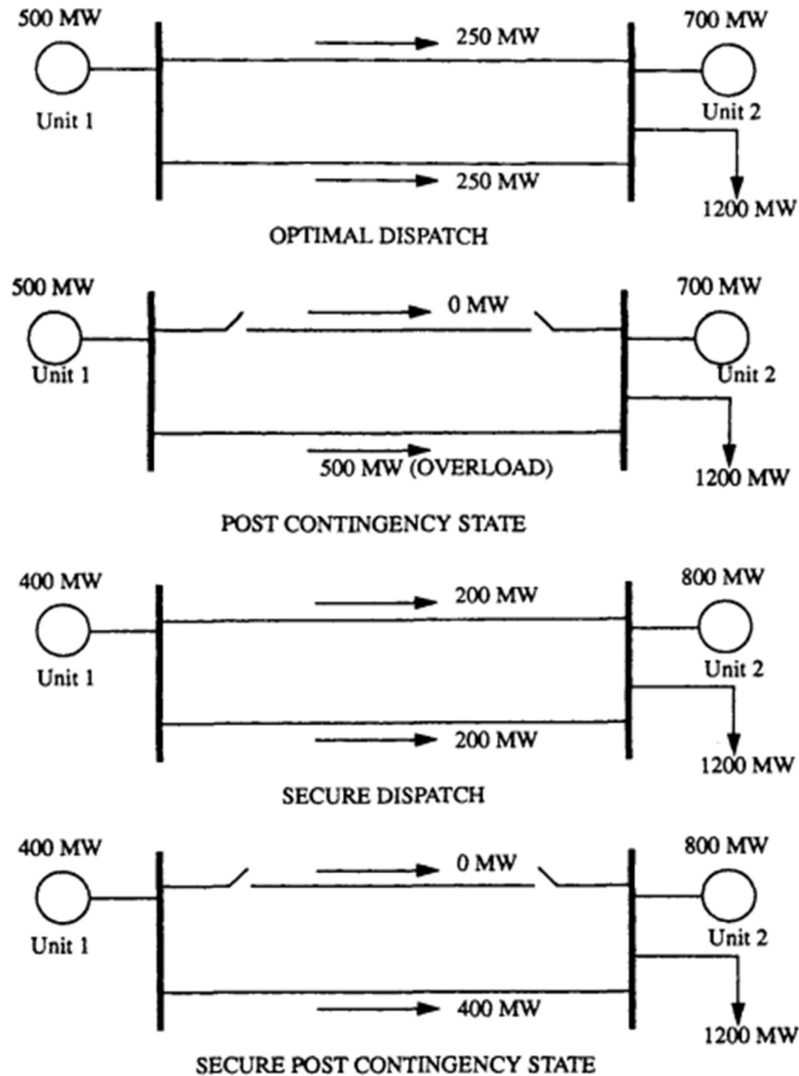
sangat singkat sehingga operator tidak sempat mengambil tindakan yang cukup cepat. Hal ini sering terjadi pada kegagalan kaskade (*cascading failures*). Karena aspek operasi sistem inilah, komputer operasi modern dilengkapi dengan program analisis kontingensi yang memodelkan potensi masalah pada sistem sebelum masalah terjadi[23].

Analisis kontingensi merupakan analisis yang menangani kejadian mendadak baik eksternal maupun internal yang terjadi selama sistem tenaga listrik beroperasi yang menyebabkan pemadaman paksa satu atau lebih peralatan. Pemadaman paksa menyebabkan komponen melebihi batas operasinya, mengisolasi beberapa area dari jaringan, pemadaman berantai, pemadaman sebagian atau bahkan total. Dua jenis pelanggaran akibat kontingensi yaitu, pelanggaran tegangan rendah dan pelanggaran batas MVA [24]. Suatu sistem kelistrikan harus dapat beroperasi sedemikian rupa walaupun terjadi *outage* pada suatu komponen atau lebih dan tidak membebani komponen lainnya, sehingga menyebabkan sistem *blackout* [25].

Selain itu, juga ada *security-constraint optimal power flow* yang dalam fungsi ini analisis kontingensi digabungkan dengan aliran daya optimal. Dalam fungsi ini berupaya untuk membuat perubahan pada penjadwalan (*dispatch*) pembangkitan yang optimal, serta penyesuaian lainnya. Tujuannya adalah agar ketika analisis keamanan dijalankan, tidak ada skenario kontingensi yang mengakibatkan pelanggaran. Untuk menunjukkan bagaimana ini bisa dilakukan, sistem tenaga terbagi menjadi empat kondisi operasi (*operating states*)[23]:

- *Optimal Dispatch*: Kondisi sistem tenaga sebelum terjadinya kontingensi apapun. Kondisi ini optimal dari segi operasi ekonomis, tetapi tidak aman.
- *Post Contingency*: Kondisi sistem tenaga setelah sebuah kontingensi terjadi. Kita mengasumsikan bahwa kondisi ini memiliki pelanggaran keamanan, misalnya saluran atau transformator yang melebihi batasnya)
- *Secure Dispatch*: Kondisi sistem tanpa adanya pemadaman (*outage*) kontingensi, namun dengan koreksi pada parameter operasi untuk mengantisipasi pelanggaran keamanan.

- *Secure Post-Contingency*: Kondisi sistem ketika kontingensi diterapkan pada kondisi operasi dasar yang telah dikoreksi (diterapkan pada kondisi penjadwalan aman)



Gambar 2.1 Kondisi Operasi dalam Sistem Tenaga[23]

Dalam solusi *post-contingency*, tindakan governor dimodelkan dengan mendistribusikan injeksi MW yang hilang ke generator lain menggunakan factor partisipasi yang telah ditentukan sebelumnya. Pemodelan semua regulasi lainnya dapat dikendalikan oleh pengguna. Tegangan dan sudut kasus dasar pada bus yang ada digunakan sebagai kondisi awal untuk aliran daya AC. Ketika terjadi

pemisahan bus, bus yang baru dibuat diberi perkiraan awal untuk tegangan dan sudut bus menggunakan nilai dasar dari bus terdekat[26].

Operator harus tahu *outage* pembangkit atau saluran mana yang akan menyebabkan aliran atau tegangan jatuh melewati batas. Untuk memprediksi efek *outage*, maka digunakan analisis kontingensi. Prosedur analisis kontingensi membuat model kontingensi tunggal (satu saluran atau generator *outage*) atau skenario kegagalan ganda (*outage* dua saluran atau generator atau satu generator dan satu saluran). Secara bergantian satu persatu hingga semua skenario pemadaman masuk akal. Untuk skenario yang diuji, prosedur analisis kontingensi akan memeriksa semua saluran dan tegangan di dalam jaringan terhadap terhadap batas masing-masing[23].

Linear sensitivity factors merupakan cara untuk mempercepat kalkulasi kemungkinan *overload*. Faktor ini menunjukkan pendekatan perubahan pada aliran daya pada saluran ketika terjadi perubahan pembangkitan pada konfigurasi jaringan. DFaktor ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu Generation Shift Factor (GSF) dan *Line Outage Distribution Factors* (LODF). Persamaan kedua jenis tersebut antara lain [23]:

- *Generation Shift Factors* $\rightarrow a_{li} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_i}$
- *Line Outage Distribution Factors* $\rightarrow d_{l,k} = \frac{\Delta f_l}{f_k^0}$

Keterangan:

l = *line index*

I = *bus index*

Δf_l = perubahan aliran daya pada saluran l ketika terjadi perubahan pembangkitan

ΔP_i = perubahan pembangkitan pada bus I

$d_{l,k}$ = *line outage distribution factor* ketika memonitor saluran l setelah terjadi *outage* pada saluran k

Δf_l = perubahan daya dalam MW pada saluran l

f_k^0 = aliran daya awal pada saluran k sebelum terjadi *outage* (*opened*)

Masalah metodologis tersulit yang harus dihadapi dalam analisis kontingensi adalah kecepatan solusi dari model yang digunakan. Masalah logis tersulit adalah pemilihan semua skenario pemadaman yang kredibel. Jika setiap

kasus pemadaman yang dipelajari membutuhkan waktu satu detik untuk diselesaikan, dan ada ribuan skenario pemadaman yang perlu diperhatikan, maka akan dibutuhkan waktu hampir 1 jam sebelum semua kasus dapat dilaporkan. Hal ini akan berguna jika kondisi sistem tidak berubah selama periode waktu tersebut. Akan tetapi, sistem tenaga terus-menerus mengalami perubahan dan operator biasanya perlu mengetahui apakah operasi sistem saat ini aman, tanpa harus menunggu jawaban terlalu lama. Waktu eksekusi analisis kontingensi yang kurang dari 1 menit untuk beberapa ribu kasus pemadaman adalah hal yang umum (tipikal) untuk teknologi komputer dan analitis pada tahun 1995[23].

Salah satu cara untuk mendapatkan kecepatan solusi dalam prosedur analisis kontingensi adalah dengan menggunakan model aproksimasi (perkiraan) dari sistem tenaga. Untuk banyak sistem, penggunaan model aliran daya DC (*DC load flow*) sudah menyediakan kemampuan yang memadai. Pada sistem semacam itu, besaran tegangan mungkin bukan menjadi perhatian utama, dan aliran daya DC memberikan akurasi yang memadai terkait aliran megawatt (MW). Untuk sistem lainnya, tegangan menjadi perhatian (masalah) dan analisis aliran daya AC (*AC load flow*) penuh diperlukan [23].

2.5 Aliran Daya Optimal dan *Linear Programming*

Aliran Daya Optimal (OPF) dianggap sebagai salah satu alat penting (krusial) dalam proses ini dan memainkan peran penting dalam operasi dan pengendalian jaringan tenaga listrik. Sejak konsep OPF diperkenalkan pada tahun 1962, OPF telah berkembang menjadi salah satu bidang yang paling banyak diteliti dan esensial dalam operasi sistem tenaga. OPF mencari cara terbaik untuk meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif (tujuan) sambil tetap memenuhi batasan-batasan *power flow* (PF) dan batasan operasional lainnya, seperti batasan tegangan, stabilitas transmisi, dan persyaratan keluaran generator minimum dan maksimum. Namun, karena nonlinieritas dari persamaan dan batasan PF, masalah OPF secara inheren bersifat non-konveks (tidak cembung) dan nonlinier. Ini berarti terdapat banyak solusi optimal lokal (*local optima*), yang membuatnya sangat sulit untuk menemukan solusi optimal global (*global optimum*) dan menjadi sebuah masalah komputasi [27][28].

Perhitungan OPF adalah bagian penting (krusial) dari pengelolaan sistem tenaga setiap hari, terutama untuk *clearing* (penyelesaian) pasar listrik. Perhitungan ini harus cepat dan andal (*reliable*) agar dapat mengimbangi permintaan dan kondisi jaringan listrik yang terus berubah. Meskipun banyak algoritma OPF canggih telah dikembangkan oleh para peneliti, operator sistem masih sangat bergantung pada metode *direct current* (DC) OPF yang hanya (memperhitungkan) megawatt (MW) selama beberapa dekade [28].

OPF menggabungkan ide-ide *economic dispatch* (ED) dan analisis PF untuk menjamin bahwa sistem tenaga beroperasi secara optimal. PF mencoba menemukan kondisi operasi yang memungkinkan dengan menyelesaikan persamaan-persamaan yang terkait dengan pembangkitan, beban, dan jaringan saluran transmisi. Seringkali, metode ini tidak memperhitungkan batasan praktis seperti batasan daya reaktif generator atau kapasitas saluran transmisi. ED berupaya untuk mengurangi biaya pembangkitan daya sambil memenuhi permintaan beban; namun, batasan aliran daya diabaikan. OPF menggunakan kedua metode ini secara bersamaan untuk menemukan jawaban terbaik atas suatu fungsi objektif, seperti meminimalkan biaya pembangkitan. Metode ini juga memperhitungkan batasan-batasan operasional seperti stabilitas transmisi, keluaran generator, dan batasan tegangan, serta batasan aliran daya. Selain itu, OPF berupaya mengoptimalkan suatu fungsi objektif tertentu, baik meminimalkan atau memaksimumkannya, sambil memenuhi batasan persamaan (*equality constraints*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraints*). Berbagai versi OPF ada, termasuk sebagai berikut [28]:

- *Static OPF* adalah jenis (OPF) yang bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi operasi optimal untuk sistem tenaga pada waktu tertentu dengan beban yang tetap (*fixed*), yang berarti (metode) ini tidak memperhitungkan variasi beban.
- *Dynamic OPF* menentukan titik operasi terbaik dengan mengoptimalkan operasi sistem tenaga selama rentang waktu yang berkelanjutan (*continuous*), dengan mempertimbangkan perubahan beban.
- AC OPF adalah jenis (OPF) yang didasarkan pada karakteristik aliran daya alami yang inheren. OPF AC menghasilkan temuan yang sangat tepat dengan memodelkan secara presisi karakteristik nonlinier dari sistem AC. AC OPF

berupaya menemukan kondisi operasi yang ideal untuk sistem tenaga AC dengan memperhitungkan aliran daya nyata (aktif) dan reaktif, level tegangan, dan sudut fasa.

- DC OPF menyederhanakan masalah aliran daya optimal dengan berkonsentrasi pada aproksimasi (pendekatan) linier dari sistem tenaga. DC OPF mengasumsikan bahwa level tegangan tetap sama dan aliran daya reaktif tidak dianggap penting (diabaikan). Hal ini memungkinkan untuk melakukan linearisasi pada persamaan aliran daya AC nonlinier yang rumit.
- AC/DC OPF adalah jenis OPF yang mengintegrasikan karakteristik dan batasan dari (sistem) DC dan AC. (Metode) ini melibatkan OPF untuk jaringan AC dan DC.
- *Transient Stability Constraint OPF (TSC-OPF)* adalah jenis OPF yang mempertahankan stabilitas dan efisiensi biaya (*cost-effectiveness*) sistem tenaga. TSC-OPF menggunakan batasan dinamis dan *steady-state* (kondisi tunak) untuk menjaga sistem tetap stabil selama dan setelah gangguan seperti *faults* (kegagalan/kerusakan) atau perubahan beban secara tiba-tiba. Dengan kata lain, (metode) ini menggabungkan elemen-elemen dari OPF statis dan dinamis.
- *Probabilistic OPF* mencari tahu (menghitung) fungsi distribusi probabilitas dari variabel-variabel dependen dengan melihat distribusi probabilitas dari beban dan ketidakpastian lainnya menggunakan *Point Estimate Method (PEM)*, metode Monte Carlo, dan *Gaussian mixture model* yang disesuaikan.
- *Stochastic OPF* adalah jenis (metode) sistem tenaga yang mengelola dan mengoptimalkan aliran daya sambil memperhitungkan ketidakpastian dalam berbagai parameter. Dibandingkan dengan OPF deterministik klasik, yang mengasumsikan nilai-nilai yang pasti (*fixed*) untuk parameter sistem, OPF stokastik mempertimbangkan ketidakterdugaan dan keacakan (*randomness*) pada input seperti permintaan beban, pembangkitan energi terbarukan, dan keandalan peralatan.
- *Deterministic OPF* adalah bentuk OPF yang mengasumsikan bahwa semua parameter sistem diketahui dan tetap (pasti). (Metode) ini tidak

mempertimbangkan ketidakpastian atau fluktuasi pada input seperti permintaan beban dan keluaran pembangkit.

- SCOPF (*Security-Constrained OPF* / Aliran Daya Optimal terbatas Keamanan) mempertimbangkan efisiensi ekonomi dan keamanan (*security*) sistem. SCOPF memperhitungkan potensi kontingensi, seperti pemadaman (outage) generator dan kegagalan saluran transmisi.

Economic Dispatch (ED) menentukan daya untuk memenuhi permintaan beban sekaligus meminimalkan biaya pembangkitan, sementara *Unit commitment* (UC) merupakan metode optimasi yang menetapkan jadwal optimal untuk unit pembangkit listrik. ED akan menentukan semua daya dari tiap unit pembangkit untuk di-*dispatch*, sedangkan UC akan memutuskan penjadwalan optimal dari keputusan untuk kapan menghidupkan atau mematikan pembangkit dan juga seberapa besar daya suatu unit pembangkit untuk meminimalkan biaya bahan bakar[29].

Pemrograman Linear (*Linear Programming*) merupakan model matematika yang mengoptimalkan (memaksimalkan atau meminimalkan) fungsi tujuan linier dengan tunduk pada kendala linier. Pemrograman linear memiliki banyak aplikasi praktis (dalam transportasi, perencanaan produksi, dll). Ini juga merupakan landasan (*building block*) untuk optimasi kombinatorial. Variabel pada model LP mewakili variabel keputusan, yaitu besaran yang akan ditentukan [30], [31].

Sebuah program linear dapat mengambil banyak bentuk yang berbeda. Pertama, kita memiliki masalah minimisasi atau maksimisasi, tergantung pada apakah fungsi tujuannya (*objective function*) adalah untuk diminimalkan atau dimaksimalkan. Kendalanya (*constraints*) dapat berupa pertidaksamaan (\leq atau \geq) atau kesetaraan (persamaan). Beberapa variabel mungkin tidak dibatasi tandanya (yaitu, mereka dapat mengambil nilai positif atau negatif) sementara yang lain mungkin dibatasi untuk menjadi non-negatif. Oleh karena itu, program linear umum dalam variabel keputusan x_1, \dots, x_n adalah sebagai berikut [31]:

Objective function:

$$\text{minimize or maximize } z = c_0 + c_1x_1 + \dots + c_nx_n$$

Subject to:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \begin{matrix} \leq \\ \geq \\ = \end{matrix} b_i \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \begin{cases} \geq 0 \\ < 0 \\ > 0 \end{cases} \quad j = 1, \dots, n$$

2.6 Value of Loss Load (VoLL)

Biaya *load shedding* dimodelkan dengan persamaan matematis dari *Value of Loss Load (VoLL)*. VoLL merupakan parameter besaran yang berguna dalam evaluasi ekonomi sistem tenaga listrik. VoLL direpresentasikan sebagai nilai kerugian yang ditanggung oleh pelanggan jika terjadi gangguan layanan listrik atau nilai rata-rata ketersediaan konsumen listrik dalam membayar guna menghindari waktu tambahan tanpa listrik. Selain itu, VoLL adalah metrik industri listrik yang dimaksudkan untuk menangkap manfaat sosial dari pengurangan pemadaman listrik dalam hal fiskal [32].

$$VoLL = \frac{GDP_{IC}}{EC_{IC}}$$

Keterangan:

VoLL = *Value of Loss Load* (\$/MWh)

GDP_{IC} = *Gross Domestic Product* (\$)

EC_{IC} = *Energy Consumption* (MWh)

2.7 Gurobi Optimizer

Gurobi optimizer adalah pustaka perangkat lunak optimisasi matematis untuk menyelesaikan masalah optimasi *mixed-integer linear and quadratic* [33]. Dengan melakukan import *library gurobipy* maka program yang menerapkan *library* tersebut dapat mengakses langsung konstanta di dalam kelas gurobi [34].

2.8 Andongan dan Jarak Bebas

Lendutan (*sag*) dari saluran transmisi udara pada sistem tenaga didefinisikan sebagai jarak antara titik-titik tumpuan saluran dan titik minimum pada saluran tersebut. Ketika sebuah saluran transmisi dipasang di antara dua

tumpuan saluran, sebuah tegangan (tarikan) akan timbul di sepanjang kawat. Jika tegangan akibat saluran transmisi melampaui batas tertentu, hal itu dapat menyebabkan kerusakan pada menara yang menopang saluran. Untuk mengurangi tegangan tersebut, lendutan sengaja diberikan pada saluran transmisi udara.

Selama transfer daya, saluran transmisi menjadi panas sehingga menyebabkan peningkatan lendutan. Jika lendutan saluran transmisi meningkat melebihi batas yang ditentukan, hal ini dapat menyebabkan kerusakan serius pada struktur dan diskontinuitas pasokan listrik. Dengan bertambahnya panjang atau lendutan saluran, reaktansi saluran meningkat. Akibatnya, aliran daya melalui saluran tersebut juga menurun, karena aliran daya melalui saluran berbanding terbalik dengan reaktansi saluran tersebut. Daya yang lebih besar dapat ditransmisikan ketika lendutan lebih rendah dari tingkat awal, sedangkan transmisi daya perlu dikurangi ketika lendutan mendekati batas untuk tujuan keamanan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengukur dan memantau lendutan sistem tenaga secara *real-time* untuk transmisi daya yang efisien dan aman [35].

Berdasarkan SPLN T5.006:2019, ruang bebas adalah ruang yang dibatasi oleh bidang vertikal dan horizontal di sekeliling dan disepanjang konduktor SUTT, SUTET, dan SUTTAS di mana tidak boleh ada benda di dalamnya demi keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT, SUTET, dan SUTTAS. Ruang bebas ditetapkan dengan mempertimbangkan[36]:

- a. Nilai D yaitu jarak vertikal lendutan konduktor maksimum
- b. Nilai C yaitu jarak bebas minimum vertikal dari lendutan konduktor maksimum
- c. Nilai L yaitu jarak minimum horizontal konduktor dari sumbu vertikal tower rangka atau tiang
- d. Nilai H yaitu jarak horizontal akibat ayunan lendutan konduktor di tengah gawang
- e. Nilai I yaitu jarak bebas minimum impuls petir atau impuls *switching*

Nilai lendutan konduktor maksimum pada beberapa tipe *tower*/tiang dapat dilihat pada tabel 2.1 Nilai lendutan maksimum ini dapat berbeda tergantung dari jarak gawang dasar dan jenis konduktor yang digunakan[36].

Tabel 2.1 Nilai konduktor maksimum berdasarkan tipe tower dan jenis konduktor

No	Tipe Tower/Tiang	Jarak Gawang Dasar (Meter)	Jenis Konduktor	Nilai Lendutan Maksimum (D) (Meter)
1	SUTT 66 kV Tiang Baja	160	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A	4.00
2	SUTT 66 kV Tiang Beton	60	(ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan	2.00
3	SUTT 66 kV Tower Rangka Baja	300	125 mm ² - 26/7	8.00
4	SUTT 150 kV Tiang Baja	200	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	6.00
5	SUTT 150 kV Tiang Beton	80		2.50
6	SUTT 150 kV Tower Rangka Baja dua Sirkuit	350		11.00
7	SUTT 150 kV Tower Rangka Baja empat Sirkuit	350		11.00
8	SUTET 275 kV Tower Rangka Baja dua Sirkuit	400	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	15.00
9	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Sirkuit Tunggal	450	A1/S2A atau A1/S2B (ACSR) atau A1/SA1A (ACSR/AS) berukuran	18.00
10	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja	450	maksimum sampai dengan 450 mm ² - 54/7	18.00

	Dua Sirkuit			
11	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Empat Sirkuit Vertika	450		18.00
12	SUTET 500 kV Tower Rangka Baja Empat Sirkuit Horizontal	450		18.00
13	SUTET 500 kV Compact Tower Rangka Baja Dua Sirkuit	320		14.69
14	SUTET 500 kV Compact Tower Rangka Baja Empat Sirkuit	320		14.69
15	SUTET 500 kV Tiang Baja Dua Sirkuit	320		14.69
16	SUTET 500 kV Tiang Baja Empat Sirkuit	320		14.69
17	SUTTAS 250 kV Sirkuit Dwikutub	400	ACSR, ZEBRA 428,9/55,59 mm ²	12.57
18	SUTTAS 500 kV Sirkuit Dwikutub	450	ACSR/AS, FALCON 806,2/102,4 mm ²	15.50

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian tugas akhir ini menggunakan satu unit laptop dengan spesifikasi; Processor Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz (2.50 GHz), RAM sebesar 16 GB, dengan *Operating System Windows 11 64-bit*; perangkat lunak Visual Studio Code v.1.105.1 sebagai *text editor* dan *compiler*; *software python v.3.10.9* sebagai bahasa pemrograman komputasi beserta *importing libraries* seperti *numpy, matplotlib, pandas, scipy, math, copy, request, gurobipy* dan *pplib*. Data yang diolah yaitu studi kasus salah satu sistem listrik di Indonesia.

3.3 Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir, yaitu terkait dengan metode penelitian yang digunakan. Literatur dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti buku, artikel ilmiah dan laporan-laporan penelitian terdahulu.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan selama penelitian bersama dosen pembimbing. Diskusi dilakukan secara berkala, mulai dari diskusi mengenai hubungan arus dan temperatur terhadap lendutan konduktor. Dengan dilakukan studi bimbingan, penulis menambah wawasan serta arahan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

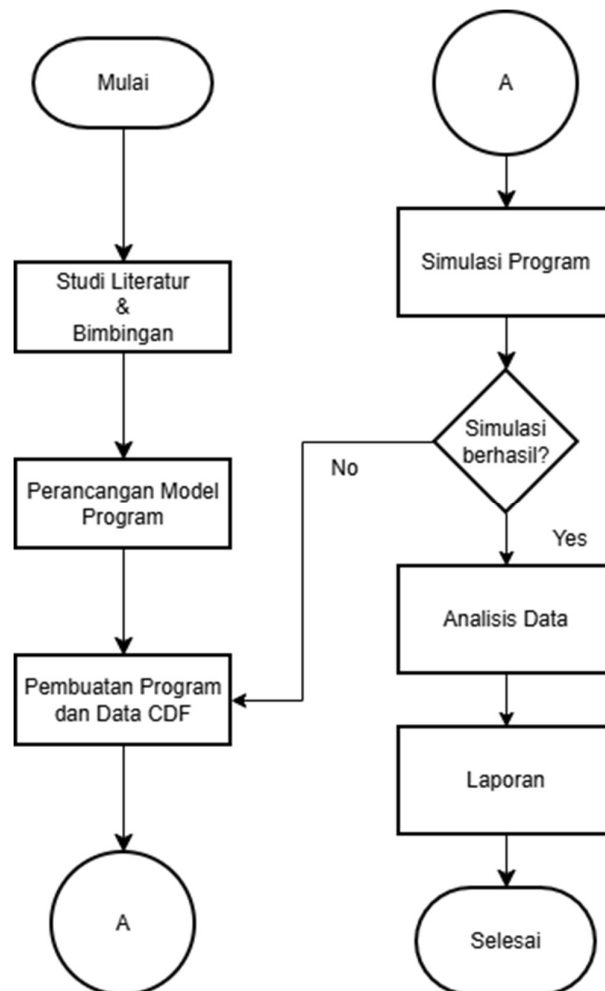
Pengumpulan data berasal dari rekap secara manual sistem kelistrikan dalam bentuk *single line diagram* diubah dalam bentuk format *cdf*. Sementara itu, data cuaca yang diambil dari *weather forecasting* BMKG. Kemudian data tersebut diolah menjadi *input data* dari program komputasi yang telah dibuat menggunakan *software python*.

4. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian dituangkan ke dalam sebuah laporan proposal penelitian. Kemudian, hasil diimplementasikan ke dalam sebuah laporan akhir penelitian/skripsi. Laporan ini merupakan dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggung jawabkan.

3.4 Diagram Pelaksanaan Penelitian

Pada gambar berikut merupakan tahap-tahap pelaksanaan kegiatan penelitian tugas akhir.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.5 Radiasi matahari dengan *clear sky model*

Dalam menerapkan dynamic line rating terhadap salirand aya optimal, perhitungan kapasitas termal konduktor akan sangat dipengaruhi oleh akurasi data cuaca, salah satunya yaitu radiasi matahari (*solar heating*). Mengingat keterbatasan data pengukuran radiasi matahari langsung (DNI) dan difus (DHI) yang tidak dimiliki oleh data ERA5 membuat pemodelan matematis diperlukan untuk mendekomposisi data *Global Horizontal Irradiance* (GHI). Sedangkan BMKG sama sekali tidak memiliki data terkait dengan iradiasi matahari (GHI). Dengan demikian, pada BMKG dilakukan pemodelan untuk mengestimasi kondisi radiasi saat langit cerah (tanpa awan), namun tetap menerapkan data yang tersedia seperti suhu, kecepatan angin, dan arah angin [37].

Formulasi *clear sky model* yang digunakan yaitu formulasi yang dikembangkan oleh Ineichen dan Perez. Model ini dapat memodelkan radiasi matahari tanpa awan dan juga dapat memisahkan ketergantungan koefisien atmosfer terhadap massa udara (*air mass*), menjadikannya lebih stabil untuk simulasi dinamis dari pagi hingga sore hari [37].

Persamaan matematis untuk *global irradiation* dirumuskan sebagai berikut:

$$G_{hc} = a_1 \cdot I_o \cdot \sin(h) \cdot \exp(-a_2 \cdot AM \cdot (f_{h1} + f_{h2}(T_L - 1)))$$

Sementara itu, untuk komponen radiasi langsung, dirumuskan dengan:

$$B_{ncl} = b \cdot I_o \cdot \exp(-0.09 \cdot AM \cdot (T_L - 1))$$

Lalu, untuk model radiasi difus diperoleh dari selisih antara radiasi global dan radiasi langsung. Sehingga, persamaan matematisnya dirumuskan dengan:

$$DHI = GHI - DNI \cdot \cos(\theta_z)$$

Untuk simulasi ERA5 yang mempertimbangkan tutupan awan aktual, maka menerapkan indeks *cloud factor* (K_c) yang didefinisikan sebagai rasio antara radiasi global aktual (G_h) dengan radiasi global saat langit cerah (G_{hc}).

$$K_c = \frac{G_h}{G_{hc}}$$

Keterangan:

a_1, a_2 = koefisien ketinggian lokasi (*altitude*)

$$f_{h1} = \exp\left(-\frac{\text{altitude}}{8000}\right)$$

$$f_{h2} = \exp\left(-\frac{\text{altitude}}{1250}\right)$$

AM = optical air mass

h = sudut elevasi matahari

I_o = solar constant (Sun – Earth distance corrected)

$\cos(\theta_z)$ = solar zenith angle

K_c = clear sky index

3.6 Analisis Dynamic Line Rating

Analisis *dynamic line rating* dilakukan dengan memasukkan persamaan yang digunakan dalam perhitungan *heat balance* dan *thermal rating*. Dengan demikian rating saluran akan ditentukan berdasarkan kondisi cuaca dan arus yang melalui konduktor tersebut.

3.6.1 Perhitungan Dynamic Line Rating

Berikut merupakan persamaan untuk menghitung keseimbangan panas (*heat balance*):

$$q_s + I^2 \times R(T) = q_c + q_r$$

Di mana:

q_j = Joule Heating (W/m)

q_s = Solar Heating (W/m)

q_c = Convective Cooling (W/m)

q_r = Radiative Cooling (W/m)

$R(T)$ = Resistansi pada temperatur T

Untuk menghitung *joule heating* menggunakan persamaan berikut:

$$q_s + q_j = q_c + q_r$$

$$q_j = q_c + q_r - q_s$$

atau

$$q_j = I^2 \times R(T)$$

Dengan demikian, persamaan untuk *ampacity (steady-state thermal rating)* yaitu,

$$I = \sqrt{\frac{q_r + q_c - q_s}{R(T)}}$$

Untuk menghitung *convection cooling* menggunakan persamaan berikut:

$$q_{c1} = K_{angle} \times [1.01 + 1.35 \times N_{Re}^{0.52}] \times k_f \times (T_s - T_a)$$

$$q_{c2} = K_{angle} \times 0.754 \times N_{Re}^{0.6} \times k_f \times (T_s - T_a) \quad W/m$$

Untuk menghitung *radiative cooling* menggunakan persamaan berikut:

$$P_r = 17.8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

Keterangan:

K_{angle} = wind direction factor

N_{Re} = Reynolds number

k_f = Thermal conductivity of air at temperature T_{film}

D_0 = Outside diameter of conductor (m)

ε = emissivity

T_s = Conductor surface temperature (°C)

T_a = Ambient air temperature (°C)

3.7 Model Aliran Daya DC (DC Power Flow)

Model *Linear Programming* (LP) OPF menggunakan persamaan aliran daya DC yang mengabaikan rugi-rugi dan daya reaktif sehingga hasilnya merupakan nilai yang linear [23].

3.7.1 Persamaan P_{flow} dan matriks B

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$[B']^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j)$$

$$P_i = \sum_{\substack{k=bus \\ \text{connected to } i}}^N P_k$$

3.7.2 Pembuatan model profil beban

Berdasarkan perolehan data yang dipublikasikan pada tanggal 5 Februari 2026, narasumber Ketua Tim Kunker Komisi XII DPR RI, Sugeng Suparwoto,

mengungkapkan bahwa kebutuhan listrik Lampung saat ini mencapai beban puncak sekitar 1300 MW [38]. Profil beban dibuat dengan pengambilan data beban pada data sistem listrik dengan format cdf dan juga menyesuaikan dengan data daya beban puncak Lampung. Karakteristik fluktuasi beban harian pada penelitian ini menerapkan penyajian profil beban yang diterapkan pada *paper IEEE Reliability Test System (RTS)* [39]. Data tersebut menyajikan pola pemakaian listrik dalam bentuk persentase beban per menitnya terhadap beban puncak harian.

$$P_{load}(i, t) = P_{base}(i) \times K_{scale} \times Ratio(t) \times \delta$$

Keterangan:

$P_{base}(i)$ = Beban aktif dasar pada bus i yang diperoleh dari data sistem

K_{scale} = Faktor skala global untuk menyesuaikan beban dasar agar mencapai beban puncak sistem riil yang ditargetkan

$Ratio(t)$ = Faktor pengali beban harian pada jam ke t

δ = Faktor variasi acak berdasarkan distribusi normal untuk simulasi fluktuasi beban yang tidak seragam antar bus

3.7.3 Model optimasi (LP-OPF)

Model optimasi menggunakan *Liner Programming* dengan *solver*-nya yaitu Gurobi Optimizer. Pada pemrograman dengan bahasa python akan memanggil library gurobipy dan mengakses langsung konstanta di dalam kelas gurobi.

- *Objective Function*

Fungsi objektif ini yaitu meminimalkan total biaya operasional atas pembangkit dan pelepasan beban

$$Min: \sum_{t=0}^{t=143} (C_{g,i} \times P_{g,(i,t)}) + \sum_{t=0}^{t=143} (C_{ls} \times P_{ls,(j,t)})$$

- Variabel Putusan

$P_{g,(i,t)}$ = Daya aktif yang dibangkitkan generator i pada waktu t

$\theta_{(i,t)}$ = Sudut fasa tegangan bus i pada waktu t

$P_{ls,(j,t)}$ = Daya beban yang dilepas pada bus i dan waktu t

- Batasan (*Constraints*)

1. Batasan *Dynamic Line Rating*

$$P_{flow(i,t)} \leq P_{DLR(i,t)}$$

2. Batasan pembangkitan

$$0 \leq P_{gen} \leq P_{gen\ max}$$

3. Batasan *ramp-rate* generator

- Ramp-Up

$$P_g(i,t) - P_g(i,t-1) \leq Ramp - up_i$$

- Ramp-Down

$$P_g(i,t) - P_g(i,t-1) \geq Ramp - down_i$$

4. Batasan *Load Shedding*

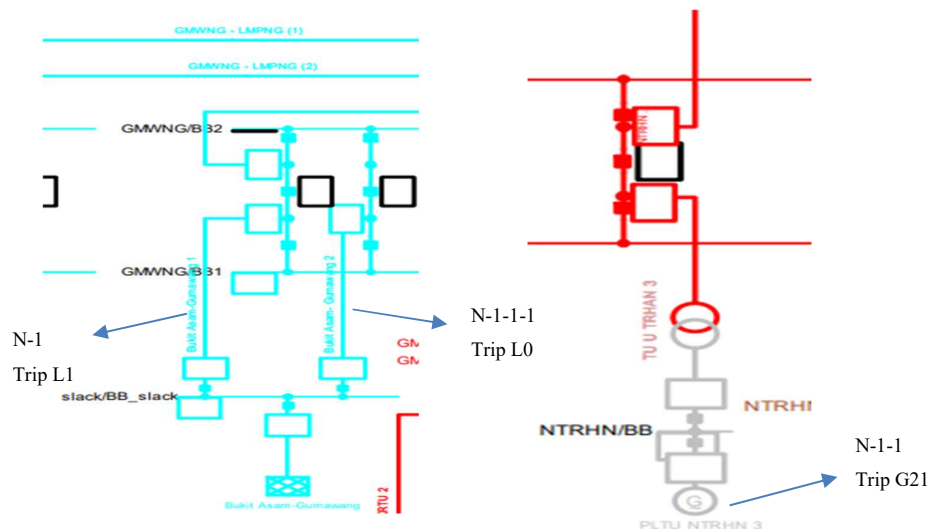
$$0 \leq P_{ls(i,t)} \leq P_{load(i,t)}$$

5. *Slack Bus*

$$\theta_{SL} = 0^\circ$$

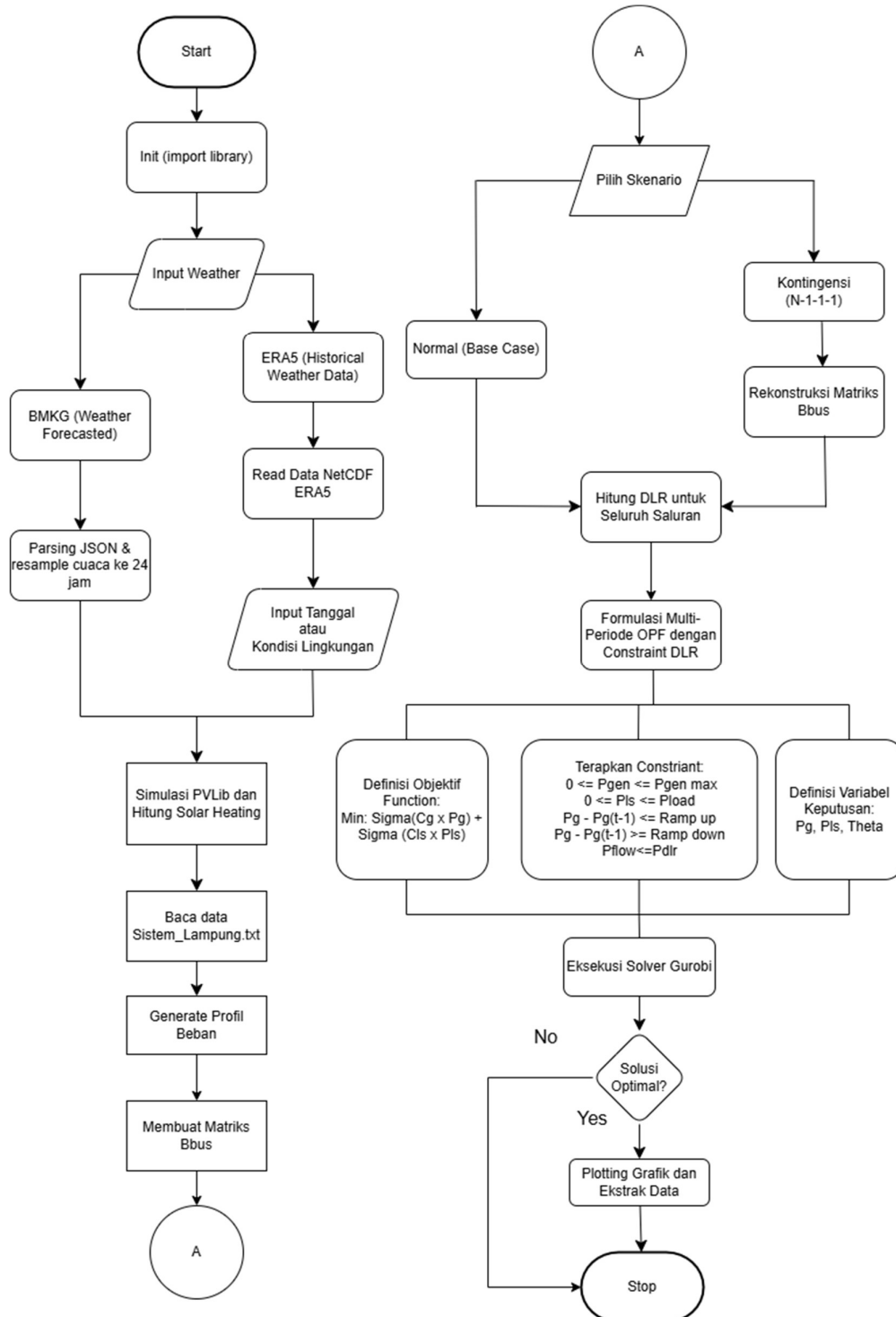
3.7.4 Skenario Simulasi

1. Skenario 1: Kondisi normal sistem (N-0), di mana sistem beroperasi dalam kondisi normal tanpa ada komponen yang mengalami *trip*.
2. Skenario 2: *Cascading Contingency* (N-1-1-1), di mana terjadi *trip* pada satu saluran yang dipilih untuk waktu (t). Model optimasi harus menghitung ulang matriks B dan *re-scheduling* pembangkit untuk waktu yang tersisa. Selanjutnya, satu generator yang *trip* untuk waktu (t). Skenario ini dimodelkan dengan $P_{gen} = 0$ untuk generator yang di-*trip*. Kemudian dilanjutkan lagi dengan *line trip*.



Gambar 3.2 Skenario Simulasi

3.8 Diagram Alir Komputasi



Gambar 3.3 Diagram Alir Komputasi

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penelitian ini berhasil membangun *framework* optimasi OPF berbasis pemrograman linear menggunakan DCPF yang terintegrasi dengan data cuaca (BMKG dan ERA5) sebagai *constraint dynamic line rating*.
2. Penjadwalan pembangkit selama 24 jam berhasil ditentukan dengan simulasi normal tidak terjadi *load shedding*, sedangkan simulasi kontingensi terjadi *load shedding*.
3. Implementasi cuaca terhadap *Dynamic Line Rating* (DLR) terbukti memberikan profil kapasitas saluran yang lebih akurat dibandingkan *Static Line Rating* (SLR). DLR mampu mendeteksi penurunan kapasitas saluran akibat faktor cuaca, misalnya pada simulasi operasi normal ERA5 di mana *capacity loss* terparah yang terjadi sebesar 27.4 MW pada pukul 2 siang yang membuat kapasitas saluran 57 pada saat itu yang awalnya 167.6 MW turun menjadi 140.2 MW.
4. Penerapan optimasi dan batasan operasi pada skenario N-1-1-1 memicu pergeseran *dispatch* yang signifikan. Pembangkit *peaker* terpaksa mengambil alih beban yang lebih besar untuk menutupi penurunan daya dari PLTU dan Interkoneksi Sumatera-Lampung.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh saran sebagai berikut:

1. Penerapan model AC OPF untuk verifikasi batas transfer daya pada skenario DLR juga dibatasi oleh kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya reaktif.
2. Integrasi dengan sistem penyimpanan energi (BESS) yang dapat menutupi defisit daya dari generator dan keterbatasan transmisi saat terjadi kontingensi. BESS dapat berguna untuk menyuplai daya saat terjadi lonjakan arus atau saat kapasitas saluran menurun drastis.
3. Mengintegrasikan algoritma *machine learning* untuk operasi sistem yang mempertimbangkan DLR dalam operasi *real-time*.
4. Penentuan lokasi *load shedding* pada OPF yang terintegrasi dengan DLR
5. Kajian terkait dampak integrasi DLR terhadap sistem proteksi, khususnya *overcurrent relay* dan *distance relay*. Studi terkait *setting pickup relay* otomatis mengikuti perubahan nilai DLR agar tidak terjadi *false tripping/symphatetic trip* saat saluran dibebani tinggi namun masih dalam batas aman DLR.
6. Verifikasi dampak fisik LP-OPF integrasi DLR terhadap *sagging*/andongan saluran transmisi. Dengan membandingkan andongan yang terjadi dengan mempertimbangkan batasan DLR terhadap hal sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Vejo *et al.*, “Experimental Study of Dynamic Line Rating Applied to High-Temperature Low-Sag Conductors,” *Energies (Basel)*., vol. 18, no. 4, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18040929.
- [2] B. Keyvani, E. Whelan, E. Doddy, and D. Flynn, “Indirect weather-based approaches for increasing power transfer capabilities of electrical transmission networks,” May 01, 2023, *John Wiley and Sons Ltd.* doi: 10.1002/wene.470.
- [3] F. Margita, L. Beňa, W. Malska, and P. Pijarski, “Possibilities of Increasing the Ampacity of Overhead Lines Using High-Temperature Low-Sag Conductors in the Electric Power System of the Slovak Republic,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/app14177846.
- [4] T. Lee, V. J. Nair, and A. Sun, “Impacts of Dynamic Line Ratings on the ERCOT Transmission System,” Jul. 2022, doi: 10.1109/NAPS56150.2022.10012241.
- [5] S. Rajendran *et al.*, “Diversifying Transmission Planning of Wind-Heavy Systems by Incorporating Dynamic Line Rating,” Oct. 2024.
- [6] Federal Energy Regulatory Commission, “78 FERC ¶ 61,110 DEPARTMENT OF ENERGY FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION Implementation of Dynamic Line Ratings,” Washington, DC, Feb. 2022. [Online]. Available: <http://www.ferc.gov>
- [7] E. Lindberg, “The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and Line Current,” 2011.
- [8] T. McJunkin, K. L. Le Blanc, R. Li, A. W. Abboud, and T. Phillips, “Integration of new technology considering the trade-offs between operational benefits and risks: A case study of dynamic line rating,” Feb. 12, 2024. doi: 10.36227/techrxiv.170775565.52164627/v1.
- [9] D. Bienstock and A. Verma, “Strong NP-hardness of AC power flows feasibility,” *Operations Research Letters*, vol. 47, no. 6, pp. 494–501, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.orl.2019.08.009.

- [10] B. Rabecq, T. Lee, and A. Sun, "Dynamic Line Ratings in AC Optimal Power Flow: Transient Temperature, Decomposition, and Large-scale Evaluation," Oct. 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2510.10832>
- [11] B. Keyvani, M. Power, and D. Flynn, "Incorporating Line Security Constraints within Network Planning for Dynamic Line Rating Systems," in *2021 IEEE Madrid PowerTech, PowerTech 2021 - Conference Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494840.
- [12] M. Sforna and M. Delfanti, "Overview of the events and causes of the 2003 Italian blackout," in *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings*, 2006, pp. 301–308. doi: 10.1109/PSCE.2006.296323.
- [13] N. Sugiantoro, R. S. Wibowo, V. Lystianingrum, E. Roviato, and S. Triwijaya, "Optimal Power Flow with Dynamic Line Rating Using Quadratically Constrained Quadratic Program Method," in *2021 1st International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System, ICE3IS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 54–59. doi: 10.1109/ICE3IS54102.2021.9649715.
- [14] X. Wu, H. Zhang, N. Diltz, and R. Roychowdhury, "Time Series Power Flow and Contingency Analysis with Weather Adjusted Line Ratings: A Synthetic WECC Case Study," 2024. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/375610241>
- [15] R. Martinez *et al.*, "Dynamic rating management of overhead transmission lines operating under multiple weather conditions," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041136.
- [16] H. Manninen, M. Lippus, and G. Rute, "Dynamic Line Rating using Hyper-local Weather Predictions: A Machine Learning Approach," May 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2405.12319>
- [17] T. Barton, "Forecasting of Dynamic Thermal Line Rating Under the Conditions of Temporal Discretization and Correlation," 2021.

- [18] A. Kirilenko, "Power System Operation Planning Considering Dynamic Line Rating Uncertainty," Canada, Mar. 2021.
- [19] R. Dupin, G. Karinisotakis, and A. Michiorri, "Overhead lines Dynamic Line Rating based on Probabilistic Day-Ahead Forecasting and Risk Assessment," 2019.
- [20] P. Castillo, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, E. Fernandez, and R. Alberdi, "Benefits of Dynamic Line Rating on System Operation," in *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 95–100. doi: 10.1109/EPEC52095.2021.9621562.
- [21] *738-2023 - IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*. IEEE, 2023.
- [22] L. Yi, T. Yuchen, Z. Wentao, G. Ruipeng, and W. Wei, "A DC Estimation Method to Improve the Accuracy of DC Power Flow," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2474/1/012058.
- [23] A. J. . Wood and B. F. . Wollenberg, *Power generation, operation, and control*. J. Wiley & Sons, 1996.
- [24] A. Q. Mohammed and A. A. Alkhazraji, "Multi Contingency Analysis In Power System Using Fast Decoupled Load Flow," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2023, no. 12, pp. 201–206, 2023, doi: 10.15199/48.2023.12.36.
- [25] * Lukumba Phiri, K. J. Nyoni, S. Tembo, and U. Shahzad, "Stochastic Quantification of Cyber Attacks Impact on Smart Grid Contingency Analysis," 2022.
- [26] V. Brandwajn, D. Ranbhise, and L. Radu, "Localization in Contingency Analysis," Aug. 29, 2025. doi: 10.36227/techrxiv.175647816.62683766/v1.
- [27] G. Papazoglou and P. Biskas, "Review and Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization in the Optimal Power Flow Problem," Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16031152.
- [28] A. Babiker, S. Ahmad, I. Ahmed, M. Khalid, M. Abido, and F. S. Al-Ismael, "Optimal_Power_Flow_A_Review_of_State-of-the-Art_Te," 2016.

- [29] C. S. Hatzilau, D. Giannakopoulos, A. Thomadakis, S. Karellas, and E. Kakaras, "A Review of Unit Commitment and Economic Dispatch in Power Systems," *Journal of Energy Research and Reviews*, vol. 18, no. 2, pp. 23–51, Feb. 2026, doi: 10.9734/jenrr/2026/v18i2495.
- [30] S. K. Tripathi and R. Kumar, "A Short Literature on Linear Programming Problem," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 10, pp. 1–5, 2023, doi: 10.4108/ew.4516.
- [31] M. Goemans, "Linear programming," 2015.
- [32] S. Suwargono and I. Garniwa, "Transmission Outage Cost Analysis Using Value of Loss Load Approach Based on Macro Economic Data," *International Journal of Electrical, Computer, and Biomedical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 141–152, Jun. 2024, doi: 10.62146/ijecbe.v2i2.48.
- [33] Gurobi and python, "Gurobi Optimizer (Gurobipy)," <https://pypi.org/project/gurobipy/>.
- [34] Gurobi, "Gurobi optimizer reference manual for python API reference," <https://docs.gurobi.com/projects/optimizer/en/current/reference/python.html>.
- [35] A. U. Mahin, S. N. Islam, F. Ahmed, and M. F. Hossain, "Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review," Jan. 01, 2022, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1049/gtd2.12271.
- [36] PT PLN (Persero), "SPLN T5.006: 2019 (ruang bebas dan jarak bebas minimum pada SUTT, SUTET, dan SUTTAS)," 2019.
- [37] P. Ineichen and R. Perez, "A NEW AIRMASS INDEPENDENT FORMULATION FOR THE LINKE TURBIDITY COEFFICIENT," 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/solener
- [38] S. Yuntavia, "Potensi Energi Listrik Terbaru jadi Kunci Kemandirian Listrik Lampung," (published) 2026 :<https://lampung.tribunnews.com/lampung/1201274/potensi-energi-terbaru-jadi-kunci-kemandirian-listrik-lampung>.
- [39] "The IEEE Reliability Test System."

- [40] Prima. Permana and Y. Pranata, “Menuju 2034, Listrik Lampung Melimpah,” Radar Lampung:https://radarlampung.bacakoran.co/read/26759/menuju-2034-listrik-lampung-melimpah#google_vignette.
- [41] Central Statistics Agency, “GRDP, EC, and Population Statistics in Lampung Province,” <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/YWtoQIRVZzNiMU5qU1VOSIRFeFZiRTR4VDJOTVVUMDkjMw==/produk-domestik-regional-bruto-per-kapita-atas-dasar-harga-berlaku-menurut-provinsi--ribu-rupiah---2022.html?year=2024>.
- [42] C. L. Anderson and J. B. Cardell, “Wind Power Uncertainty and Power System Performance,” *Engineering*, vol. 05, no. 10, pp. 41–51, 2013, doi: 10.4236/eng.2013.510a007.
- [43] D. K. Nichols and M. Brunell, “ALTI-ESS an Advanced Technology Power Plant for Grid Stabilization Applications,” 2011.
- [44] B. Matek, “Geothermal Energy Association Issue Brief: Firm and Flexible Power Services Available from Geothermal Facilities,” Washington, D.C, 2015.