

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**ANALISIS PENEMPATAN DAN KAPASITAS OPTIMAL *DISTRIBUTED*
GENERATION** BERBASIS PLTS UNTUK MITIGASI *DROP* TEGANGAN
PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL 20 KV BERDASARKAN
STANDAR SPLN 1:1995

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains Dan Teknologi



Oleh :

ABDUL HAMID KHALILULLAH
12250510335

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU**

2026

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS PENEMPATAN DAN KAPASITAS OPTIMAL *DISTRIBUTED* GENERATION BERBASIS PLTS UNTUK MITIGASI *DROP* TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL 20 KV BERDASARKAN STANDAR SPLN 1:1995

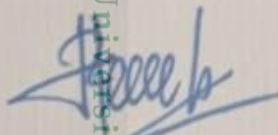
TUGAS AKHIR

Oleh:


ABDUL HAMID KHALILULLAH
12250510335

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, Pada Tanggal 14 Januari 2026

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Dr. Hj. Lilliana, S.T., M.Eng.
NIP: 19581012 200312 2 004

Pembimbing


Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP.
NIP: 19721021 200604 2 001

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENEMPATAN DAN KAPASITAS OPTIMAL DISTRIBUTED
GENERATION BERBASIS PLTS UNTUK MITIGASI DROP TEGANGAN
PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL 20 KV BERDASARKAN STANDAR
SPLN 1:1995**

TUGAS AKHIR

Oleh :

ABDUL HAMID KHALILULLAH
12250510335

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 14 Januari 2026

Pekanbaru, 14 Januari 2026

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Yuslenita Muda, S.Si., M.Sc.
NIP. 19770103 200710 2 001

Dr. Hj. Liliana, S.T., M.Eng.
NIP. 19781012 200312 2 004

Dewan Penguji :

Ketua : Dr. Fitri Amillia, S.T., M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP.

Anggota I : Dr. Kunaifi, S.T., PgDipEnSt, M.Sc.

Anggota II : Dr. Hj. Liliana, S.T., M.Eng.

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abdul Hamid Khalilullah
NIM : 12250510335
Tempat/Tgl. Lahir : Pekanbaru, 14 Mei 2004
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

ANALISIS PENEMPATAN DAN KAPASITAS OPTIMAL *DISTRIBUTED GENERATION* BERBASIS PLTS UNTUK MITIGASI DROP TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL 20 KV BERDASARKAN STANDAR SPLN 1:1995

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulis Artikel dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada Karya Tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu Artikel saya ini sah, saya nyatakan bebas dari plagiasi.
4. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Artikel saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 14 Januari 2026

Yang membuat pernyataan,



Abdul Hamid Khalilullah
NIM. 12250510335

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

ANALISIS PENEMPATAN DAN KAPASITAS OPTIMAL *DISTRIBUTED GENERATION* BERBASIS PLTS UNTUK MITIGASI *DROP* TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL 20 KV BERDASARKAN STANDAR SPLN 1:1995

ABDUL HAMID KHALILULLAH
12250510335

Tanggal Sidang: 14 Januari 2026

Prodi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Sistem distribusi radial 20 kV ULP Rumbai mengalami penurunan tegangan berlebihan pada penyulang meranti (17,76 kV/0,88 p.u., *drop* 11,20%) dan penyulang damar (17,40 kV/0,87 p.u., *drop* 13%), melampaui batas SPLN 1:1995 (maksimal 10%). Penelitian ini menganalisis penempatan dan kapasitas optimal *Distributed Generation* berbasis PLTS menggunakan metode *Newton-Raphson* pada *DIgSILENT PowerFactory* 15.0. Simulasi empat skenario penetrasi (50%, 100%, 140%, 150%) menunjukkan kapasitas optimal penyulang meranti 1.038,04 kW dan penyulang damar 1.531,168 kW (penetrasi 150%). Integrasi PLTS berhasil meningkatkan tegangan menjadi 18,00 kV (0,90 p.u.), memperbaiki faktor daya menjadi 0,98, mengurangi rugi-rugi daya aktif 8,40% dan reaktif 4,59%, serta menurunkan beban transformator menjadi 78,9% dan 60,5%. Penelitian menghasilkan perbaikan tegangan pada penyulang bermasalah menjadi batas bawah berdasarkan standar SPLN 1:1995

Kata kunci: *Distributed Generation*, PLTS, *Drop* Tegangan, Sistem Distribusi Radial, *Newton-Raphson*, *DIgSILENT PowerFactory*, SPLN 1:1995

ANALYSIS OF PLACEMENT AND OPTIMAL CAPACITY OF PLTS BASED DISTRIBUTED GENERATION TO MITIGATE VOLTAGE DROP IN 20 KV RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM BASED ON SPLN STANDARD 1:1995

ABDUL HAMID KHALILULLAH
12250510335

Tanggal Sidang : 14 Januari 2026

Prodi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

The 20 kV ULP Rumbai radial distribution system experienced excessive voltage drops in the Meranti feeder (17.76 kV/0.88 p.u., drop 11.20%) and the Damar feeder (17.40 kV/0.87 p.u., drop 13%), exceeding the SPLN 1:1995 limit (maximum 10%). This study analyzes the optimal placement and capacity of PLTS-based Distributed Generation using the Newton-Raphson method on DIgSILENT PowerFactory 15.0. Simulation of four penetration scenarios (50%, 100%, 140%, 150%) showed the optimal capacity of Meranti Feeder to be 1038.04 kW and Damar Feeder to be 1531.168 kW (150% penetration). The integration of PLTS successfully increased the voltage to 18.00 kV (0.90 p.u.), improved the power factor to 0.98, reduced active power losses by 8.40% and reactive power losses by 4.59%, and decreased the transformer load to 78.9% and 60.5%. The study validated the effectiveness of PLTS-based DG in mitigating voltage drops distribution system in accordance with SPLN 1:1995 standards.

Keywords: Distributed Generation, Solar Power Plant, Voltage Drop, Radial Distribution System, Newton-Raphson, DIgSILENT PowerFactory, SPLN 1:1995

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

KATA PENGANTAR



Assalamu 'alaikum wr.wb

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia serta hidayahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan tepat waktu. Atas karunia Allah SWT, Tugas Akhir dengan judul **“Analisis Penempatan dan Kapasitas Optimal *Distributed Generation* Berbasis PLTS untuk Mitigasi Drop Tegangan pada Sistem Distribusi Radial 20 kV Berdasarkan Standar SPLN 1:1995”** dapat diselesaikan penulis tepat waktu.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, bimbingan dan pengarahan diberikan oleh orang-orang yang memiliki pengetahuan, wawasan, dan pengalaman luar biasa, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menerima banyak bantuan, dorongan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih yang tak terhingga disampaikan kepada :

1. Kepada Allah SWT, dengan rahmat-Nya dan hidayah-Nya, telah memberikan yang terbaik sehingga penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kepada kedua orang tua ayahanda Drs, Hanifulkhair, M.T. dan ibunda Delita Febriana B.Sc Terimakasih telah selalu mendoakan dan semua pengorbanan, kepercayaan, dan nasehat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Kepada kedua saudara kandung, Khairunnisa' dan suaminya Romi Mulyadi dan Karim Abdullah dan Istrinya Windy. Terimakasih atas segala doa, motivasi, dan semangat nya dalam proses penulisan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Prof. Dr. Leny Nofianti MS., S.E., M. Si., Ak selaku Rektor UIN Suska Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya..
5. Ibu Dr. Yuslenita Muda, M.Sc selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau beserta kepada seluruh Staf dan jajarannya.
6. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau.
7. Bapak Aulia Ulah, S.T., M.Eng selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sains dan Teknologi Uin Suska Riau.

8. Ibu Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T, IPP. selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Ibu Rika Susanti, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari awal semester hingga akhir semester.
10. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada diri sendiri, atas usaha keras dan keteguhan untuk bertahan sejauh ini. Kemampuan dalam mengatur waktu, tenaga, dan pikiran memungkinkan penyelesaian Tugas Akhir ini tepat waktu.
11. Teman- teman dari SMA dan 008 yang selalu ada dimanapun kalian berada
12. Teman-Teman seperjuangan dalam Konsentrasi Energi 2022 serta teman- teman teknik elektro angkatan 2022 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna karena keterbatasan ilmu pengetahuan, kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaa.

Wassalamu'alaikum wr:wb

Pekanbaru, 14 Januari 2026
Penulis

Abdul Hamid Khalilullah
12250510335

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR RUMUS	xiii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-8
1.3 Tujuan Penelitian	I-8
1.4 Batasan Masalah	I-9
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori.....	II-8
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	II-9
2.2.2 Jaringan Distribusi	II-10
2.2.3 Studi Aliran Daya Metode <i>Newton-Raphson</i>	II-13
2.2.4 Penyusutan Energi pada Sistem Distribusi	II-16
2.2.5 Segitiga Daya dan Faktor Daya	II-19
2.2.6 Sistem Per Unit	II-21
2.2.7 Standar Tegangan PT. PLN (Persero) SPLN 1:1995	II-21
2.2.8 Pembangkit Terdistribusi (<i>Distributed Generation</i>)	II-22
2.2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	II-24
2.2.10 <i>Digsilent Power factory</i>	II-28
BAB III METODE PENELITIAN.....	III-1

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3.1	Alur Penelitian	III-1
3.2	Lokasi Penelitian	III-2
3.3	Tahapan Penelitian.....	III-2
3.4	Identifikasi Masalah	III-4
3.5	Studi Literatur.....	III-5
3.6	Pengumpulan Data.....	III-6
3.7	Pemodelan Sistem Kondisi Sebelum Menambahkan PLTS	III-10
3.8	Pemodelan Sistem Kondisi Setelah Menambahkan PLTS	III-14
3.9	Analisis Aliran Daya dan Gangguan pada Sistem	III-18
3.10	Evaluasi Hasil Simulasi dan Analisis Hasil.....	III-19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		IV-1
4.1	Hasil Simulasi Aliran Daya	IV-1
4.1.1	Parameter dan Setting Simulasi.....	IV-1
4.1.2	Kriteria Evaluasi Kinerja Sistem	IV-2
4.1.3	Proses Konvergensi Simulasi	IV-3
4.1.4	Analisis Penyebab Permasalahan	IV-6
4.2	Hasil Simulasi Aliran Daya dengan penambahan PLTS.....	IV-8
4.3	Analisis Rugi Rugi Pada Sistem	IV-26
BAB V PENUTUP		V-1
5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran	V-2
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar

Halaman

2.1	Gambar Skema sistem tenaga listrik	II-9
2.2	Gambar Jaringan distribusi tipe radial	II-10
2.3	Gambar Jaringan distribusi tipe <i>loop</i>	II-11
2.4	Gambar Jaringan distribusi tipe <i>spindle</i>	II-12
2.5	Gambar Rangkaian Ekuivalen Saluran Distribusi	II-17
2.6	Gambar Diagram Vektor Arus dan Tegangan Saluran Distribusi	II-17
2.7	Gambar Pembangkit Listrik Tenaga Surya	II-24
2.8	Gambar Spesifikasi Panel PLTS	II-26
3.1	<i>Flowchart</i>	III-4
3.2	<i>Single Line Diagram</i> ULP Rumbai	III-7
3.3	Tahapan menjalankan simulasi aliran daya	III-11
3.4	Hasil Simulasi Aliran Daya	III-13
3.5	Spesifikasi Panel PLTS	III-15
4.1	Hasil Simulasi Aliran Daya Penambahan PLTS Penyulang meranti	IV-13
4.2	Hasil Simulasi Aliran Daya Penambahan PLTS Penyulang damar	IV-14
4.3	Perkiraan Jarak Penempatan PLTS dengan Beban Meranti	IV-19
4.4	Luas Daerah yang akan dipasang PLTS Meranti 1,5 Ha	IV-20
4.5	Jarak Perkiraan Beban damar degan lokasi penempatan PLTS Damar	IV-20
4.6	Perkiraan Luas Penempatan PLTS Damar	IV-21
4.7	Ukuran Kabel dan Jenis Kabel Penghubung PLTS	IV-22
4.8	Hasil Simulasi Penambahan PLTS	IV-23

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Penelitian Terkait dalam 5 Tahun Terakhir	II-3
3.1 Hasil Simulasi Aliran Daya berdasarkan Penyulang	III-5
3.2 Jenis Konduktor AAAC / AAAC-S	III-8
3.3 Jenis Konduktor Kabel Tanah NA2XSEBY (XLPE).....	III-8
3.4 Data Impedansi Transformator	III-9
3.5 Informasi Asset Sistem Distribusi ULP Rumbai	III-9
3.6 Hasil Simulasi Aliran Daya	III-14
4.1 Hasil Simulasi Aliran Daya Berdasarkan Busbar	IV-4
4.2 Hasil Simulasi Aliran Daya Berdasarkan Penyulang	IV-5
4.3 Kapasitas Penambahan PLTS Penyulang meranti.....	IV-16
4.4 Kapasitas Penambahan PLTS Penyulang damar	IV-17
4.5 Perbandinga Sebelum dan Sesudah Penambahan PLTS.....	IV-24
4.6 Kapasitas Optimal Beban PLTS Penyulang meranti.....	IV-25
4.7 Kapasitas Optimal Beban PLTS Penyulang damar	IV-26
4.8 Perbandingan Rugi Rugi Daya Aktif sebelum dan sesudah penambanhan PLTS.....	IV-27
4.9 Perbandingan Rugi Rugi Daya Reaktif sebelum dan sesudah penambanhan PLTS.....	IV-27

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR RUMUS

Rumus

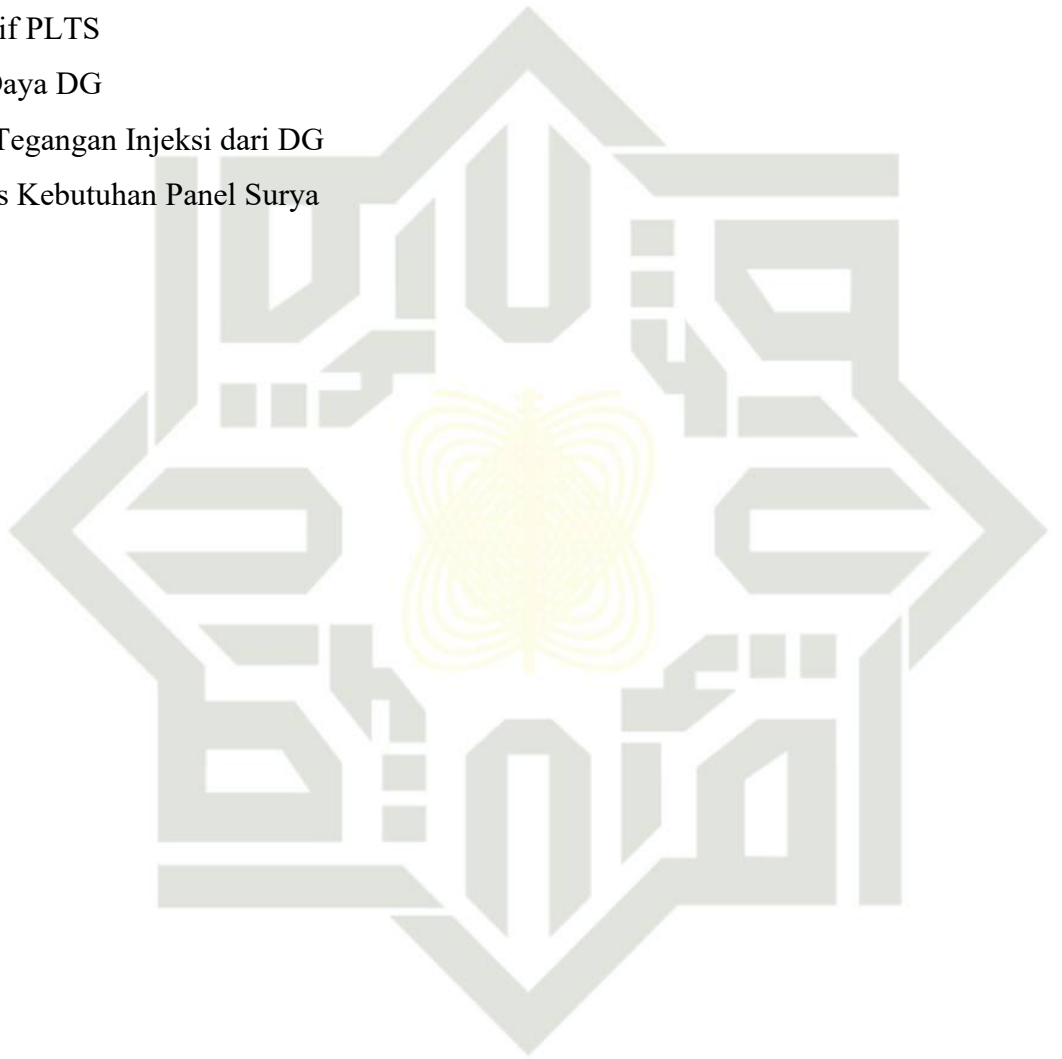
- 2.1 Persamaan Daya Aktif dan Reaktif
- 2.2 Persamaan 2.1 Kedalam Unsur Real dan Imajiner
- 2.3 Daya Aktif Kedalam Unsur Real dan Imajiner
- 2.4 Daya Reaktif Kedalam Unsur Real dan Imajiner
- 2.5 Persamaan Untuk Membentuk Matriks Jacobian
- 2.6 Persamaan Untuk Membentuk Matriks Jacobian
- 2.7 Persamaan Matriks Jacobian
- 2.8 Matrik Jacobian Dengan Nilai Tegangan Perkiraan Pada Iterasi
- 2.9 Matrik Jacobian Dengan Nilai Tegangan Perkiraan Pada Iterasi
- 2.10 Inverse Matriks Jacobian
- 2.11 Persamaan Untuk Perhitungan Iterasi Lanjutan
- 2.12 Persamaan Untuk Perhitungan Iterasi Lanjutan
- 2.13 Persamaan Ekuivalen
- 2.14 Rumus Jatuh Tegangan Saluran Distribusi Per Fasa
- 2.15 Rumus Jatuh Tegangan Saluran Distribusi Tiga Fasa
- 2.16 Rumus Jatuh Tegangan Per Fasa Dalam Satuan Pu
- 2.17 Rumus Jatuh Tegangan Tiga Fasa Dalam Satuan Pu
- 2.18 Rumus Persentase Jatuh Tegangan
- 2.19 Rugi Daya Aktif
- 2.20 Rugi Daya Reaktif
- 2.21 Daya Aktif
- 2.22 Daya Reaktif
- 2.23 Daya Semu
- 2.24 Persamaan Faktor daya
- 2.25 Perhitungan kebutuhan daya reaktif untuk perbaikan
- 2.26 Nilai Per Unit
- 2.27 Persentase Nilai Per Unit
- 2.28 Perubahan Tegangan Injeksi DG
- 2.29 Kapasitas Daya DG
- 2.30 Rumus Luas Kebutuhan Panel Surya
- 2.31 neraca daya reaktif setelah injeksi PLTS

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- 2.32 Daya Semu injeksi PLTS
- 2.33 PF Integrasi PLTS
- 3.1 Daya Aktif
- 3.2 Daya Semu
- 3.3 Daya Reaktif
- 3.4 Daya Reaktif
- 3.5 Daya Reaktif PLTS
- 3.6 Kapasitas Daya DG
- 3.7 Perubahan Tegangan Injeksi dari DG
- 3.8 Rumus Luas Kebutuhan Panel Surya



UIN SUSKA RIAU

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan subsistem kritis dalam infrastruktur sistem tenaga listrik yang berperan sebagai *interface* langsung antara sumber pembangkitan dan konsumen akhir, mencakup sektor residensial, komersial, dan industrial. Fungsi utamanya adalah mentransmisikan dan mendistribusikan energi listrik dari Gardu Induk (GI) kepada konsumen dengan mempertahankan parameter kualitas daya yang meliputi stabilitas tegangan, keandalan (*reliability*), dan kontinuitas pasokan sesuai standar yang berlaku [1].

Konfigurasi jaringan distribusi yang paling umum diimplementasikan adalah sistem radial, yang dikenal memiliki keunggulan dalam hal kesederhanaan desain dan efisiensi ekonomis. Jaringan radial dikarakterisasi dengan adanya satu jalur (*single path*) penyaluran daya listrik dari sumber pembangkitan menuju beban konsumen [2][3]. Mayoritas jaringan distribusi 20 kV Jaringan Tegangan Menengah (JTM) di Indonesia, termasuk wilayah Pekanbaru, mengimplementasikan konfigurasi sistem radial. Keunggulan utama topologi ini mencakup efisiensi biaya investasi infrastruktur, kesederhanaan skema koordinasi sistem proteksi, serta fleksibilitas dalam regulasi dan pengendalian profil tegangan jaringan [4].

Namun, kelemahan fundamental sistem radial terletak pada kerentanan terhadap degradasi kualitas daya dan tingkat keandalan yang relatif rendah dalam aspek kontinuitas layanan. Risiko kritis yang dihadapi adalah terjadinya penurunan tegangan yang signifikan, terutama pada titik beban yang berlokasi jauh dari Gardu Induk ujung penyulang, khususnya pada kondisi pembebanan puncak [5][6]. Selain peningkatan pembebanan yang signifikan pada transformator distribusi, parameter impedansi saluran yang terdiri dari resistansi, induktansi, dan kapasitansi juga berkontribusi terhadap terjadinya penurunan tegangan.

Konfigurasi jaringan distribusi radial yang mendominasi saat ini memiliki kerentanan tinggi terhadap penurunan tegangan di ujung penyulang, sebagaimana yang terjadi pada penyulang bawah, di mana *overloading* transformator dan rugi-rugi daya yang signifikan menjadi permasalahan kritis yang memerlukan mitigasi [7]. Untuk mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan jaringan, beberapa strategi mitigasi telah diimplementasikan, meliputi integrasi Pembangkit Terdistribusi (*Distributed Generation/DG*), rekonfigurasi topologi jaringan serta penambahan atau pemeliharaan kapasitas transformator distribusi [8].

Secara nasional, pemerintah Indonesia mendorong pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap untuk mencapai target bauran energi terbarukan melalui regulasi progresif, seperti Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024, yang menghapus batasan kapasitas maksimal dan menyederhanakan skema ekspor-impor listrik. Integrasi PLTS Atap ke dalam jaringan distribusi diatur melalui mekanisme sistem kuota nasional yang mulai diberlakukan sejak tahun 2024, dengan tujuan menjaga stabilitas operasional jaringan listrik sekaligus mengelola pertumbuhan kapasitas secara terukur dan terencana [9].

Integrasi PLTS ke dalam sistem distribusi dapat memberikan dampak signifikan terhadap berbagai parameter operasional jaringan. Dalam aspek profil tegangan, PLTS dapat membantu mitigasi penurunan tegangan, khususnya pada kondisi beban puncak dan pada bus-bus yang berlokasi jauh dari Gardu Induk, sehingga meningkatkan *magnitude* tegangan di setiap bus dan menjaga keandalan sistem. Pemasangan DG pada lokasi optimal dapat meningkatkan profil tegangan secara signifikan. Namun, penetrasi PLTS yang tinggi, terutama pada kondisi beban rendah dengan pembangkitan PLTS maksimal, dapat menyebabkan aliran daya berbalik (*reverse power flow*) dan berpotensi menimbulkan permasalahan tegangan berlebih [10].

Integrasi *Distributed Generation* berbasis PLTS secara signifikan meningkatkan profil tegangan dengan menaikkan magnitudo tegangan minimum, memastikan kepatuhan terhadap batas tegangan yang ditetapkan sebesar 0,90–1,05 p.u., dan mengurangi masalah penurunan tegangan. Hal ini juga menghasilkan pengurangan substansial pada rugi-rugi daya aktif dan reaktif di seluruh jaringan, sehingga meningkatkan efisiensi dan keandalan secara keseluruhan [11]. Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke sistem distribusi dapat meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya aktif secara signifikan jika penempatannya optimal. Namun, penetrasi yang tidak optimal, terutama pada pembebanan tinggi, dapat menyebabkan *overvoltage* atau tegangan melebihi batas toleransi yang direkomendasikan berdasarkan SPLN (+5% dan -10%), serta berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya [12].

Pemilihan Kota Pekanbaru sebagai lokasi penelitian memiliki justifikasi yang kuat berdasarkan beberapa pertimbangan strategis. Pertama, Provinsi Riau memiliki potensi energi surya yang sangat besar, mencapai 290,41 GWp menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), menjadikannya salah satu dari tiga wilayah paling prospektif di Indonesia untuk pengembangan energi terbarukan. Kedua, relevansi komersial wilayah ini dibuktikan dengan adanya rencana pembangunan PLTS skala besar untuk ekspor listrik ke Singapura, yang mengindikasikan kelayakan teknis dan ekonomis proyek energi surya dalam

$[13][14]$.

Data statistik yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Pekanbaru mengutip dari PLN menunjukkan pertumbuhan signifikan pada jumlah pelanggan listrik Rayon Rumbai dalam rentang waktu sepuluh tahun. Pada tahun 2014, Rayon Rumbai tercatat memiliki 36.827 pelanggan, dan jumlah ini melonjak menjadi 61.398 pelanggan pada tahun 2024. Peningkatan ini menandakan pertumbuhan sebanyak 24.571 pelanggan atau sekitar 66,72%, yang menunjukkan ekspansi substansial dalam kebutuhan dan akses layanan kelistrikan di wilayah Rumbai selama periode tersebut [17].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai salah satu bentuk Distributed Generation (DG) menawarkan solusi alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengatasi masalah voltage drop pada sistem distribusi. PLTS yang ditempatkan di ujung penyulang dapat memberikan voltage support lokal dengan cara: (1) menyuplai daya aktif langsung ke beban, (2) mengurangi arus yang mengalir dari gardu induk (GI) sehingga mengurangi potensi jatuh tegangan, dan (3) menaikkan tegangan di lokasi yang mengalami jatuh tegangan. PLTS tidak menghasilkan emisi CO₂ dan merupakan energi terbarukan yang berkelanjutan. Menurut Kementerian ESDM, target bauran energi terbarukan Indonesia adalah 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050, sehingga integrasi PLTS sejalan dengan kebijakan energi nasional.

Analisis awal mengidentifikasi dua penyulang kritis yang mengalami penurunan tegangan melampaui batas toleransi standar operasi, yaitu penyulang meranti pada busbar Gardu Hubung (GH) Rumbai (2) 20 kV dengan tegangan operasi 17,94 kV (0,897 p.u.) atau mengalami persentase penurunan tegangan sebesar 10,30%, dan penyulang damar pada busbar Gardu Induk (GI) Teluk Lembu (2) 20 kV dengan tegangan operasi 17,99 kV (0,899 p.u.) atau persentase penurunan tegangan sebesar 10,10%. Kedua nilai penurunan tegangan ini melampaui batas maksimal yang diperkenankan menurut SPLN 72:1987 yang menetapkan toleransi maksimal 10% dari tegangan nominal. Kondisi ini disebabkan oleh degradasi faktor daya sistem yang turun hingga 0,83 pada penyulang meranti dan 0,81 pada penyulang damar selama periode beban puncak, jauh di bawah standar minimum PLN sebesar 0,85 mengakibatkan peningkatan arus reaktif yang mengalir melalui saluran distribusi dan memperburuk rugi-rugi daya serta penurunan tegangan.

Penelitian ini secara spesifik berfokus pada mitigasi drop tegangan pada kondisi beban puncak melalui implementasi Distributed Generation (DG) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi sebagai kompensator daya lokal. PLTS menginjeksikan daya aktif (P) untuk mengurangi beban transformator dan arus yang mengalir dari gardu induk, dan kedua, inverter grid-tied PLTS menyediakan kompensasi daya reaktif (Q) secara dinamis untuk meningkatkan faktor daya sistem dari kondisi eksisting 0,81-0,83 menuju target 0,98, sehingga mengurangi komponen arus reaktif yang menjadi penyebab utama drop tegangan berlebihan [18].

Dampak penurunan tegangan berlebihan ini tidak hanya memengaruhi kinerja peralatan listrik konsumen yang tidak optimal, tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan peralatan elektronik sensitif, penurunan efisiensi motor listrik, dan berkurangnya umur teknis peralatan. Selain itu, rugi-rugi daya yang tinggi pada saluran distribusi mengakibatkan inefisiensi sistem secara keseluruhan dan meningkatkan biaya operasional PLN akibat kehilangan energi yang tidak dapat dijual kepada konsumen. Kondisi ini menuntut solusi teknis yang efektif untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya tanpa memerlukan investasi infrastruktur masif seperti penambahan gardu induk baru atau rekonfigurasi jaringan secara menyeluruh [19].

Pemilihan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis, dan strategis yang komprehensif. Pertama, dari aspek keekonomian teknis operasional, PLTS berfungsi sebagai Distributed Generation (DG) yang mampu menyediakan suplai daya lokal langsung pada titik beban, sehingga mengurangi arus

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
- yang mengalir dari gardu induk dan meminimalkan Voltage drop pada saluran distribusi. Berbeda dengan solusi konvensional seperti kapasitor bank yang hanya menyediakan kompensasi daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya, PLTS memberikan kontribusi ganda melalui injeksi daya aktif yang mengurangi beban transformator dan daya reaktif yang meningkatkan profil tegangan secara simultan [20].
- Kemampuan PLTS sebagai kompensator reaktif dinamis ini memberikan keunggulan signifikan dibandingkan solusi konvensional seperti kapasitor bank yang bersifat pasif dan fixed, di mana inverter modern dapat mengatur injeksi atau absorpsi daya reaktif secara real-time sesuai kondisi beban melalui kontrol volt-VAR (Voltage-Reactive Power Control) berdasarkan standar IEEE 1547-2018. Pada saat beban puncak dengan faktor daya rendah, PLTS secara otomatis meningkatkan suplai daya reaktif untuk mengkompensasi kebutuhan beban induktif, sementara pada kondisi beban rendah, inverter mengurangi injeksi reaktif untuk mencegah overvoltage. Dengan demikian, sistem distribusi dapat mempertahankan profil tegangan dalam batas operasi aman ≥ 18 kV (0,90 p.u.) dan batas minimum faktor daya 0,85 sesuai SPLN 1:1995 bahkan pada periode beban puncak yang sebelumnya mengalami penurunan tegangan kritis hingga 13%[21].
- Ekosistem riset dan pengembangan teknologi energi surya di tingkat lokal telah terbentuk, sebagaimana ditunjukkan oleh implementasi program PLTS Berbasis Kampus di Politeknik Negeri Bengkalis dan rencana pembangunan PLTS skala besar untuk ekspor listrik ke Singapura, yang mengindikasikan kelayakan teknis dan komersial proyek energi surya dalam skala masif di wilayah Riau. Kondisi ini menciptakan ekosistem pendukung yang memadai untuk implementasi PLTS, termasuk ketersediaan tenaga ahli lokal, vendor peralatan, dan kontraktor berpengalaman yang dapat mendukung keberhasilan proyek [22].
- Secara konvensional, permasalahan penurunan tegangan dan faktor daya rendah pada sistem distribusi dapat diatasi melalui beberapa metode, yaitu pemasangan kapasitor bank untuk kompensasi daya reaktif, rekonfigurasi jaringan, penambahan atau penggantian transformator, serta pemasangan Voltage regulator. Di antara solusi tersebut, kapasitor bank merupakan metode yang paling umum digunakan karena dapat meningkatkan faktor daya dan mengurangi arus reaktif yang mengalir pada saluran.
- Namun, kapasitor bank memiliki beberapa keterbatasan teknis dan operasional. Pertama, kapasitor bank hanya menyediakan kompensasi daya reaktif (kVAR) tanpa kontribusi daya aktif (kW), sehingga tidak mengurangi beban transformator secara langsung. Kedua, kapasitor bank bersifat pasif dan tidak dapat menyesuaikan output secara dinamis terhadap variasi beban, sehingga berpotensi menyebabkan overcompensation pada kondisi beban rendah

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

yang mengakibatkan overvoltage. Ketiga, kapasitor bank memerlukan perawatan rutin dan rentan terhadap kerusakan akibat harmonisa serta switching transient. Keempat, dari aspek keberlanjutan, kapasitor bank tidak berkontribusi terhadap target energi terbarukan nasional [23].

Pada Penyulang Makariki (13,37 km) membuktikan bahwa kapasitor bank mampu mereduksi drop tegangan dari 6,30% menjadi 1,55%, sementara [24] menunjukkan peningkatan tegangan dari 0,867 pu menjadi 0,912 pu dengan pemasangan kapasitor 720 kVAr pada Penyulang Singapura. Namun, metode ini memiliki keterbatasan fundamental yang diidentifikasi oleh [25] yaitu: (1) hanya menyediakan kompensasi daya reaktif (kVAr) tanpa kontribusi daya aktif (kW), sehingga tidak mengurangi loading transformator secara substansial; (2) bersifat pasif dan tidak dapat beradaptasi terhadap fluktuasi beban dinamis, berpotensi menyebabkan overcompensation dan kelebihan tegangan pada kondisi beban rendah; (3) rentan terhadap kerusakan akibat harmonisa dan switching transient yang memerlukan perawatan rutin; serta (4) tidak berkontribusi terhadap target energi terbarukan nasional.

Sebagai alternatif, integrasi Distributed Generation (DG) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menawarkan solusi yang lebih komprehensif dan berkelanjutan. PLTS memiliki beberapa keunggulan komparatif dibandingkan kapasitor bank. Pertama, PLTS menyediakan kontribusi ganda berupa daya aktif (kW) yang mengurangi beban transformator dan daya reaktif (kVAR) melalui inverter Grid-tied yang meningkatkan power factor secara simultan. Kedua, inverter modern memiliki kemampuan reactive power control yang dapat disesuaikan secara dinamis sesuai kebutuhan sistem, mencegah overcompensation dan menjaga stabilitas tegangan. Ketiga, PLTS mengurangi rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada saluran secara signifikan karena menyuplai daya lokal langsung pada titik beban, mengurangi arus yang mengalir dari gardu induk.

Dari aspek keberlanjutan, PLTS merupakan energi terbarukan yang tidak menghasilkan emisi CO₂ dan sejalan dengan target bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 sesuai kebijakan Kementerian ESDM. Pemerintah Indonesia juga telah menerbitkan regulasi progresif untuk mendorong pengembangan PLTS, seperti Peraturan Menteri ESDM No. 2 Tahun 2024 yang menghapus batasan kapasitas PLTS Atap dan menyederhanakan skema ekspor-impor listrik [9]. Provinsi Riau memiliki potensi energi surya yang sangat besar, mencapai 290,41 GWp menurut data Kementerian ESDM, menjadikannya salah satu wilayah paling prospektif di Indonesia untuk pengembangan PLTS.

Penelitian ini mengusulkan solusi mitigasi penurunan tegangan melalui penempatan dan penentuan kapasitas optimal PLTS sebagai Distributed Generation pada dua penyulang yang mengalami masalah di ULP Rumbai. Metodologi penelitian menggunakan analisis aliran daya dengan metode Newton-Raphson pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory 15.0 untuk mensimulasikan berbagai skenario penetrasi PLTS. Target utama adalah meningkatkan tegangan operasi menjadi minimal 18,00 kV (0,90 p.u.) dan perbaikan faktor daya 0,85 – mendekati 1 sesuai batas bawah SPLN 1:1995, meningkatkan power factor dari 0,83 dan 0,81 menjadi 0,98, mengurangi loading transformator menjadi di bawah 80%, serta mengurangi rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang applicable bagi PT PLN (Persero) dalam mengintegrasikan PLTS pada sistem distribusi eksisting, sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca (greenhouse gas emissions) sektor ketenagalistrikan. Selain itu, penelitian ini diharapkan menjadi referensi bagi pengembangan PLTS di wilayah lain dengan karakteristik sistem distribusi radial serupa.

Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan komprehensif tersebut, PLTS dipilih sebagai solusi optimal untuk mengatasi permasalahan penurunan tegangan dan faktor daya rendah pada sistem distribusi 20 kV penyulang meranti dan penyulang damar di wilayah ULP Rumbai. Melalui penentuan kapasitas optimal PLTS, sistem akan memperoleh voltage support dari injeksi daya aktif dan reaktif lokal yang mampu menaikkan tegangan ke level standar operasi serta memperbaiki faktor daya sistem distribusi. Solusi ini juga memberikan manfaat ganda berupa kontribusi terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca sektor ketenagalistrikan.

Berdasarkan masalah tersebut maka akan dilakukan Penelitian dengan judul “**Analisis Penempatan dan Kapasitas Optimal Distributed Generation Berbasis PLTS untuk Mitigasi Drop Tegangan pada Sistem Distribusi Radial 20 kV Berdasarkan Standar SPLN 1:1995**” Studi kasus di ULP Rumbai untuk dapat mengurangi *drop* tegangan dan rugi rugi daya pada sistem, sehingga tersalurkannya tenaga listrik yang berkualitas ke konsumen.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai pada kondisi eksisting (Sebelum Pemasangan PLTS)
2. Bagaimana dampak integrasi PLTS dengan berbagai kapasitas (50%, 100%, 140%, dan 150% dari beban puncak) terhadap profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai?
3. Berapa kapasitas optimal PLTS dan lokasi penempatan yang tepat untuk memperbaiki profil tegangan ke dalam batas standar SPLN 1:1995 pada kondisi beban puncak?
4. Bagaimana dampak integrasi PLTS terhadap pengurangan rugi rugi daya pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai pada kondisi eksisting (tanpa PLTS) untuk mengidentifikasi masalah tegangan rendah dan penurunan tegangan berlebih
2. Menganalisis dampak integrasi PLTS dengan berbagai kapasitas (50%, 100%, 140%, dan 150% dari beban puncak) terhadap perbaikan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai
3. Menentukan kapasitas optimal dan lokasi penempatan PLTS yang dapat memperbaiki profil tegangan ke dalam batas standar SPLN 1:1995 pada kondisi beban puncak untuk mengatasi permasalahan drop tegangan kritis pada sistem distribusi.
4. Menganalisis dampak integrasi PLTS terhadap pengurangan rugi rugi daya pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan fokus, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Rumbai, PT PLN (Persero) ULP Rumbai, yang bersumber dari GI Garuda Sakti

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. Parameter yang dianalisis adalah profil tegangan, *Voltage drop*, beban penyulang, dan Rugi Rugi daya
3. Penelitian tidak membahas aspek ekonomi, analisis kelayakan investasi, atau desain detail sistem PLTS (array, inverter, mounting)
4. PLTS diasumsikan sudah tersinkronisasi dengan *Grid* melalui inverter *Grid-following* sesuai standar IEEE 1547-2018 (tegangan 20 kV, frekuensi 50 Hz, sudut fasa sinkron)

Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman teknis yang lebih mendalam mengenai dampak integrasi PLTS (khususnya pada profil tegangan dan rugi-rugi daya) pada sistem distribusi radial 20kV penyulang ULP Rumbai
2. Menyediakan gambaran bagi operator jaringan distribusi mengenai potensi masalah seperti kenaikan tegangan berlebih dan manfaat seperti reduksi rugi-rugi dari penambahan PLTS pada sistem distribusi radial 20kV penyulang ULP Rumbai, yang dapat membantu dalam perencanaan dan operasi sistem

1

Penelitian Terkait

Studi tentang Analisis Aliran Daya pada Sistem Distribusi Tipe Radial 20kV untuk mengurangi *drop* tegangan dan rugi-rugi daya dengan Penambahan PLTS telah banyak dilakukan, seperti pada penelitian [26] membahas masalah peningkatan integrasi *System Photovoltaic* (PLTS) ke dalam jaringan distribusi tegangan rendah yang menyebabkan kekhawatiran tentang keandalan dan kualitas daya. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* versi 15.1 untuk memodelkan sistem distribusi radial 13-bus IEEE yang dimodifikasi, dengan PLTS terhubung pada setiap ujung beban, dan melakukan analisis aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson*. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa PLTS, tegangan bus turun di bawah 1 p.u., namun dengan penambahan PLTS, tegangan mencapai 1 p.u. saat generasi PLTS setara dengan beban. Penelitian ini membuktikan bahwa batas penetrasi PLTS optimal untuk mencegah tegangan berlebih secara umum adalah tidak melebihi 30% di atas kebutuhan beban, meskipun batas spesifik untuk setiap bus secara individual tidak dirinci.

Penelitian lainnya, membahas dampak sistem fotovoltaik PLTS atap terhadap jaringan distribusi, khususnya masalah aliran daya balik *Reverse Power Flow* (RPF) dan kenaikan tegangan *Voltage Rise* (VR) yang disebabkan oleh penetrasi PLTS yang tinggi. Aliran daya dianalisis menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* dengan metodologi studi dampak VR komprehensif pada jaringan IEEE 13-bus, melibatkan analisis sensitivitas serta penggunaan *Power Balance Index* (PBI) dan *Feeding Index* (FI). Hasil studi menunjukkan bahwa VR terjadi pada tingkat penetrasi PLTS yang tinggi, dengan profil beban residensial lebih rentan terhadap VR (60-100% penetrasi PLTS selama 3-8 jam) dibandingkan profil beban industri (90-100% penetrasi PLTS selama sekitar 1 jam), menekankan perlunya strategi mitigasi yang efektif untuk integrasi PLTS yang aman dan andal [27].

Sedangkan pada penelitian [28] membahas permasalahan dampak integrasi pembangkit terdistribusi (DG) pada kinerja jaringan listrik, termasuk profil tegangan, rugi-rugi daya, kualitas listrik, tingkat arus hubung singkat, dan keandalan sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi DG secara signifikan memengaruhi kinerja jaringan, dengan rugi-rugi daya bervariasi tergantung pada lokasi generator dan topologi jaringan. Secara spesifik, data hasil menunjukkan bahwa rugi-rugi daya transformator dapat meningkat seiring

peningkatan daya aktif turbogenerator saat terhubung yaitu dari sekitar 41.5 kW menjadi 44.5 kW, sementara rugi-rugi daya pada saluran (misalnya, L03-06) dapat menurun secara signifikan saat turbo generator terhubung dari sekitar 0.35 kW menjadi 0.05 kW, sedangkan rugi-rugi daya transformator juga meningkat seiring dengan peningkatan beban dari sekitar 0.04183 MW menjadi 0.044361 MW. Disamping itu masalah penurunan profil tegangan dan risiko aliran daya balik di jaringan distribusi akibat penetrasi tinggi sistem PLTS atap. Penelitian ini menunjukkan bahwa mengoperasikan inverter pada faktor daya 0.9 dapat mencapai perbaikan profil tegangan yang setara dengan sistem faktor daya satu, namun hanya dengan kapasitas aktif PLTS yang jauh lebih kecil (misalnya, 225 kW dibandingkan 500 kW), sambil tetap membatasi ukuran PLTS untuk menghindari tegangan berlebih dan aliran daya balik [29].

Masalah penetrasi *Photovoltaic* (PLTS) yang tinggi dapat secara serius memengaruhi kualitas jaringan distribusi, terutama menyebabkan kenaikan tegangan, gangguan frekuensi, dan peningkatan kerugian daya akibat aliran daya balik (*reverse power flow*). Untuk mempelajari efek ini, studi ini menggunakan simulasi aliran beban (*load flow*) pada sistem uji IEEE 13 *node test feeder* dengan perangkat lunak *Digsilent Power factory*. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan peningkatan integrasi PLTS, tegangan dapat melebihi batas yang diizinkan (yaitu, >1.1 p.u), frekuensi terganggu hingga melampaui 50.5 Hz, dan kerugian daya aktif total meningkat dari 111.94 kW (0 kW PLTS) menjadi 340.16 kW (800 kW PLTS). Sebagai solusi, penelitian ini merekomendasikan perlunya teknik untuk menemukan lokasi bus optimal dan daya maksimum yang diizinkan untuk diinjeksikan oleh PLTS (*Optimal Placement and Sizing*) untuk mempertahankan kualitas daya [30].

Penelitian lain lebih jauh membahas masalah lonjakan tegangan (*overVoltage*) di jaringan distribusi radial dengan penetrasi PLTS yang tinggi dan menyajikan solusi menggunakan kendali daya reaktif pada inverter PLTS, dengan membandingkan tiga metode: *Constant Power factor*, *Adjustable Power factor (PF(P))*, dan *Voltage Reactive power (Q(V))*, disimulasikan menggunakan *quasi dynamic load flow* di *DIGSILENT PowerFactory* pada sistem uji IEEE 33 Bus. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun metode *Constant PF* memberikan peredaman *overVoltage* tertinggi, metode *Voltage Reactive power (Q(V))* menghasilkan tingkat peningkatan rugi-rugi aktif dan reaktif sistem terendah (5.613% dan 5.892%). Metode *Constant PF* menghasilkan peningkatan rugi-rugi tertinggi [31].

Mengatasi masalah injeksi penetrasi PLTS ke jaringan juga dibahas pada penelitian [32] untuk mengatasi rendahnya rasio elektrifikasi dan pertumbuhan beban di Daerah X dengan menguji dampak penyambungan PLTS 1 MW pada sistem tenaga listrik eksisting.

Menggunakan simulasi *load flow* (Metode *Newton-Raphson*) dan *short circuit* pada perangkat lunak ETAP 19.0.1, peneliti menemukan bahwa solusi penyambungan PLTS berhasil meningkatkan level tegangan pada semua bus dengan rata-rata 1,42%, yang mana masih berada dalam batas toleransi standar SPLN 1:1978. Peningkatan tegangan ini dijelaskan melalui penurunan pembebanan pada transformator sistem akibat tambahan suplai dari PLTS. Namun, penyambungan PLTS juga meningkatkan arus hubung singkat pada bus 7, 9, dan 29, dengan kenaikan tertinggi sebesar 1,85% pada bus 9, sehingga perlu diperhatikan dalam penentuan setting alat proteksi.

Berdasarkan kajian beberapa penelitian tentang integrasi sistem fotovoltaik (PLTS) ke jaringan distribusi yang dirangkum pada Tabel 2.1, penelitian ini memiliki kekhususan pada analisis sistem distribusi 20 kV tipe radial di wilayah Kota Pekanbaru dengan penetrasi PLTS pada dua penyulang. Penelitian ini bertujuan menentukan kapasitas optimal PLTS untuk menaikkan tegangan sistem dan memperbaiki faktor daya, sekaligus mendukung program energi terbarukan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah injeksi PLTS.

Tabel 2.1. Penelitian terkait dalam 5 tahun terakhir

Tahun	Judul Jurnal	Metode yang Digunakan	Model Pengujian Sistem	Kontribusi	Keterbatasan
2022	<i>Analysis of Radial Distribution Test Feeders in Presence of Solar Photovoltaic Systems Using PowerFactory</i>	- <i>Load flow Analysis</i> menggunakan metode <i>Newton-Raphson</i>	<i>Modified IEEE 13-bus radial distribution system</i> (400V)	- Identifikasi batas penetrasi PLTS untuk mencegah <i>overVoltage</i>	- Asumsi beban dan jarak antar bus sama (tidak realistis)
		- Simulasi <i>DIgSILENT PowerFactory</i> v.15.1	- <i>Synchronous generator</i> 250 kVA	- <i>Voltage</i> mencapai 1 p.u. saat PLTS = beban	- Hanya menganalisis skenario statis
			- Load 5 kVA aktif, 1 kVAr reaktif	- <i>OverVoltage</i> terjadi saat PLTS > 1.3x beban	- Belum mempertimbangan profil beban dinamis
			- Jarak antar bus 0.6 km	- Visualisasi parameter real-time	- Tidak ada solusi mitigasi <i>overVoltage</i>

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tahun	Judul Jurnal	Metode yang Digunakan	Model Pengujian Sistem	Kontribusi	Keterbatasan
2023	<i>An Analysis of The Influence That Rooftop Photovoltaic Systems Have on The Characteristics Of Distribution Networks Using Digsilent Power factory</i>	- <i>Sensitivity Analysis</i>	IEEE 13-bus network	- Metode indeks PBI dan FI untuk identifikasi critical nodes	- Fokus hanya pada VR (<i>Voltage Rise</i>) dan RPF
		- <i>Power Balance Index (PBI)</i>	- Profil beban residential dan industrial	- Analisis <i>Reverse Power Flow (RPF)</i>	- Tidak menganalisis harmonisa secara detail
		- <i>Feeding Index (FI)</i>	- Data iradiasi matahari Mesir	- Perbandingan profil beban residential vs industrial	- Solusi ESB masih konseptual
		- <i>Load flow Analysis</i>	- Penetrasi PLTS: 20%-150% dari beban	- Penggunaan ESB (<i>Electric Storage Battery</i>) Tesla sebagai solusi	- Data spesifik untuk Mesir (kurang universal)
		- Time-series simulation 24 jam			
2023	<i>Evaluation of Rooftop Photovoltaic Penetration Impact on Distribution Networks Voltage Profile and The Impact of Controlling The PLTS Inverter Using DIGSILENT Software</i>	- <i>Load flow Analysis</i>	IEEE 13-bus network (6 kV)	- Perbandingan operasi inverter pada unity PF vs 0.9 PF	- Tidak mempertimbangan standar IEEE 1547 terbaru
		- <i>Reactive power Control</i>	- Beban 125% dari nominal	- Injeksi daya reaktif dapat mengurangi <i>thermal losses</i>	- Analisis terbatas pada 3 bus PLTS
		- Analisis <i>Power factor (Unity vs 0.9)</i>	- 3 turbogenerator @ 9 MVA	- <i>Voltage</i> profile lebih baik dengan PF 0.9	- Belum ada implementasi smart inverter
		- Time-series simulation 24 jam	- Penetrasi PLTS: 25%-100% dari beban	- Kapasitas PLTS dapat dikurangi	- Tidak menganalisis transient stability

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tahun	Judul Jurnal	Metode yang Digunakan	Model Pengujian Sistem	Kontribusi	Keterbatasan
				50% dengan PF 0.9	
2022	<i>Impact of Distributed Generation on the Performance of Electrical Networks</i>	- Load flow Calculation	Industrial electrical network (110/6 kV)	- Analisis <i>losses</i> pada berbagai elemen jaringan	- Fokus hanya pada power <i>losses</i>
		- Mathematical Modeling (persamaan <i>losses</i>)	- 3 turbogenerator identik @ 9 MVA	- Validasi model matematis <i>losses</i>	- Tidak menganalisis <i>Voltage</i> stability secara mendalam
		- Penetration Factor (PF) Analysis	- Multiple transformers dan transmission lines	- Hubungan proporsional antara beban transformer dan <i>losses</i>	- Studi kasus spesifik untuk jaringan industrial
		- DigSILENT PowerFactory simulation	- Beban industrial dan residential	- Identifikasi faktor Penetration Factor (PF)	- Belum ada solusi optimasi <i>losses</i>
2023	Analisa Pengaruh Penyambungan PLTS 1 MW Terhadap Arus Hubung Singkat dan Loadflow pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik 87,2 MW di Daerah X	- Metode Newton-Raphson untuk load flow	Sistem distribusi 87,2 MW Daerah X (Indonesia)	- Analisis dampak PLTS terhadap short circuit current	- Hanya menganalisis satu lokasi PLTS
		- Analisis arus hubung singkat (<i>balanced & unbalanced fault</i>)	- 29 bus (70 kV, 20 kV)	- Peningkatan tegangan pada semua bus (90-105% nominal)	- Tidak ada analisis variasi kapasitas PLTS
		- Metode komponen simetris	- PLTS 1 MW pada bus 9	- Tegangan tertinggi: Bus 2 (67,759 kV/96,8%)	- Belum mempertimbangkan profil beban dinamis

Tahun	Judul Jurnal	Metode yang Digunakan	Model Pengujian Sistem	Kontribusi	Keterbatasan
		- Simulasi <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	- Beban 125% dari nominal	- Tegangan terendah: Bus 3 (18,253 kV/91,27%)	- Tidak ada solusi mitigasi yang diusulkan
			- Standard SPLN 1:1978	- Peningkatan arus hubung singkat tertinggi pada bus 9 (1,85%)	- Data spesifik untuk satu daerah (kurang universal)
2020	<i>Reactive power Management in Radial Distribution Grid Connected Photovoltaic System</i>	- <i>Quasi Dynamic Load flow</i> (24 jam)	IEEE 33 Bus (12,66 kV)	- Perbandingan 3 metode kontrol daya reaktif	- Hanya menggunakan satu lokasi PLTS (bus 18)
		- <i>Constant Power factor</i> (0.9 leading)	- PLTS 1,8 MW pada bus 18	- Q(V) method terbaik: reduksi <i>overVoltage</i> 2,228%	- Tidak menganalisis multiple PLTS locations
		- <i>Adjustable Power factor PF(P)</i>	- Total beban: 3,715 MW & 2,3 MVAR	- Peningkatan <i>losses</i> terendah: 5,613% (Q(V))	- Belum mempertimbangkan <i>energy storage</i>
		- <i>Voltage Reactive power Q(V)</i>	- 33 bus, 32 beban	- Constant PF: <i>losses</i> meningkat 9,379%	- Tidak ada analisis harmonisa
		- <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	- Profil beban & iradiasi 24 jam	- PF(P): <i>losses</i> meningkat 7,996%	- Parameter Q(V) <i>fixed</i> (tidak adaptif)
2020	<i>Effects of High PLTS Penetration Level on Voltage and Frequency</i>	- <i>Load flow Analysis</i>	IEEE 13 Node Test Feeder	- Analisis komprehensif <i>Voltage rise & frequency fluctuation</i>	- Tidak ada solusi mitigasi yang detail

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tahun	Judul Jurnal	Metode yang Digunakan	Model Pengujian Sistem	Kontribusi	Keterbatasan
	<i>Profile of a Distribution Network</i>	- Analisis matematis <i>Voltage rise</i> (persamaan 1-10)	- Multiple PLTS locations	- Pembuktian matematis <i>Voltage rise</i> : $\Delta V = (P \times R + Q \times X) / V$	- Belum menganalisis <i>power losses</i> secara mendalam
		- <i>Frequency stability Analysis</i>	- Variasi kapasitas PLTS	- Identifikasi batas frekuensi: ± 0.5 Hz (49,5-50,5 Hz)	- Tidak ada implementasi kontrol inverter
		- <i>Reverse Power Flow Analysis</i>	- 9 loads, 10 overhead lines	- <i>Voltage</i> limit: 0,9-1,1 p.u ($\pm 10\%$)	- Studi terbatas pada steady-state
		- <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	- 2 capacitor banks	- Hubungan antara lokasi PLTS dan dampak <i>Voltage</i>	- Belum ada analisis transient stability
			- <i>Voltage</i> regulator		

Berdasarkan kajian komprehensif terhadap penelitian terkait dalam rentang 2020-2023 (Tabel 2.1), teridentifikasi tiga temuan fundamental yang menjadi landasan penelitian ini. Pertama, integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada sistem distribusi radial terbukti secara empiris mampu meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya, sebagaimana divalidasi oleh Shinde dan Mane [26] yang menemukan batas optimal penetrasi PLTS sebesar 130% dari beban untuk mencegah *over voltage* pada sistem IEEE 13-bus, serta Bekher et al [27]. yang mengidentifikasi bahwa profil beban residensial lebih rentan terhadap *Voltage rise* (60-100% penetrasi PLTS selama 3-8 jam) dibandingkan profil beban industri. Kedua, metode *Newton-Raphson* pada perangkat lunak *DIgSILENT PowerFactory* telah menjadi standar industri untuk analisis aliran daya dengan konvergensi cepat dan akurasi tinggi di mana Acsinte et al [28]. membuktikan bahwa rugi-rugi daya saluran dapat berkurang signifikan dari 0,35 kW menjadi 0,05 kW dengan penempatan DG yang optimal, sementara rugi-rugi transformator meningkat dari 41,5 kW menjadi 44,5 kW seiring peningkatan daya aktif terdistribusi. Ketiga, strategi kontrol daya reaktif inverter PLTS, khususnya metode

Voltage Reactive power $Q(V)$, terbukti superior dalam meminimalkan peningkatan *losses* sistem (5,613%) dibandingkan metode *Constant Power factor* (9,379%)[31].

Terdapat empat gap penelitian kritis yang belum teratasi: (1) mayoritas studi menggunakan sistem benchmark teoritis (IEEE 13-bus, IEEE 33-bus) dengan asumsi beban dan jarak antar bus yang seragam [19], [20], [23], [24] yang tidak merepresentasikan kompleksitas jaringan distribusi riil Indonesia dengan karakteristik beban tidak seimbang, variasi panjang saluran ekstensif, dan kondisi geografis tropis, (2) penelitian domestik seperti Purwo dan Sitompul [32] hanya menganalisis satu lokasi PLTS (1 MW pada bus 9) tanpa optimasi multi-skenario kapasitas dan variasi penetrasi, menghasilkan peningkatan tegangan rata-rata 1,42% namun juga peningkatan arus hubung singkat 1,85% yang memerlukan evaluasi rating proteksi, (3) belum ada kajian yang mengintegrasikan aspek teknis mitigasi *Voltage drop* dengan regulasi terbaru Peraturan Menteri ESDM No. 2 Tahun 2024 tentang penghapusan batasan kapasitas PLTS Atap dan potensi energi surya lokal Riau (290,41 GWp) [13].

Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan melakukan analisis komprehensif penempatan dan kapasitas optimal PLTS pada sistem distribusi radial 20 kV ULP Rumbai menggunakan metode *Newton-Raphson* pada *DIGSILENT PowerFactory* 15.0, dengan simulasi empat skenario penetrasi (50%, 100%, 140%, 150% beban puncak) untuk mengatasi permasalahan *drop* tegangan, mengurangi rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem, meningkatkan faktor daya dari kondisi eksisting 0,85 menjadi target 0,98, serta menurunkan *loading* transformator ke zona aman <80%, sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional 23% (2025) dan 31% (2050) melalui pemanfaatan potensi iradiasi matahari optimal di wilayah ekuator Indonesia dengan mempertimbangkan aspek teknis, dan keberlanjutan lingkungan.

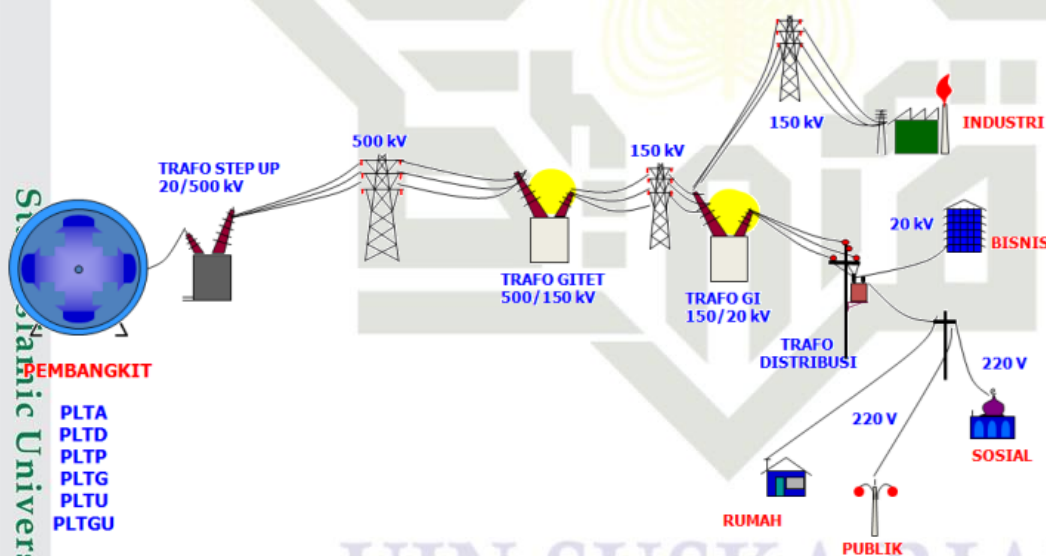
2.2 Landasan Teori

Bertujuan untuk memberikan landasan teoritis dan literatur yang mendukung penelitian tentang analisis studi aliran daya pada sistem distribusi tipe radial dengan penambahan *Photovoltaic* (PLTS). Tinjauan mencakup konsep dasar aliran daya, metode *Newton-Raphson*, karakteristik sistem distribusi radial, integrasi PLTS, serta perangkat lunak simulasi *DIGSILENT PowerFactory*. Sumber literatur diambil dari buku teks, jurnal, dan sumber akademik terpercaya.

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terdiri dari sejumlah bagian yang saling terhubung, seperti jaringan transmisi, jaringan distribusi, gardu induk, dan unit pembangkit, yang bekerja sama untuk memasok listrik kepada klien berdasarkan permintaan. Unit pembangkit adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang menghasilkan listrik dengan mengubah energi primer menjadi energi listrik menggunakan generator yang digerakkan turbin. Saluran transmisi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari konduktor yang direntangkan di antara gardu induk atau antara pembangkit listrik dan gardu induk pusat beban.

Tujuannya adalah untuk mendistribusikan daya atau energi listrik dari pembangkit ke gardu induk pusat beban atau antar gardu induk. Gardu induk adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari transformator penurun tegangan yang terletak di antara jaringan transmisi dan jaringan distribusi, serta peralatan untuk menghubungkan dan memutuskan daya listrik. Konduktor yang membentang dari gardu induk ke lokasi pelanggan membentuk jaringan distribusi, bagian dari sistem tenaga listrik. Jaringan distribusi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat beban gardu induk ke lokasi pelanggan atau konsumen listrik [33].



Gambar 2.1 Skema sistem tenaga listrik [33]

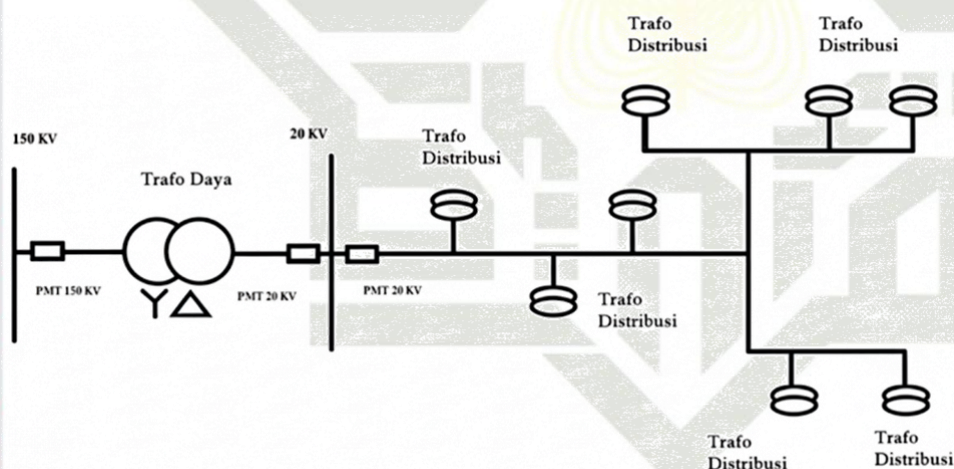
Desain dasar sistem tenaga listrik terintegrasi ditunjukkan pada Gambar 2.1, yang memperlihatkan bagaimana energi dikonversi dan didistribusikan dari hulu (pembangkitan) ke hilir (beban konsumen). Unit pembangkit, jaringan transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi hanyalah beberapa bagian yang saling terkait dari sistem ini yang bekerja sama untuk memasok kebutuhan daya berdasarkan permintaan beban.

4.2.2 Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi berdasarkan letak jaringan menuju posisi gardu distribusi dibedakan menjadi dua jenis yaitu Jaringan distribusi primer (jaringan distribusi tegangan menengah) dan Jaringan distribusi sekunder (jaringan distribusi tegangan rendah). Jaringan distribusi primer (JDTM) mendistribusikan daya listrik tegangan menengah (misalnya, 6 kV atau 20 kV) dan terletak sebelum gardu induk distribusi. Saluran transmisi, yang menghubungkan gardu induk distribusi atau gardu induk switching (sisi primer transformator distribusi) ke gardu induk (transformator sekunder), dapat berupa saluran udara atau kabel bawah tanah. Gardu induk distribusi diikuti oleh jaringan distribusi sekunder (JDTR), yang mendistribusikan daya listrik bertegangan rendah (misalnya, 220 V/380 V). Gardu induk distribusi, yang merupakan sisi sekunder dari transformator distribusi, terhubung ke lokasi pengguna atau konsumen (seperti rumah atau bisnis) melalui kabel udara atau kabel bawah tanah [34].

Berdasarkan konfigurasi jaringan, maka sistem jaringan distribusi dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu sistem jaringan distribusi radial, loop dan spindel.

1. Jaringan distribusi tipe radial



Gambar 2.2 Jaringan distribusi tipe radial [35]

Gambar 2.2 merupakan struktur jaringan yang paling sederhana, paling populer, dan paling murah adalah jaringan distribusi tipe radial. Saluran ditarik secara radial dari satu titik sumber dan bercabang ke lokasi beban yang disuplai, struktur ini dikenal sebagai radial. Catu daya berasal dari satu titik sumber, dan karena cabang-cabang ini, arus beban yang mengalir di sepanjang saluran tidak merata. Hal ini menyebabkan konduktor dalam jaringan radial ini

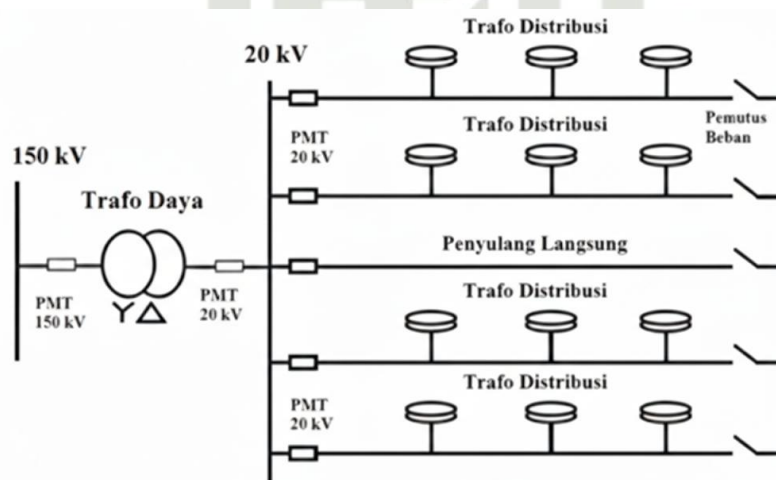
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
Siska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Jaringan distribusi tipe Spindel

Kota-kota besar paling cocok untuk kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang dikenal sebagai jaringan distribusi spindel. Semua saluran di gardu induk (GI) terbuka dalam kondisi normal, memungkinkan operasi radial semua SKTM. Sebagai sumber daya cadangan untuk gardu induk, saluran ekspres seringkali dibongkar dan dihubungkan ke rel di sana. Sakelar beban di kedua ujung bagian SKTM yang mengalami gangguan dibuka. Gardu induk kemudian memasok bagian-bagian di sisi gardu induk (GI), sementara saluran ekspres memasok bagian-bagian di gardu induk [34].



Gambar 2.4 Jaringan distribusi tipe *spindle* [35]

Gambar 2.4 menunjukkan konfigurasi jaringan distribusi tipe spindle, yang merupakan salah satu tipe jaringan distribusi tegangan menengah yang umum digunakan di daerah perkotaan dengan kepadatan beban tinggi. Karakteristik utama jaringan distribusi spindle adalah semua saluran di gardu induk (GI) dalam kondisi normal terbuka, memungkinkan operasi radial pada seluruh kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM), dengan saluran ekspres di gardu induk berfungsi sebagai sumber daya cadangan yang dapat dihubungkan ke rel untuk memasok bagian jaringan yang mengalami gangguan. Sakelar beban di kedua ujung segmen SKTM yang terganggu akan dibuka, sehingga gardu induk dapat memasok bagian di sisi gardu induk, sementara saluran ekspres memasok bagian di sisi gardu induk lainnya. Konfigurasi ini memungkinkan peningkatan keandalan sistem distribusi dengan meminimalkan luasnya pemadaman saat terjadi gangguan, serta penggunaan kabel bawah tanah yang juga meningkatkan estetika lingkungan perkotaan.

2.2.3 Studi Aliran Daya Metode *Newton Raphson*

Terdapat beberapa cara untuk merumuskan persamaan jaringan secara metodelis. Meskipun demikian, teknik tegangan simpul sering digunakan karena merupakan bentuk yang paling tepat untuk beberapa evaluasi sistem tenaga. Persamaan aljabar linear simultan yang kompleks dalam hal arus simpul diperoleh dengan merumuskan persamaan jaringan dalam hal admittansi simpul. Rangkaian persamaan linear untuk tegangan simpul dapat diselesaikan setelah arus simpul diidentifikasi.

Namun daya, bukan arus, yang diketahui dalam sistem tenaga listrik. Akibatnya, persamaan berbasis daya yang dihasilkan, terkadang disebut persamaan aliran daya, bersifat nonlinier dan membutuhkan solusi iteratif. Fondasi analisis dan desain sistem tenaga listrik adalah studi aliran daya, yang sering dikenal sebagai studi aliran beban. Perencanaan, operasi, penjadwalan ekonomi, dan pertukaran listrik antar utilitas semuanya bergantung pada penelitian ini. Selain itu, beberapa analisis tambahan, termasuk studi kontingensi dan stabilitas transien, memerlukan analisis aliran daya [36].

Metode *Newton-Raphson* adalah teknik yang paling banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah aljabar nonlinier simultan. Pendekatan *Newton* merupakan proses aproksimasi sekuensial yang menggunakan ekspansi deret Taylor dan estimasi awal variabel yang tidak diketahui. Metode *Newton-Raphson* merupakan salah satu metode untuk menyelesaikan aliran daya pada sistem tenaga yang lebih besar dan linier metode ini memiliki metode perhitungan lebih baik. Metode ini lebih cepat dalam hal konvergensi dan persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Pada suatu bus yang mana nilai tegangan dan daya reaktif tidak diketahui, nilai real dan imajiner tegangan untuk setiap iterasi didapatkan dengan menghitung nilai daya reaktif terlebih dahulu.

$$P_i + jQ_i = \left(Y_{ii}V_i + \sum_{n=1, n \neq i}^n Y_{in}V_n \right) V_i \quad (2.1)$$

Dimana $i=n$, sehingga diperoleh :

$$P_i = V_i \sum_{n=1}^n Y_{in} V_n$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$Q_i = \text{Im}\{V_i \sum_{n=1}^n Y_{in} V_n\}$$

Untuk menerapkan metode *Newton-Raphson* dalam menyelesaikan persamaaan aliran daya, tegangan bus dan admitansi saluran dalam bentuk positif. Selanjutnya menguraikan persamaan (2.1) ke dalam unsur *real* dan *Imajiner* dan diperoleh:

$$V_i = |V_i| < \delta_i$$

$$V_n = |V_n| < \delta_n$$

$$V_{in} = |Y_{in}| < \theta_{in}$$

Dan didapatkan:

$$P_i V_i = \sum_{n=1}^n |V_i V_n Y_{in}| \angle \theta_{in} + \delta_n \delta_i \quad (2.2)$$

$$P_i = \sum_{n=1}^N |V_i| |V_n| |Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.3)$$

$$Q_i = \sum_{n=1}^N |V_i| |V_n| |Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.4)$$

Langkah awal perhitungan aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson* dapat dilihat pada persamaan (2.3) dan (2.4). Penyelesaian aliran menggunakan proses iterasi (k+1). Untuk iterasi pertama menggunakan nilai k=0 merupakan nilai perkiraan awal yang diterapkan sebelum dimulai perhitungan aliran daya.

Diperoleh nilai $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ dari hasil perhitungan daya menggunakan Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4). Hasil ini digunakan untuk menghitung nilai $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ menggunakan Persamaan berikut:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,diberikan} - P_{i,hitung}^{(k)} \quad (2.5)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,diberikan} - Q_{i,hitung}^{(k)} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.5) dan Persamaan (2.6) akan membentuk matriks *Jacobian*. Persamaan matriks *Jacobian* disusun sebagai berikut:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\begin{bmatrix} P_i^{(k)} \\ \vdots \\ P_n^{(k)} \\ Q_i^{(k)} \\ \vdots \\ Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_i|} & \cdots & \frac{\partial P_i^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_i|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_i|} & \cdots & \frac{\partial Q_i^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_i|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ \vdots \\ \delta_n^{(k)} \\ |V_n^{(k)}| \\ \vdots \\ |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Secara umum persamaan (2.1) dapat disederhanakan dalam bentuk:

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

Unsur *Jacobian* didapat dari turunan parsial Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4) kemudian memasukkan nilai tegangan perkiraan pada iterasi pertama. Dari Persamaan (2.7) dan Persamaan (2.8) dapat di definisikan matriks *Jacobian* sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} = |V_i||V_n||Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{n=1, n \neq i}^N |V_i||V_n||Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.9)$$

Bentuk umum yang serupa dapat diperoleh dari persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4) sehingga dapat dicari untuk submatriks *Jacobian* yang lain.

Setelah mendapatkan nilai matriks *Jacobian* selanjutnya dilakukan perhitungan pada nilai $\delta^{(k)}$ dan $|V|^{(k)}$ dengan cara melakukan inverse matriks *Jacobian*, sehingga diperoleh bentuk persamaan (2.10):

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P^{(k)} \\ Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Setelah nilai $\delta^{(k)}$ dan $|V|^{(k)}$ didapat, selanjutnya dihitung nilai tersebut untuk iterasi berikutnya, yaitu dengan menambahkan nilai $\delta^{(k)}$ dan $|V|^{(k)}$ sehingga diperoleh Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12):

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2.11)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} \quad (2.12)$$

Hasil perhitungan Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12) digunakan kembali dalam proses iterasi selanjutnya, yaitu dengan memasukkan nilai hasil ke dalam Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4) sebagai Langkah awal perhitungan aliran daya. Proses ini dilakukan secara terus menerus sampai diperoleh nilai yang konvergen.

Dapat disimpulkan penyelesaian aliran daya menggunakan Metode *Newton-Raphson* dapat dilakukan dengan Langkah-langkah sebagai berikut:

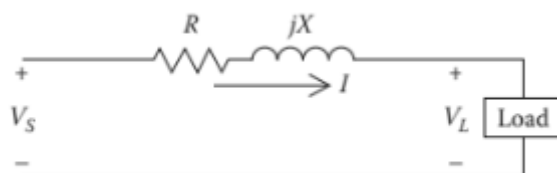
1. Hitung nilai-nilai $P_{dihitung}$ dan $Q_{dihitung}$ yang mengalir ke dalam sistem pada setiap bus untuk nilai yang diperkirakan dari besar tegangan (V) dan sudut fasanya (δ) untuk iterasi pertama atau nilai tegangan yang ditentukan paling akhir untuk iterasi berikutnya
2. Hitung Δp pada setiap rel
3. Hitung nilai-nilai untuk *Jacobian* dengan menggunakan nilai-nilai perkiraan atau yang ditentukan dari besar dan sudut fasa tegangan dalam persamaan untuk turunan parsial yang ditentukan dengan persamaan diferensial Persamaan (2.10) dan Persamaan (2.11)
4. *Inverse* matriks *Jacobian* dan hitung koreksi koreksi tegangan δ_i dan $|V_i|$ pada setiap rel
5. Hitung nilai yang baru $|V_i|$ dan δ_i dengan menambahkan nilai δ_i dan $|V_i|$ pada setiap rel
6. Kembali ke Langkah 1 dan ulangi proses tersebut dengan menggunakan nilai besar dan sudut fasa tegangan yang ditentukan oleh nilai hasil terakhir sehingga semua nilai yang diperoleh lebih kecil dari indeks ketepatan yang dipilih

2.2.4 Penyusutan Energi pada Sistem Distribusi

Pada sistem penyaluran energi listrik ke konsumen yang menggunakan jaringan yang luas akan mengalami rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan rugi rugi daya pada saluran dan trafo yang digunakan. Rugi rugi daya yang terdapat pada saluran distribusi yaitu rugi rugi daya listrik dan rugi rugi tegangan saluran. Rugi rugi tegangan saluran juga dikenal dengan istilah jatuh tegangan (*Drop Voltage*). Rugi rugi daya yang terjadi pada sistem distribusi

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

berpengaruh terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirim ke konsumen serta buruknya kualitas tegangan yang melebihi batas ketetapan toleransi mengakibatkan tidak optimalnya kerja pada elektronik konsumen. Selain dari pada itu Rugi-rugi dalam sistem jaringan distribusi disebabkan oleh resistansi, reaktansi, dan kapasitansi pada saluran distribusi. Nilai kapasitansi kecil dan dapat diabaikan. Untuk menyederhanakan analisis jaringan distribusi tiga fasa, rangkaian ekuivalen satu fasa dapat dibuat sebagai berikut [37]:



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Saluran Distribusi [37]

Dari Gambar 2.5 maka didapat persamaan berikut:

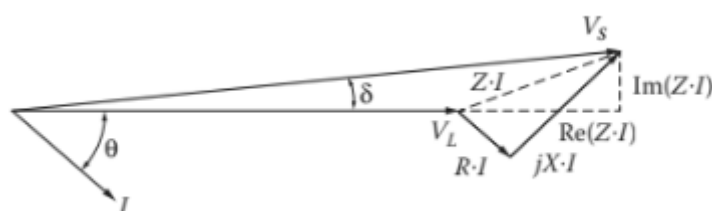
$$V_S = V_R + I \cdot Z \quad (2.13)$$

$$Z = R + jX$$

Besarnya tegangan yang hilang pada saluran listrik yang menyebabkan perbedaan antara tegangan transmisi dan tegangan penerimaan dikenal sebagai penurunan tegangan. Penurunan tegangan pada saluran listrik berbanding terbalik dengan luas penampang konduktor dan berbanding lurus dengan beban dan panjang saluran. Penurunan tegangan terdiri dari dua bagian:

(I . R) rugi tegangan akibat tahanan saluran

(I . X) rugi tegangan akibat reaktansi induktif saluran



Gambar 2.6 Diagram Vektor Arus dan Tegangan Saluran Distribusi [37]

Pada Gambar 2.6 dapat diperhatikan persamaan tegangan yaitu :

$$V_S = V_R + I \cdot R \cdot \cos \theta + I \cdot X \cdot \sin \theta$$

$$V_S = V_R + I (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta)$$

$$V_S - V_R = I (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta)$$

$$\Delta V = I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

sehingga jatuh tegangan saluran distribusi (ΔV) per fasa adalah:

$$\Delta V_{1\phi} = I(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (\text{volt}) \quad (2.14)$$

Atau, jatuh tegangan saluran distribusi (ΔV) dengan sistem 3 fasa adalah:

$$\begin{aligned} \Delta V_{3\phi} &= \sqrt{3} \cdot \Delta V_{1\phi} \\ \Delta V_{3\phi} &= \sqrt{3} \cdot I(R \cos \theta + X \sin \theta) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Atau, keterangan,

$$\cos \theta = \text{faktor daya}$$

Besarnya jatuh tegangan pada saluran distribusi per fasa atau 3 fasa dapat dinyatakan dalam per unit (pu) atau dalam persentase (%), yaitu:

$$\Delta V_{pu} = \frac{\Delta V(1\phi)}{V_p} \text{ pu} \quad (2.16)$$

Atau,

$$\Delta V_{pu} = \frac{\Delta V(3\phi)}{V_p} \text{ pu} \quad (2.17)$$

Atau,

$$\% \Delta V = V_{pu} \times 100 \quad (2.18)$$

Kehilangan daya yang signifikan terjadi saat listrik didistribusikan. Hal ini menyebabkan kehilangan daya yang besar karena cakupan wilayah jaringan distribusi yang luas. Ada dua jenis kehilangan daya pada jaringan distribusi.

1. Rugi Daya Aktif

$$P_{\text{loss}} = I^2 R \quad (2.19)$$

Besar rugi daya aktif ditentukan oleh kuadrat arus dan resistansi saluran yang merupakan representasi jarak saluran. Resistansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

2. Rugi Daya Reaktif

$$Q_{\text{rugi-rugi}} = I^2 X \quad (2.20)$$

Besar rugi daya aktif ditentukan oleh kuadrat arus dan reaktansi saluran yang merupakan representasi jarak saluran. Reaktansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

1.2.5 Segitiga Daya dan Faktor Daya

Dalam sistem tenaga listrik arus bolak-balik (AC), daya listrik terbagi menjadi tiga komponen fundamental yang saling berkaitan: daya aktif (*active power*), daya reaktif (*reactive power*), dan daya semu (*apparent power*). Daya aktif atau daya nyata (P) merupakan daya yang benar-benar dikonversi menjadi energi berguna seperti panas, cahaya, atau kerja mekanik, diukur dalam satuan Watt (W) atau kiloWatt (kW). Daya reaktif (Q) adalah daya yang bersilasi antara sumber dan beban induktif atau kapasitif tanpa melakukan kerja nyata, namun diperlukan untuk pembentukan medan magnet pada motor, transformator, dan peralatan induktif lainnya, diukur dalam satuan *Volt-Ampere Reactive* (VAR) atau kiloVAR (kVAR)[38][39]. Daya semu (S) merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus total dalam sistem, yang mencerminkan kapasitas daya maksimum yang harus disediakan oleh pembangkit dan peralatan distribusi, diukur dalam satuan Volt-Ampere (VA) atau kiloVolt-Ampere (kVA). Hubungan matematis antara ketiga komponen daya ini dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (2.21)$$

Rumus ini menyatakan Daya Aktif dengan satuan Watt (W). Daya aktif adalah daya listrik yang sebenarnya dikonsumsi oleh beban untuk melakukan kerja nyata, seperti memutar motor, memanaskan elemen pemanas, atau menyalakan lampu. ini adalah daya yang dihasilkan oleh panel surya (PLTS) dan dikirim ke beban. Cos Phi disebut sebagai Faktor Daya (*Power factor*).

$$Q = V \times I \times \sin \phi \quad (2.22)$$

Rumus ini menyatakan Daya Reaktif dengan satuan VAR (Volt-Ampere Reactive). Daya ini tidak digunakan untuk kerja nyata, melainkan "memantul" bolak-balik antara sumber dan beban untuk membangkitkan medan magnet pada beban induktif (seperti trafo dan motor). Daya ini yang akan dikompensasi atau suplai melalui inverter PLTS agar tegangan sistem membaik.

$$S = V \times I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.23)$$

umus ini menyatakan Daya Semu (*Apparent power*) dengan satuan VA (Volt-Ampere). Daya Semu adalah kapasitas total daya yang mengalir dalam jaringan distribusi, yang merupakan penjumlahan vektor dari Daya Aktif (P) dan Daya Reaktif (Q).

Faktor daya (*power factor*, pf) didefinisikan sebagai rasio antara daya aktif (P) terhadap daya semu (S), atau secara matematis dinyatakan sebagai kosinus sudut fasa ($\cos \varphi$) antara tegangan dan arus dalam sistem AC, dengan nilai berkisar antara 0 hingga 1 atau dapat dinyatakan dalam persentase 0% hingga 100% . Faktor daya yang rendah mengindikasikan bahwa sebagian besar daya yang disuplai oleh sistem merupakan daya reaktif yang tidak melakukan kerja nyata, sehingga menyebabkan peningkatan arus total pada saluran distribusi, peningkatan rugi-rugi daya I^2R pada konduktor, penurunan kapasitas daya tersedia pada transformator dan pembangkit, serta penurunan tegangan yang lebih signifikan pada ujung saluran. Berdasarkan standar dan regulasi PLN, faktor daya minimal yang diizinkan untuk pelanggan industri dan komersial adalah 0,85 , dimana pelanggan dengan faktor daya di bawah nilai tersebut akan dikenakan denda kVARh, sementara faktor daya ideal yang direkomendasikan adalah mendekati unity atau 0,95-1,0 untuk mengoptimalkan efisiensi sistem [40].

Persamaan Faktor daya:

$$pf = \cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.24)$$

Persamaan ini mendefinisikan Faktor Daya (*Power factor*), yang merupakan rasio efisiensi antara daya yang terpakai (P) dengan daya total yang disuplai (S). Nilai faktor daya berkisar antara 0 hingga 1. Semakin rendah faktor daya (mendekati 0), semakin besar proporsi daya reaktif (Q) dalam sistem, yang mengindikasikan inefisiensi sistem distribusi.

Perbaikan faktor daya merupakan upaya sistematis untuk meningkatkan rasio daya aktif terhadap daya semu dengan cara mengurangi komponen daya reaktif dalam sistem, yang dapat dilakukan melalui beberapa metode teknis dengan karakteristik dan aplikasi yang berbeda. Metode konvensional yang paling umum digunakan adalah pemasangan kapasitor bank yang menyuplai daya reaktif kapasitif (-Q) untuk mengkompensasi daya reaktif induktif (+Q) dari beban, sehingga daya reaktif netto mendekati nol dan faktor daya meningkat mendekati unity.

Rumus Perhitungan kebutuhan daya reaktif untuk perbaikan:

$$Q_c = P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$Q_c = P \times \left(\sqrt{\frac{1}{\text{pf}_1^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\text{pf}_2^2} - 1} \right) \quad (2.25)$$

dimana Q_c adalah kapasitas daya reaktif yang diperlukan (kVAR), P adalah daya aktif beban (kW), pf_1 adalah faktor daya awal dan pf_2 adalah faktor daya target.

2.2.6 Sistem Per Unit

Sistem per unit (*per-unit system*) adalah metode normalisasi besaran-besaran listrik dalam sistem tenaga listrik dengan cara membagi nilai aktual besaran tersebut terhadap nilai basis (*base value*) yang telah ditentukan. Metode ini sangat penting dalam analisis sistem tenaga listrik karena menyederhanakan perhitungan dan memudahkan interpretasi hasil. Sistem per unit mengeliminasi kompleksitas yang timbul akibat perbedaan level tegangan pada berbagai bagian sistem dan menyederhanakan perhitungan transformator dengan menghilangkan rasio belitan [41].

Nilai per unit suatu besaran didefinisikan sebagai rasio antara nilai aktual besaran tersebut terhadap nilai basis yang dipilih:

$$\text{Nilai Per Unit} = \frac{\text{Nilai Aktual}}{\text{Nilai Basis}} \quad (2.26)$$

Nilai per unit dapat juga dinyatakan dalam persen:

$$\text{Nilai Persen} = \text{Nilai Per Unit} \times 100\% \quad (2.27)$$

2.2.7 Standar Tegangan PT. PLN (Persero) SPLN 1:1995

Standar tegangan operasi sistem distribusi di Indonesia secara spesifik diatur dalam Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 1:1995 tentang Tegangan-Tegangan Standar yang ditetapkan melalui Keputusan Direksi PT PLN (Persero) No. 063.W0594/DIR/1995 tanggal 25 Agustus 1995. SPLN 1:1995 merupakan standar fundamental yang mengatur tegangan-tegangan standar untuk seluruh sistem ketenagalistrikan PT PLN (Persero), termasuk sistem distribusi 20 kV. Standar ini menetapkan batas-batas tegangan operasi yang harus dipenuhi untuk menjamin kualitas dan keandalan penyaluran tenaga listrik kepada konsumen [42].

Berdasarkan SPLN 1:1995, tegangan nominal untuk sistem distribusi tegangan menengah di Indonesia adalah 20 kV (tegangan line-to-line atau antar fasa). Tegangan nominal merupakan nilai tegangan referensi yang digunakan sebagai dasar perancangan, pengoperasian,

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

2.8 Pembangkit Terdistribusi (*Distributed Generation*)

Distributed Generation (DG) atau Pembangkit Terdistribusi adalah sistem pembangkit listrik berskala kecil hingga menengah yang terhubung langsung pada sistem distribusi atau di sisi pelanggan, dengan kapasitas yang relatif lebih kecil dibandingkan pembangkit listrik konvensional terpusat. Pembangkit terdistribusi ditempatkan dekat dengan pusat beban untuk mengurangi rugi-rugi transmisi dan meningkatkan keandalan sistem [16]. *Distributed Generator* (DG) merupakan pembangkit listrik dengan kapasitas kecil yang dipasang pada sistem distribusi atau di dekat lokasi beban konsumen. Pemasangan DG pada sistem distribusi dapat memberikan berbagai manfaat, seperti mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan meningkatkan keandalan sistem [43].

Pembangkit terdistribusi memiliki beberapa karakteristik utama yang membedakannya dari pembangkit konvensional:

1. Kapasitas Daya

Kapasitas kecil hingga menengah (beberapa kW hingga puluhan MW)

Umumnya di bawah 50 MW

Dapat beroperasi secara modular dan *scalable*

2. Lokasi Pemasangan

Terpasang pada jaringan distribusi (tegangan menengah 20 kV)

Dekat dengan pusat beban konsumen

Dapat terpasang di sisi pelanggan (behind the meter)

3. Teknologi Pembangkitan

Energi terbarukan: PLTS, PLTB, PLTMH

Energi konvensional: genset diesel, gas turbine, microturbine

Teknologi hybrid dan sistem penyimpanan energi

4. Mode Operasi

Grid-connected (terhubung jaringan)

Stand-alone (mandiri/islanding)

Hybrid mode

Pemasangan DG pada sistem distribusi memberikan manfaat signifikan dalam mengurangi rugi-rugi daya. Sebelum pemasangan DG, terdapat beberapa bus yang mengalami *Voltage drop* melebihi batas standar. Setelah pemasangan DG dengan kapasitas optimal, profil tegangan membaik dan semua bus berada dalam batas tegangan yang diizinkan. Perubahan tegangan akibat injeksi daya dari DG dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta V = \frac{P_{DG} \cdot R + Q_{DG} \cdot X}{V_{nominal}} \quad (2.28)$$

Dimana:

ΔV = perubahan tegangan (kV)

P_{DG} = daya aktif yang diinjeksikan DG (MW)

Q_{DG} = daya reaktif yang diinjeksikan DG (MVAR)

R = resistansi saluran (Ω)

X = reaktansi saluran (Ω)

$V_{nominal}$ = tegangan nominal sistem (kV)

Penentuan lokasi optimal DG merupakan faktor kritis yang menentukan efektivitas pemasangan DG dalam memperbaiki kinerja sistem distribusi. Lokasi yang tidak tepat dapat mengurangi manfaat bahkan menimbulkan masalah baru pada sistem [15] [2]. kriteria penentuan lokasi optimal DG meliputi:

1. Bus dengan Tegangan Terendah
2. Bus yang memiliki kontribusi *losses* terbesar
3. Jarak dari Gardu Induk

P_{DG} = Daya Injeksi DG (kVA)

P_L = Kapasitas Injeksi daya (%)

P_T = Beban Feeder (kVA)

Dalam menentukan kapasitas daya optimal injeksi DG pada penelitian ini digunakan empat penetrasi level kapasitas injeksi DG sebesar 50%, 100%, 140% dan 150%. Adapun cara menentukan jumlah daya yang diinjeksikan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{DG} = P_L \times P_T \quad (2.29)$$

2.2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Dengan memanfaatkan energi sinar matahari yang melimpah, tenaga surya berpotensi memenuhi kebutuhan energi masa depan yang cukup besar secara ekonomis dan ekologis. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan material semikonduktor pada panel surya untuk langsung mengubah energi matahari menjadi listrik. Teknologi pemusatan tenaga surya menawarkan pendekatan yang lebih hemat biaya. Cermin digunakan dalam teknologi CSP untuk memantulkan dan memfokuskan sinar matahari ke penerima, yang meningkatkan suhu fluida kerja. Turbin uap, yang menggerakkan generator, ditenagai oleh energi termal yang dihasilkan.



Gambar 2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Surya [44]

Gambar 2.7 menampilkan sebuah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terdiri dari panel-panel surya yang tersusun rapi di atas atap atau lahan terbuka. PLTS memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan listrik melalui proses fotovoltaiik, di mana sel-sel surya pada panel mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah. Sistem PLTS ini kemudian dihubungkan ke jaringan listrik distribusi melalui inverter yang

mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik sehingga dapat disalurkan ke konsumen. Penggunaan PLTS sebagai pembangkit terdistribusi (*distributed generation*) dapat memberikan solusi untuk meningkatkan kualitas dan keandalan pasokan listrik, terutama pada daerah-daerah dengan jaringan distribusi yang rentan terhadap penurunan tegangan.

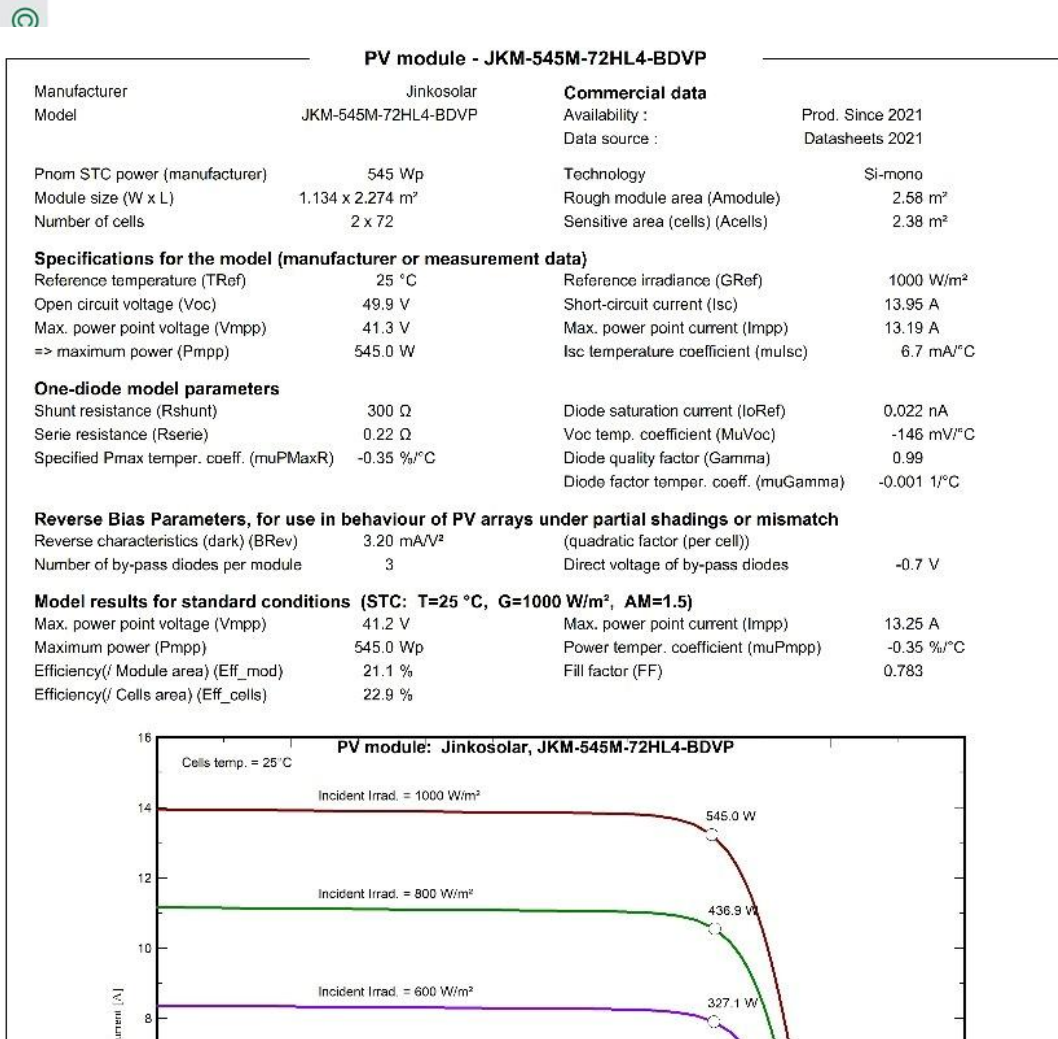
PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) adalah sistem yang mengubah energi matahari menjadi listrik menggunakan panel surya. Di Indonesia, PLTS menunjukkan potensi besar sebagai solusi energi bersih dan berkelanjutan, dengan rata-rata produksi daya sekitar 15 kWh/kWp/hari dan evaluasi finansial yang umumnya menguntungkan. Meskipun demikian, kinerjanya bervariasi tergantung lokasi dan teknologi, serta memerlukan perencanaan dan pengembangan yang tepat untuk mengatasi tantangan teknis dan meningkatkan efisiensi [45]

Pengembangan PLTS di Indonesia didorong oleh Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menargetkan 23% energi baru dan terbarukan pada tahun 2025. Kebijakan dan regulasi ini membedakan PLTS komersial, di mana pembelian listrik oleh PLN diatur berdasarkan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) pembangkitan setempat, dan PLTS atap non-komersial yang memungkinkan penghematan listrik dengan kelebihan energi diekspor ke jaringan pada tarif 65% dari tarif dasar listrik. Selain itu, semua instalasi PLTS wajib memiliki Sertifikat Laik Operasi (SLO) untuk memastikan kepatuhan dan keamanan [46].

PLTS pada sistem ini digunakan sebagai sumber injeksi daya ke beban terkait dengan tujuan utama untuk meningkatkan kualitas daya listrik pada sistem. Peningkatan kualitas daya yang dimaksud dapat mencakup stabilitas tegangan, perbaikan faktor daya, serta pengurangan beban pada transformator utama. Melalui injeksi daya dari sistem PLTS, sebagian kebutuhan energi pada beban dapat dipenuhi secara lokal sehingga mengurangi aliran daya dari jaringan utama. Sistem PLTS yang digunakan dalam skema ini menggunakan modul fotovoltaik produksi JinkoSolar dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

UIN SUSKA RIAU

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.8 Spesifikasi Panel PLTS [47]

Berdasarkan data pada gambar 2.8 spesifikasi modul PLTS JinkoSolar JKM-545M-72HL4-BDVP, diketahui bahwa luas satu unit panel surya adalah 2,58 m². Luas panel ini selanjutnya dibandingkan dengan luas area yang memungkinkan untuk dilakukan injeksi sistem PLTS, dengan tetap memperhatikan toleransi penempatan, yaitu sebesar 1 kali luas satu unit panel sebagai batas tambahan (margin) pemasangan. Luas tersebut kemudian digunakan untuk perhitungan kebutuhan luas *PLTS Farm* untuk injeksi PLTS agar sistem yang mengalami gangguan kembali berjalan dengan optimal.

Secara umum kebutuhan *PLTS Farm* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$LuasPVFarm = \frac{Kebutuhan\ daya\ reaktif}{Daya\ reaktif\ PV/panel} \times LuasPanel + toleransi \quad (2.30)$$

Model sistem distribusi riil Pekanbaru yang telah divalidasi pada tahap sebelumnya, dan dibangun menggunakan perangkat lunak *Digsilent Power factory*, akan menjadi fondasi untuk simulasi skenario penetrasi PLTS. Pertama, Analisis Aliran Daya (*Load flow*) dijalankan pada Kondisi *Baseline* (Tanpa PLTS) untuk mendapatkan kuantifikasi profil tegangan awal dalam p.u.) dan total rugi-rugi daya sistem, yang berfungsi sebagai data tolak ukur (0% penetrasi). Sistem PLTS mengubah energi matahari menjadi energi listrik menggunakan sel surya. Ketika PLTS diintegrasikan ke sistem tenaga:

- Tegangan bus dapat meningkat jika daya injeksi PLTS tinggi,
- Arus hubung singkat bisa berubah karena adanya sumber daya tambahan,
- Diperlukan pengaturan proteksi dan koordinasi baru agar sistem tetap stabil.

PLTS dihubungkan melalui inverter *Grid-tied* yang berfungsi mengubah daya DC menjadi AC sinkron dengan jaringan, Faktor Daya pada inverter *on grid* yang tertera pada Software *Digsilent Power factory* adalah 0,8. Keunggulan fundamental PLTS dalam perbaikan faktor daya terletak pada kemampuan dual contribution: (1) Reduksi Daya Aktif dari *Grid*, dimana PLTS menyuplai sebagian atau seluruh kebutuhan daya aktif beban sehingga mengurangi arus yang ditarik dari transformator distribusi, secara otomatis menurunkan komponen daya reaktif yang diperlukan; (2) Kompensasi Daya Reaktif Dinamis, dimana inverter dapat menginjeksikan atau menyerap daya reaktif sesuai kondisi real-time tanpa risiko overcompensation yang sering terjadi pada kapasitor bank fixed [48].

Mekanisme perbaikan faktor daya oleh PLTS dapat dijelaskan melalui persamaan modifikasi segitiga daya:

$$Q_{Grid} = Q_{beban} - Q_{PLTS} \quad (2.31)$$

Rumus ini menjelaskan neraca daya reaktif setelah injeksi PLTS. Daya reaktif yang harus disuplai oleh *Grid*/PLN (Q_{Grid}) menjadi berkurang karena sebagian kebutuhan beban sudah dipenuhi oleh inverter PLTS (Q_{PLTS}).

$$S_{Grid} = \sqrt{(P_{beban} - P_{PLTS})^2 + Q_{Grid}^2} \quad (2.32)$$

Rumus ini menghitung beban total baru (kVA) yang dirasakan oleh trafo utama (P_{beban} P_{PLTS}). Daya aktif bersih yang diambil dari *Grid* (berkurang karena ada suplai panel surya). Hasil perhitungan ini menunjukkan penurunan *loading* pada transformator utama.

$$pf_{\text{baru}} = \frac{P_{\text{beban}} - P_{\text{PLTS}}}{S_{\text{Grid}}} \quad (2.33)$$

Rumus ini digunakan untuk memverifikasi nilai faktor daya sistem yang baru setelah integrasi PLTS. Dengan berkurangnya pengambilan daya dari *Grid* (S_{Grid}) an penyesuaian daya aktif/reaktif, nilai ini membuktikan peningkatan efisiensi sistem mendekati angka 1.

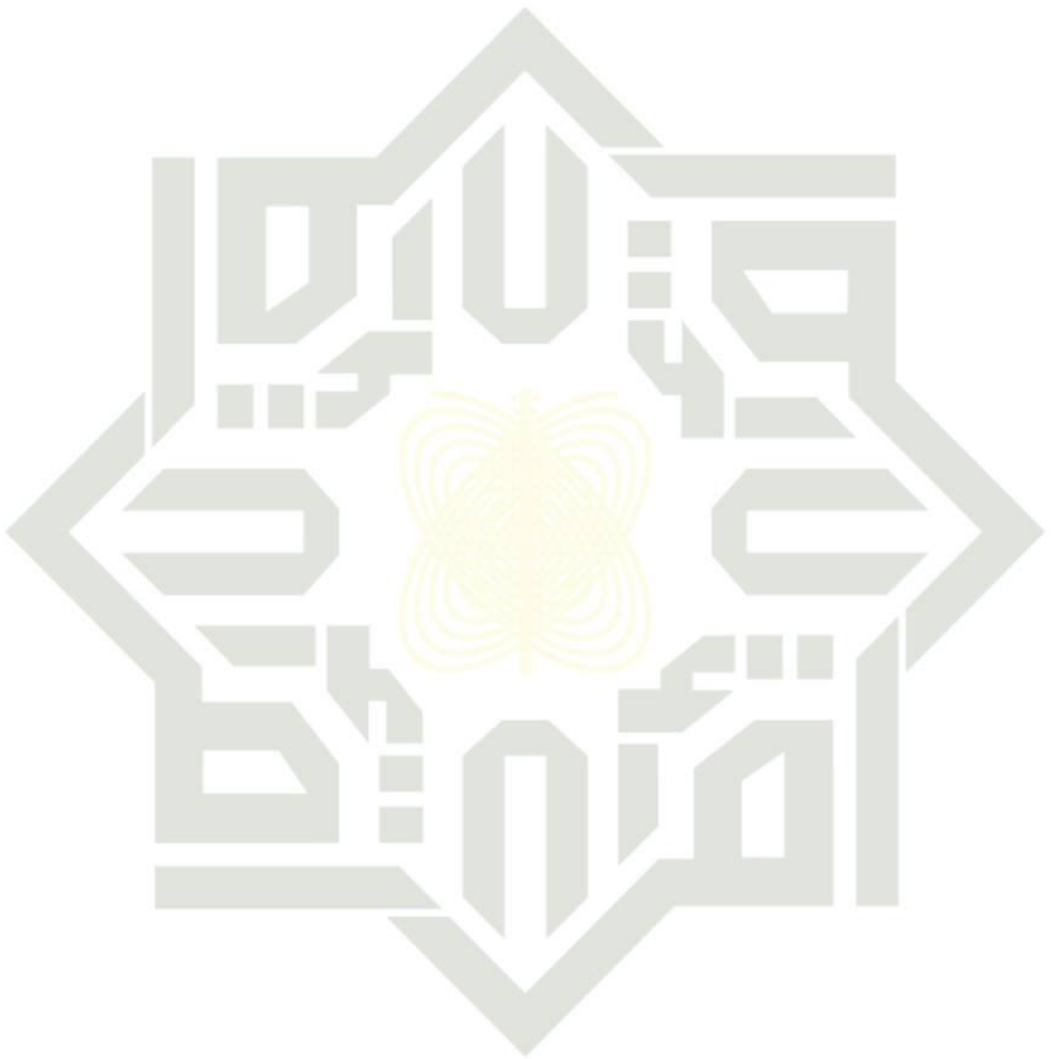
2.2.10 Digsilent Power factory

Analisis sistem transmisi, distribusi, dan tenaga industri dapat dilakukan dengan *DigSILENT PowerFactory*, sebuah program rekayasa berbantuan komputer yang terintegrasi dan interaktif. Analisis Aliran Beban merupakan salah satu tujuan utamanya. Tujuan: Mengkaji karakteristik operasi tunak sistem tenaga, termasuk tegangan bus, aliran daya aktif dan reaktif melalui saluran, dan transformator.

Pengguna dapat melakukan perhitungan aliran daya dengan cepat dan mudah. Hasilnya ditampilkan dalam diagram garis tunggal sebagai kotak hasil. Pengguna dapat menyesuaikan format kotak hasil untuk menampilkan variabel yang relevan, seperti daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), arus (I), atau faktor daya, dan bahkan dapat mewarnai diagram berdasarkan batas tegangan atau tingkat pembebanan elemen jaringan. Perhitungan aliran daya juga mencakup opsi-opsi lanjutan seperti kontrol daya reaktif (misalnya, penyesuaian sadapan transformator otomatis dan penyesuaian *shunt*) dan pertimbangan batas daya reaktif. Selain itu, tersedia metode untuk aliran daya AC seimbang, AC tak seimbang (3-fasa ABC), dan aliran daya DC linear. Selain aliran daya, *PowerFactory* juga dapat melakukan berbagai fungsi analisis lain dalam lingkungan program tunggal, seperti [49]:

1. *Load flow*, untuk perhitungan aliran daya.
2. *Short Circuit*, sesuai IEC 60909 edisi 2001.
3. *Dynamic Simulation*, untuk analisis perilaku sistem dalam kondisi transien.
4. *Injeksi Distributed Generation (DG)*, termasuk sistem PLTS.

DigSILENT PowerFactory banyak digunakan dalam dunia industri maupun akademik karena memiliki akurasi tinggi, fleksibilitas dalam pemodelan, serta mendukung berbagai standar internasional dalam analisis sistem tenaga listrik.



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Metode kuantitatif dipakai untuk mengukur sekaligus menganalisis variabel-variabel yang ditentukan, di mana variabel utama yang diteliti adalah efek penambahan PLTS pada sistem distribusi radial 20kV penyulang ULP Rumbai.

Bab ini menjelaskan proses pemodelan sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* 15.0. Pemodelan dilakukan dengan menyusun setiap komponen utama sistem berdasarkan diagram satu garis (*single line diagram*), sehingga model merepresentasikan kondisi nyata sistem tenaga listrik. Komponen yang dimasukkan dalam pemodelan meliputi konduktor, transformator, bus, generator, pemutus tenaga (PMT), serta kapasitor bank atau sistem PLTS.

Setiap komponen dimasukkan ke dalam model dengan parameter teknis sesuai data yang ada, sehingga hasil simulasi dapat memberikan gambaran terhadap kinerja sistem tenaga listrik, termasuk tegangan pada tiap bus, rugi-rugi daya, arus gangguan, dan efek integrasi energi terbarukan.

Dalam pemodelan ini, sistem PLTS berperan sebagai pengganti kapasitor bank fisik, terutama dalam hal:

- Menyediakan daya reaktif untuk menjaga tegangan bus tetap stabil.
- Membantu mengurangi rugi-rugi daya dan mendukung faktor daya sistem.
- Memberikan kontribusi tambahan pada arus saat beban tinggi atau gangguan.

Dengan pendekatan ini, pemodelan memungkinkan simulasi Aliran daya, analisis injeksi PLTS untuk mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh. Selain itu, model juga dapat digunakan untuk studi skenario, seperti perubahan beban, gangguan sistem, atau penambahan *Distributed Generation*, sehingga perencana dan operator dapat mengambil keputusan yang lebih tepat sebelum implementasi nyata.

2.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Riau dan Kepulauan Riau. Jalan Tuanku Tambusai, Labuh Baru Barat, Kecamatan Payung Sekaki, Kota Pekanbaru, Riau dengan objek salah satu penyulang di Area ULP Rumbai

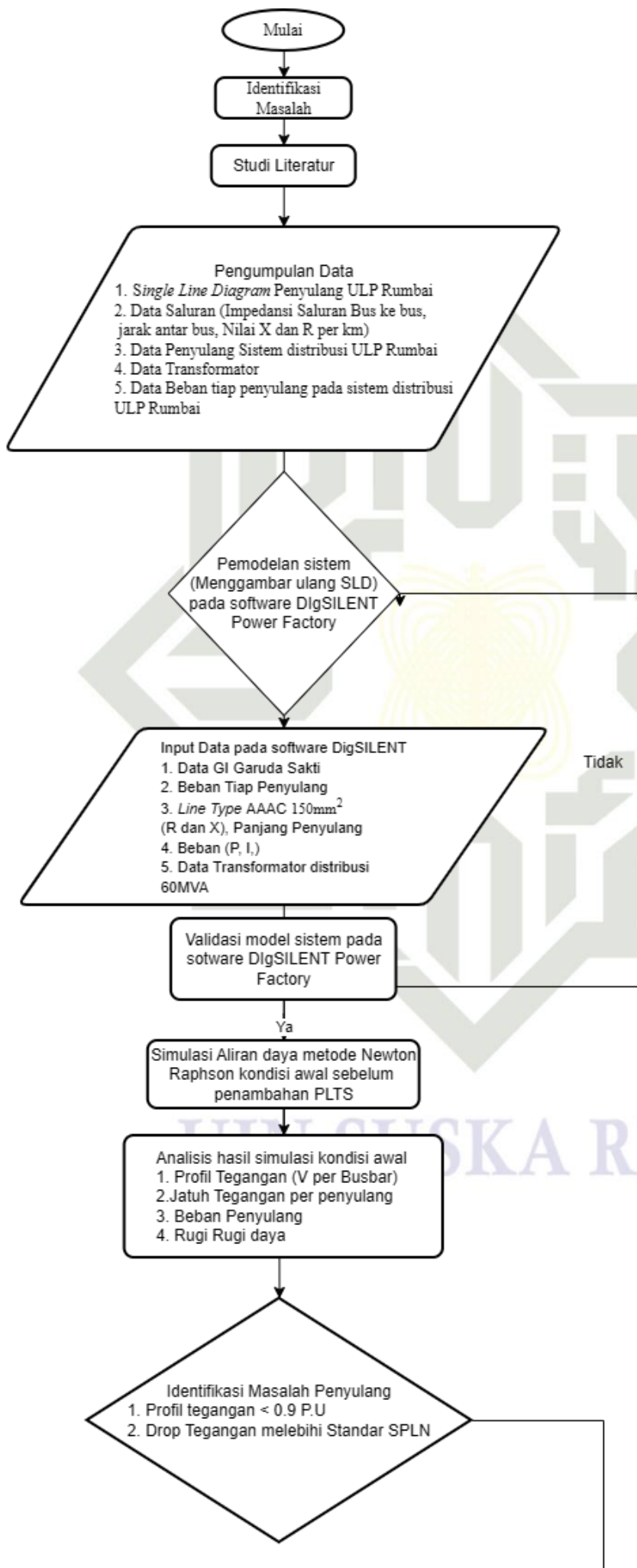
2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan agar tujuan yang telah ditetapkan dapat tercapai. Tahap awal dimulai dari studi literatur untuk memperoleh referensi dari penelitian terdahulu, dilanjutkan dengan identifikasi masalah melalui observasi dan wawancara dengan pihak terkait untuk mendapatkan data tambahan mengenai objek penelitian. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data sekunder serta pengukuran awal kondisi objek penelitian. Agar penelitian berjalan sistematis dan terarah, seluruh tahapan tersebut disusun dalam bentuk diagram alur yang ditampilkan pada Gambar 3.1.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

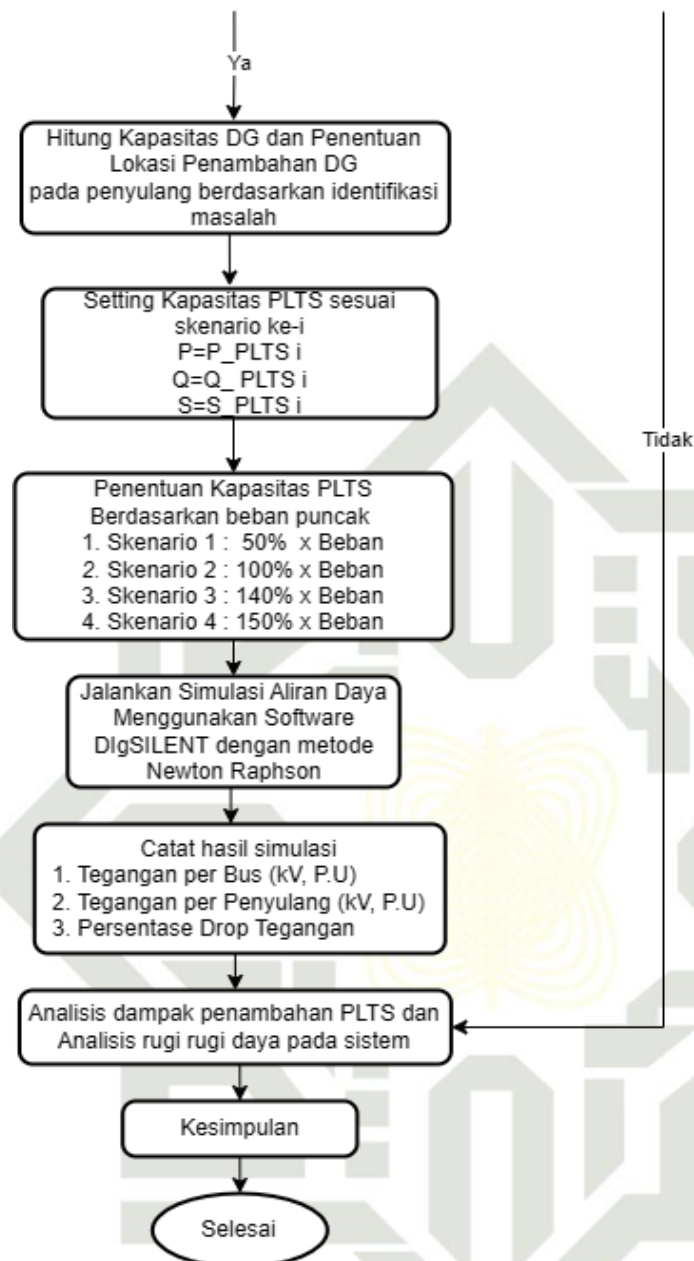
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



Gambar 3.1 Flowchart

3.4 Identifikasi Masalah

Masalah umum yang terjadi pada sistem distribusi tipe radial kelebihan tegangan akibat beban yang tidak digunakan dan terjadi *drop* tegangan Ketika semua beban serentak dipakai. Beban yang berada jauh dari gardu induk diujung saluran sering mengalami penurunan tegangan yang paling besar terutama pada kondisi beban puncak. Kekurangan jaringan distribusi tipe radial, tidak memiliki jalur cadangan jika terjadi gangguan seperti *short circuit* di satu titik pada penyulang utama, maka semua yang terhubung setelah titik gangguan tersebut akan mengalami pemadaman listrik total hingga gangguan diperbaiki.

Tabel 3.1 Hasil Simulasi Aliran Daya berdasarkan Penyulang

No	Nama Penyulang	P(MW)	Q(MVAR)	S(MVA)	PF	Tegangan(kV)	Tegangan(p.u.)	% Drop
1	Kuda (1)	3,6	1,94	4,09	0,88	18,4	0,92	8,00%
2	Kuda (2)	3,3	1,08	3,47	0,95	19,4	0,97	3,00%
3	Kijang	2,7	0,89	2,84	0,95	19,4	0,97	3,00%
4	Kelinci	2,9	1,15	3,12	0,93	19,1	0,955	4,50%
5	Rusa (1)	1,4	0,46	1,47	0,95	19,4	0,97	3,00%
6	Rusa (2)	1,4	0,46	1,47	0,95	19,4	0,97	3,00%
7	Rusa (3)	1,4	0,46	1,47	0,95	19,4	0,97	3,00%
8	Serigala	3	0,99	3,16	0,95	19,4	0,97	3,00%
9	Beruang	0,1	0,03	0,11	0,95	19,4	0,97	3,00%
10	Meranti	1,8	1,21	2,17	0,83	17,76	0,888	11,20%
11	Anoa	5,4	1,96	5,74	0,94	19,2	0,96	4,00%
12	Libra	5	2,56	5,62	0,89	18,6	0,93	7,00%
13	Singa (1)	1,3	0,51	1,4	0,93	19,1	0,955	4,50%
14	Singa (2)	1,3	0,51	1,4	0,93	19,1	0,955	4,50%
15	Singa (3)	1,3	0,51	1,4	0,93	19,1	0,955	4,50%
16	Damar	4,8	3,48	5,93	0,81	17,4	0,87	13,00%

Berdasarkan Tabel 3.1 hasil simulasi berdasarkan penyulang yang mengalami masalah pada kondisi beban puncak yaitu Penyulang meranti dan Penyulang damar. Kondisi tersebut memenuhi kriteria yang menjelaskan persentase jatuh tegangan melebihi 10%. Penyulang yang mengalami masalah ini akan dilanjutkan dengan penambahan PLTS sebagai solusi untuk menaikkan tegangan ke batas bawah berdasarkan standar SPLN 1:1995 yaitu 18kV atau 0.90 p.u.

3.5 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap penting dalam proses penelitian yang bertujuan untuk memperoleh pemahaman mendalam terkait topik yang diteliti. Sumber literatur yang digunakan berasal dari buku, jurnal, maupun skripsi yang relevan. Melalui studi literatur, peneliti dapat mengidentifikasi perkembangan dan temuan terbaru sehingga penelitian yang dilakukan memiliki landasan teoritis yang kuat serta selaras dengan kemajuan penelitian sebelumnya. Referensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lima tahun terakhir.

Melalui studi literatur, peneliti memperoleh pemahaman mendalam tentang konsep sistem distribusi radial 20 kV, metode analisis aliran daya *Newton-Raphson* yang akan

digunakan dalam simulasi, karakteristik teknis PLTS sebagai pembangkit terdistribusi, serta standar tegangan SPLN 1:1995 yang menjadi acuan evaluasi kinerja sistem. Selain itu, studi literatur memberikan informasi kritis mengenai metode penentuan lokasi optimal dan kapasitas DG yang telah dikembangkan oleh peneliti terdahulu, dampak penetrasi PLTS terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi, serta best practices dalam pemodelan komponen sistem menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory*.

Kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya juga memungkinkan identifikasi *research gap* dan *positioning* penelitian ini dalam konteks pengembangan ilmu pengetahuan, sekaligus menghindari duplikasi penelitian serta memastikan *novelty* dan kontribusi ilmiah yang signifikan. Dengan demikian, studi literatur tidak hanya berfungsi sebagai referensi teoritis, tetapi juga sebagai panduan metodologi yang mengarahkan desain penelitian, pemilihan *tools* analisis, dan interpretasi hasil untuk menjawab rumusan masalah secara komprehensif dan valid.

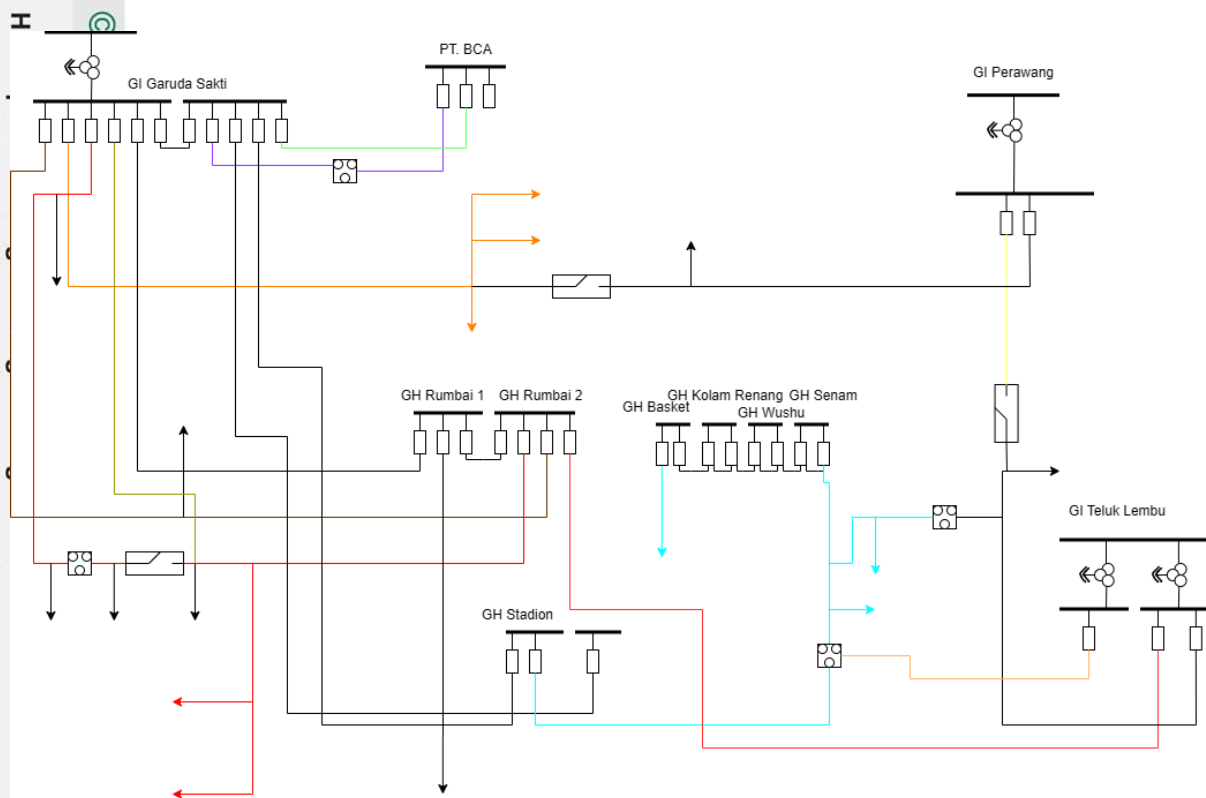
3.6 Pengumpulan Data

Dalam pelaksanaan penelitian, diperlukan data dari objek yang diteliti sebagai dasar untuk melaksanakan seluruh tahapan penelitian hingga tahap akhir. Tahap ini merupakan pengumpulan data kuantitatif primer yang esensial untuk memodelkan sistem distribusi riil di Pekanbaru menggunakan perangkat lunak *Digsilent Power factory*.

Data yang dikumpulkan diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Data Topologi Jaringan: Meliputi Gambar *Single Line Diagram* (SLD) Penyulang area PLN ULP Rumbai, yang menjadi basis visual untuk pemodelan jaringan radial.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.2 *Single Line Diagram* ULP Rumbai

Gambar 3.2 menjelaskan *Single Line Diagram* (SLD) sistem distribusi 20 kV PLN Unit Layanan Pelanggan (ULP) Rumbai ini merupakan representasi skematik jaringan distribusi radial yang menjadi objek penelitian untuk analisis penempatan dan kapasitas optimal PLTS. Diagram ini menampilkan konfigurasi lengkap sistem distribusi yang bersumber dari dua gardu induk utama GI New Garuda Sakti dan GI Teluk Lembu serta dilengkapi dengan Gardu Hubung (GH) Rumbai sebagai titik interkoneksi, dengan total 13 penyulang yang melayani wilayah ULP Rumbai dan ULP Barat. SLD ini memfasilitasi identifikasi penyulang kritis seperti Penyulang meranti dan Penyulang damar yang mengalami drop tegangan berlebih, sekaligus menunjukkan lokasi strategis peralatan proteksi yaitu recloser, LBS dan segmentasi jaringan yang menjadi pertimbangan dalam penentuan titik optimal injeksi PLTS. Informasi topologi jaringan, panjang saluran, dan konfigurasi zona proteksi yang tergambar dalam SLD menjadi basis data esensial untuk pemodelan sistem pada DigSILENT PowerFactory, analisis aliran daya metode Newton-Raphson, serta evaluasi dampak penetrasi PLTS terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada setiap segmen jaringan distribusi.

2. Data Impedansi Saluran: Data teknis yang mencakup Data Saluran seperti impedansi Saluran, bus ke bus, jarak antar bus, dan nilai X dan R per Km. Nilai R dan X pada impedansi saluran AAAC 150 mm² yaitu $0,2162 + j0,3305$ / km. Data ini digunakan untuk menghitung impedansi total setiap segmen saluran.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Tabel 3.2 Jenis Konduktor AAAC / AAAC-S

Penampang (mm ²)	Impedansi Urutan Positif (Ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/km)	Kuat Hantar Arus (A)
16	2,0161 + j0,4036	2,1641 + j1,6911	105
25	1,2903 + j0,3895	1,4384 + j1,6770	135
35	0,9217 + j0,3790	1,0697 + j1,6665	170
50	0,6452 + j0,3678	0,7932 + j1,6553	210
70	0,4608 + j0,3572	0,6088 + j1,6447	255
95	0,3096 + j0,3449	0,4876 + j1,6324	320
120	0,2688 + j0,3376	0,4168 + j1,6324	365
150	0,2162 + j0,3305	0,3631 + j1,6180	425
240	0,1344 + j0,3158	0,2824 + j1,6034	585

Tabel 3.3 Jenis Konduktor Kabel Tanah NA2XSEBY (XLPE)

Penampang (mm ²)	Impedansi Urutan Positif (Ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/km)	Kuat Hantar Arus (A)
× 150	0,206 + j0,104	0,356 + j0,312	259
× 240	0,125 + j0,097	0,275 + j0,029	338
× 300	0,100 + j0,094	0,250 + j0,282	380

Data impedansi konduktor AAAC/AAAC-S pada Tabel 3.1 merupakan parameter fundamental yang digunakan dalam pemodelan jaringan distribusi dan analisis aliran daya metode *Newton-Raphson* pada penelitian ini. Impedansi urutan positif dan urutan nol untuk berbagai penampang konduktor (16-240 mm²) menjadi input kritis dalam perhitungan *drop* tegangan, rugi-rugi daya, dan distribusi arus sepanjang saluran penyulang. Nilai resistansi dan reaktansi yang tercantum memungkinkan simulasi akurat pada *DIgSILENT PowerFactory* untuk memprediksi profil tegangan pada setiap bus, terutama pada Penyulang meranti dan Damar yang mengalami penurunan tegangan kritis. Data kuat hantar arus (KHA) juga digunakan untuk memverifikasi

kapasitas konduktor tidak terlampaui setelah integrasi PLTS, sehingga memastikan keamanan operasi sistem dan validitas hasil optimasi penempatan DG berbasis PLTS sesuai standar PLN:1995.

Data Transformator untuk mendefinisikan parameter sumber dan trafo distribusi. Berikut data Transformator Distribusi 60 MVA:

Tabel 3.4 Data Impedansi Transformator

JENIS TRAF0	KV PRIMER	KV SEKUNDER	FLA PRIMER	FLA SEKUNDER	POSITIVE SEQUENCE					ZERO SEQUENCE				
					%Z	X / R	R/X	% X	%R	% Z	X/ R	R/X	%X	%R
TRAF0 60 MVA STEP DOWN	150	20	230.9	1732	12.5	45	0.022	12.497	0.278	12.5	45	0.022	12.497	0.278

Data impedansi transformator 60 MVA step-down (150/20 kV) pada Tabel 3.3 merupakan parameter esensial untuk pemodelan akurat gardu induk dalam analisis aliran daya sistem distribusi. Impedansi urutan positif (%Z = 12,5%, R = 0,022 Ω , X = 12,49 Ω) dan urutan nol yang tercantum digunakan dalam perhitungan *Newton-Raphson* untuk menentukan rugi-rugi daya transformator, regulasi tegangan sisi sekunder 20 kV, serta karakteristik impedansi ekuivalen sumber yang mempengaruhi profil tegangan sepanjang penyulang. Data *Full Load Ampere* (FLA) primer 230,9 A dan sekunder 1732 A menjadi acuan evaluasi tingkat pembebanan transformator sebelum dan sesudah integrasi PLTS, memastikan bahwa penambahan DG tidak menyebabkan *overloading* transformator dan tetap berada dalam batas operasi aman untuk menjaga keandalan sistem distribusi 20 kV ULP Rumbai.

4. Data Beban

Tabel 3.5 Informasi Asset Sistem Distribusi ULP Rumbai

NO	PENYULANG	BEBAN (A)	BEBAN (MW)	PANJANG PENYULANG (KMS)	JUMLAH GARDU	TOTAL MW GARDU	NERACA BEBAN GARDU
1	GINEWGS-ANOA-CB	185	5.4	11.1	49	7.9	68.9%
2	GINEWGS-KELINCI-CB	216	2,9	27.6	46	7.4	85.8%
3	GINEWGS-KUDA-CB	233	6.9	45.5	91	12.7	54.0%
4	GINEWGS-RUSA-CB	142	4.2	64.2	53	5.6	74.6%

NO	PENYULANG	BEBAN (A)	BEBAN (MW)	PANJANG PENYULANG (KMS)	JUMLAH GARDU	TOTAL MW GARDU	NERACA BEBAN GARDU
5	GINEWGS-SINGA-CB	132	3.9	4.3	56	12.9	30.1%
6	GINEWGS-SERIGALA-CB	102	3.0	5.8	1	3.15	95.2%
7	GINEWGS-KIJANG-CB	92	2.7	14.8	35	4.4	61.5%
8	GINEWGS-HARIMAU-CB	116	3.4	5.8	41	5.3	64.4%
9	GINEWGS-BERUANG-CB	4	0.1	3.3	1	0.6	19.6%
10	GITL-DAMAR-CB	164	4.8	56.4	60	6.5	74.2%
11	GITL-MERANTI-CB	52	1.8	15,15	28	2.6	58.8%
12	GITL-SUNGKAI-CB	4	0.1	6.2	1	0.25	47.1%
TOTAL	ULP RUMBAI	1442	42.4	252	462	69.3	61.2%

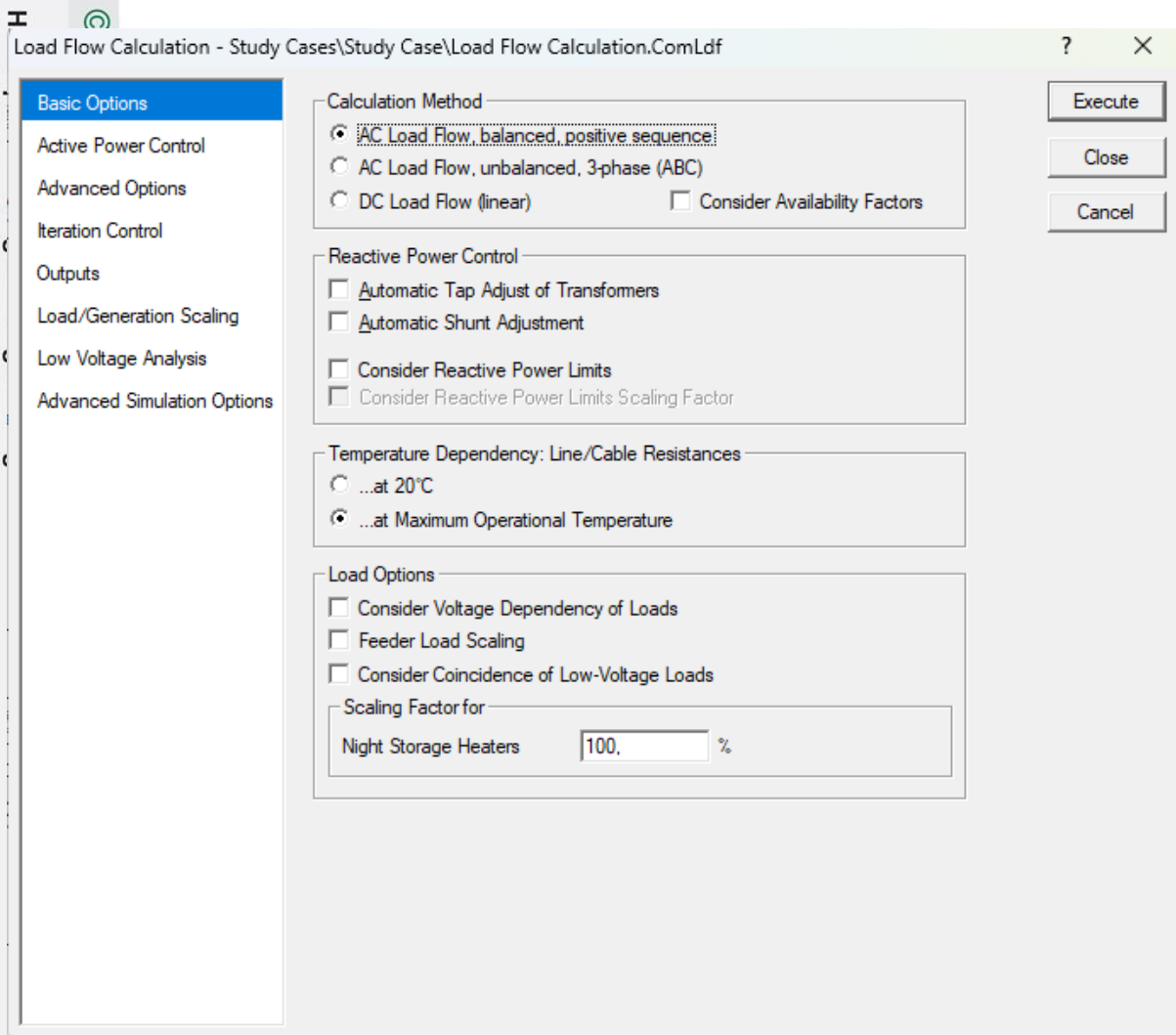
Berdasarkan Tabel 3.4 Data beban merupakan data yang menjelaskan pembebanan tiap penyulang yang ada di area ULP Rumbai. Data ini akan di input ke dalam *software* Digsilent.

3.7 Pemodelan Sistem Kondisi Sebelum Menambahkan PLTS

Pemodelan jaringan distribusi riil Penyulang Area ULP Rumbai merupakan langkah krusial yang dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi *Digsilent Power factory*. Model ini dibangun berdasarkan data kuantitatif yang dikumpulkan, di mana *Single Line Diagram* (SLD) digunakan untuk mereplikasi topologi jaringan secara structural. Untuk mendapatkan representasi fisik dan elektrik yang akurat, data teknis saluran udara diinput, mencakup nilai kuantitatif Impedansi Saluran (R dan X per Km) dan jarak antar *bus* untuk menghitung total impedansi setiap segmen ($Z = R + jX$).

Data Transformator diinput berdasarkan *rating* daya dan impedansi persentase yang tersedia. Pemodelan ini secara spesifik menggunakan profil beban yang rinci hingga konfigurasi tiap Fasa, memungkinkan simulasi sistem tiga fasa yang tidak seimbang (*unbalanced*) untuk meningkatkan validitas hasil.

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.3 Tahap menjalankan simulasi aliran daya

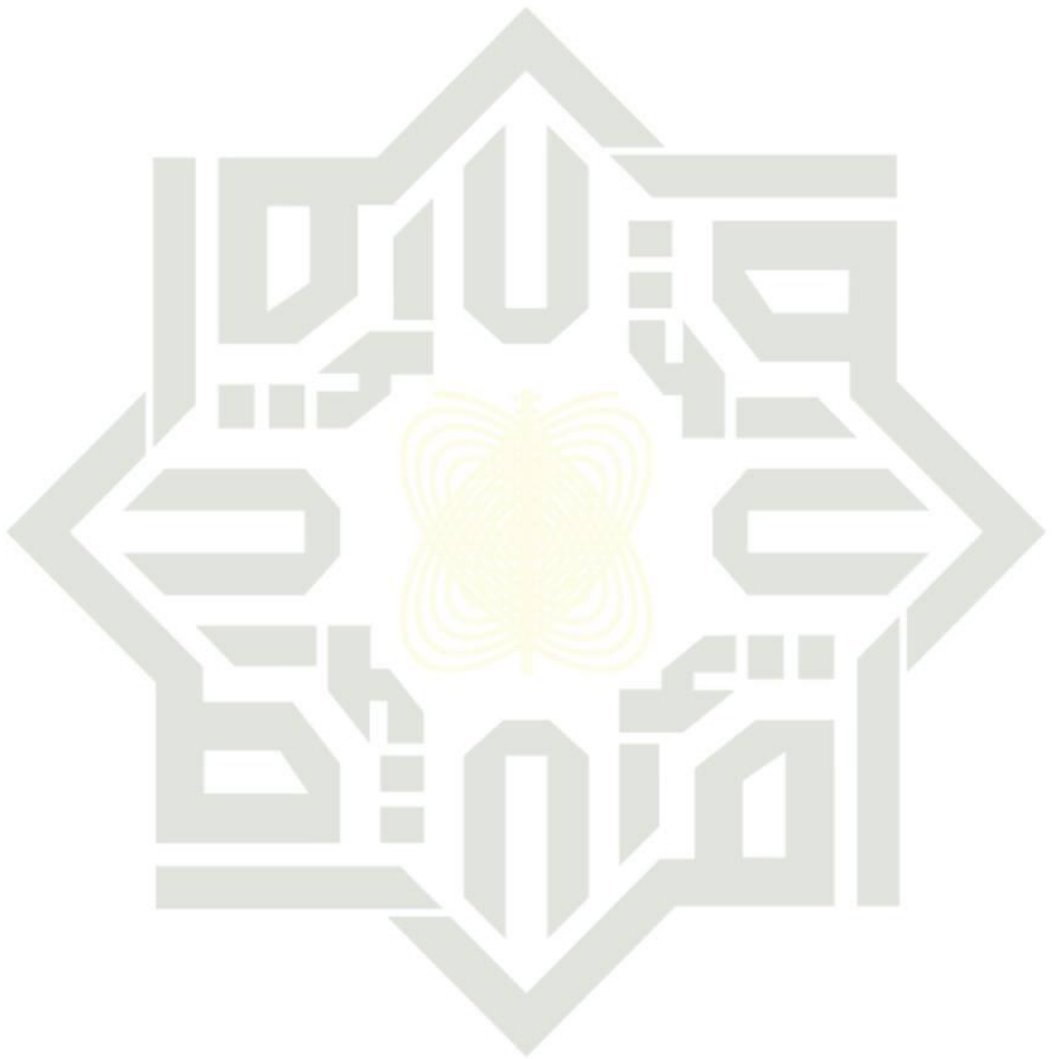
Berdasarkan Gambar 3.3 tahap simulasi dan *running load flow* merupakan inti dari penelitian ini yang bertujuan untuk menganalisis kondisi operasi sistem distribusi 20 kV Penyulang meranti dan Penyulang damar pada berbagai skenario pembebanan dan penetrasi PLTS. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* dengan metode *Newton-Raphson* yang telah terbukti memiliki konvergensi cepat dan akurasi tinggi untuk analisis sistem distribusi radial. Sebelum menjalankan simulasi *load flow*, beberapa persiapan teknis perlu dilakukan:

1. Memastikan semua komponen sistem (bus, saluran, transformator, beban, dan PLTS) telah termodelkan dengan benar
2. Memeriksa konektivitas antar bus untuk memastikan tidak ada bus yang terisolasi
3. Metode perhitungan: *Newton-Raphson (balanced load flow)*
4. Toleransi konvergensi: 0,0001 p.u. untuk ketidakseimbangan daya aktif dan reaktif

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

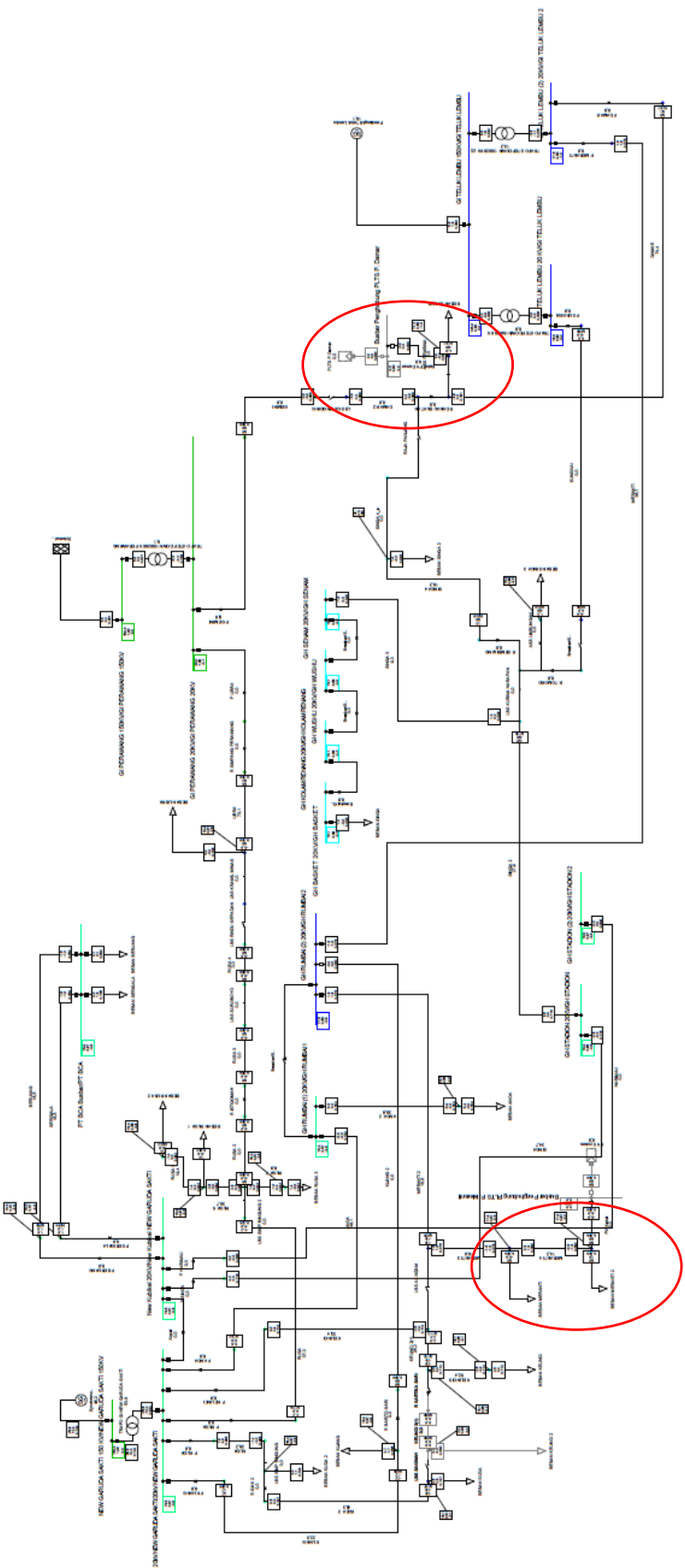
5. Maksimum iterasi: 50 iterasi
6. Slack bus: Bus gardu induk (tegangan dipertahankan 1,0 p.u.)
7. Frekuensi sistem: 50 Hz
8. Kondisi beban puncak: Semua beban pada nilai maksimum (100% beban)



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.4 Hasil simulasi aliran daya

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Berdasarkan Gambar 3.4 terdapat 2 lokasi yang mengalami permasalahan tegangan turun pada kondisi beban puncak. Kondisi ini perlu adanya perbaikan, perbaikan yang akan dilakukan adalah dengan simulasi penambahan PLTS di kedua lokasi penyulang tersebut. Berikut hasil yang menjelaskan kondisi kedua penyulang tersebut:

Tabel 3.6 Hasil Simulasi Aliran Daya

No	Nama Penyulang	P(MW)	Q(MVAR)	S(MVA)	PF	Tegangan(kV)	Tegangan(p.u.)	% Drop
1	Meranti	1,8	1,21	2,17	0,83	17,76	0,888	11,20%
2	Damar	4,8	3,48	5,93	0,81	17,4	0,87	13,00%

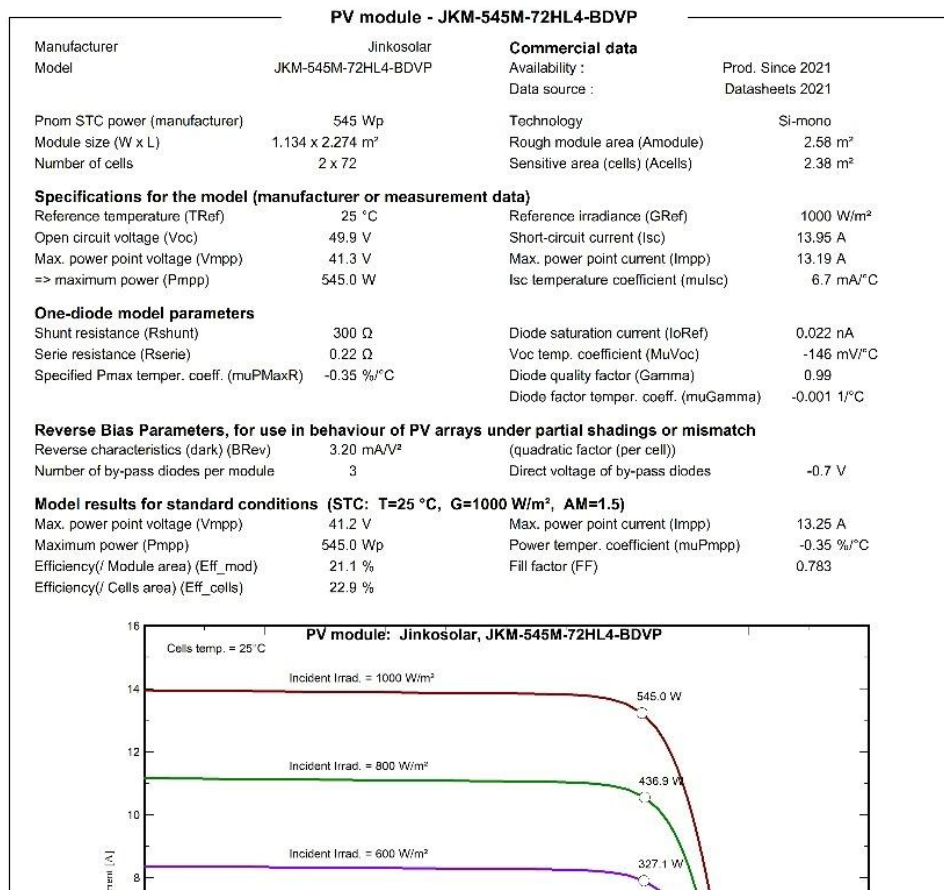
Berdasarkan Tabel 3.5 Penyulang meranti tegangan turun menjadi 17,76 kV atau 0,88 p.u membuat tegangan jatuh sebesar 11,20%. Lalu pada Penyulang damar tegangan turun menjadi 17,4 kV atau 0,87 p.u membuat tegangan jatuh sebesar 13% melebihi standar tegangan jatuh pada kondisi beban puncak. Penyebab masalah ini adalah turunnya factor daya dibawah standar PLN yaitu 0,85. Kondisi ini melebihi batas aman yang telah ditetapkan PLN yang dijelaskan melalui Standar SPLN 1 : 1995 yaitu batas aman tegangan $0,90 < V < 1,05$ p.u atau 18kV sampai dengan 21kV.

3.8 Pemodelan Sistem Kondisi Sesudah Menambahkan PLTS

PLTS pada sistem ini digunakan sebagai sumber injeksi daya ke beban terkait dengan tujuan utama untuk meningkatkan kualitas daya listrik pada sistem. Peningkatan kualitas daya yang dimaksud dapat mencakup stabilitas tegangan, perbaikan faktor daya, serta pengurangan beban pada transformator utama. Melalui injeksi daya dari sistem PLTS, sebagian kebutuhan energi pada beban dapat dipenuhi secara lokal sehingga mengurangi aliran daya dari jaringan utama. Sistem PLTS yang digunakan dalam skema ini menggunakan modul fotovoltaiik produksi JinkoSolar dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang



Gambar 3.5 Spesifikasi Panel PLTS [47]

Berdasarkan data pada Gambar 3.3 spesifikasi modul PLTS JinkoSolar JKM-545M-72HL4-BDVP, diketahui bahwa luas satu unit panel surya adalah 2,58 m². Luas panel ini selanjutnya dibandingkan dengan luas area yang memungkinkan untuk dilakukan injeksi sistem PLTS, dengan tetap memperhatikan toleransi penempatan, yaitu sebesar 1 kali luas satu unit panel sebagai batas tambahan margin pemasangan. Luas tersebut kemudian digunakan untuk perhitungan kebutuhan luas *PLTS Farm* untuk injeksi PLTS agar sistem yang mengalami gangguan kembali berjalan dengan optimal.

Untuk mengatasi drop tegangan, dilakukan injeksi PLTS guna memperbaiki drop tegangan yang melebihi standar. Injeksi PLTS akan menyuplai daya reaktif dan daya aktif dengan jumlah yang besar, sehingga diharapkan akan memperbaiki faktor daya. Peningkatan faktor daya akan menurunkan nilai arus yang mengalir sekaligus meningkatkan nominal tegangan ke nominal normal, dikarenakan sistem akan memiliki daya semu yang lebih kecil apabila faktor daya meningkat, mengacu pada persamaan berikut:

$$P = \sqrt{3}.V.I.PF \quad (3.1)$$

$$S = \frac{P}{PF} \quad (3.2)$$

Yang dimana :

P : Daya Aktif

S : Daya Semu

PF : Faktor Daya

Setelah mengetahui Daya Aktif dan Faktor daya pada Penyulang meranti dan Penyulang damar, langkah selanjutnya adalah menghitung Daya Semu dan Daya Reaktif pada Penyulang meranti dan Penyulang damar.

$$Q = \sqrt{S^2 - (S.PF)^2} \quad (3.3)$$

Setelah mendapatkan hasil Daya Reaktif tiap penyulang, langkah selanjutnya adalah menghitung Daya Reaktif yang akan di injeksikan ke PLTS. Untuk mendapatkan *drop* tegangan yang lebih baik, faktor daya harus dinaikkan mendekati 1. Dalam hal ini, diasumsikan faktor daya pada Bus Gardu Hubung Rumbai 2 dan Gardu Induk Teluk Lembu ditargetkan sebesar 0,98, maka:

$$Q = S.\sin(\cos^{-1}(PF)) \quad (3.4)$$

Setelah menghitung Daya Aktif dengan asumsi Faktor Daya 0,98 maka langkah selanjutnya adalah menghitung kebutuhan Daya Reaktif yang akan diinjeksikan ke PLTS. Maka, nilai dari kebutuhan daya reaktif yang perlu diinjeksikan adalah:

$$Q_{PLTS} = Q_{Awal} - Q_{Akhir} \quad (3.5)$$

Selanjutnya, PLTS diintegrasikan ke dalam model pada lokasi yang diskenariokan, yaitu pada *bus* yang mengalami kekurangan pasokan daya atau di ujung *feeder* yang panjang, sehingga PLTS tersebut berfungsi sebagai sumber energi cadangan yang menyuplai daya. Setelah pemodelan integrasi PLTS, Analisis Skenario Penetrasi PLTS secara kuantitatif dijalankan dengan mengulang simulasi aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson*. Empat skenario utama disimulasikan untuk mengkuantifikasi dampaknya secara mendalam:

- 50% dari kapasitas beban
- 100% dari kapasitas beban
- 140% dari kapasitas beban
- 150% dari kapasitas beban

Dalam menentukan kapasitas daya optimal injeksi DG pada penelitian ini digunakan empat penetrasi level kapasitas injeksi DG sebesar 50%, 100%, 140% dan 150%. Adapun cara menentukan jumlah daya yang diinjeksikan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{DG} = PL \times P_T \quad (3.6)$$

Dimana:

P_{DG} = Daya Injeksi DG (kVA)

PL = Kapasitas Injeksi daya (%)

P_T = Beban *Feeder* (kVA)

Pemasangan DG pada sistem distribusi memberikan manfaat signifikan dalam mengurangi rugi-rugi daya. Sebelum pemasangan DG, terdapat beberapa bus yang mengalami *Voltage drop* melebihi batas standar. Setelah pemasangan DG dengan kapasitas optimal, profil tegangan membaik dan semua bus berada dalam batas tegangan yang diizinkan. Perubahan tegangan akibat injeksi daya dari DG dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta V = \frac{P_{DG} \cdot R + Q_{DG} \cdot X}{V_{nominal}} \quad (3.7)$$

Dimana:

ΔV = Perubahan tegangan (kV)

P_{DG} = daya aktif yang diinjeksikan DG (kW)

Q_{DG} = daya reaktif yang diinjeksikan DG (kVAR)

R = resistansi saluran (Ω)

X = reaktansi saluran (Ω)

$V_{nominal}$ = tegangan nominal sistem (kV)

Langkah Selanjutnya adalah menghitung luas penempatan PLTS, secara umum kebutuhan PLTS *Farm* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$LuasPVFarm = \frac{Kebutuhan\ daya\ reaktif}{Daya\ reaktif\ PV/panel} \times LuasPanel + toleransi \quad (3.8)$$

9 Analisis Aliran Daya dan Gangguan Pada Sistem

Setelah model sistem divalidasi, analisis aliran daya (*load flow*) dijalankan dalam kondisi *steady-state* menggunakan metode numerik *Newton-Raphson*. Berikut Tahap-Tahap Metode *Newton-Raphson*:

1. Hitung nilai-nilai $P_{dihitung}$ dan $Q_{dihitung}$ yang mengalir ke dalam sistem pada setiap bus untuk nilai yang diperkirakan dari besar tegangan (V) dan sudut fasanya (δ) untuk iterasi pertama atau nilai tegangan yang ditentukan paling akhir untuk iterasi berikutnya
2. Hitung Δp pada setiap rel
3. Hitung nilai-nilai untuk *Jacobian* dengan menggunakan nilai-nilai perkiraan atau yang ditentukan dari besar dan sudut fasa tegangan dalam persamaan untuk turunan parsial yang ditentukan dengan persamaan diferensial Persamaan (3.10) dan Persamaan (3.11)
4. *Inverse* matriks *Jacobian* dan hitung koreksi koreksi tegangan δi dan $|Vi|$ pada setiap rel
5. Hitung nilai yang baru $|Vi|$ dan δi dengan menambahkan nilai δi dan $|Vi|$ pada setiap rel
6. Kembali ke Langkah 1 dan ulangi proses tersebut dengan menggunakan nilai besar dan sudut fasa tegangan yang ditentukan oleh nilai hasil terakhir sehingga semua nilai yang diperoleh lebih kecil dari indeks ketepatan yang dipilih

Tahap ini dibagi menjadi dua skema kuantitatif. Pertama, Analisis Aliran Daya Kondisi awal sebelum penambahan PLTS dijalankan untuk mengkuantifikasi profil tegangan awal (dalam p.u.) di setiap *bus* dan menghitung total rugi-rugi daya sistem, yang berfungsi sebagai data pembanding (0% penetrasi). Kedua, Analisis Skenario Penetrasi PLTS dilakukan dengan mengintegrasikan PLTS pada *bus* beban terpilih dengan memvariasikan tingkat penetrasi 50%, 100%, 140% dan 150% dari beban. Output Simulasi ini adalah nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya untuk setiap skenario, yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi dampak PLTS terhadap peningkatan kualitas daya dan pemenuhan fungsi objektif penelitian.

10 Evaluasi Hasil Simulasi dan Hasil Analisa

Tahap evaluasi ini merupakan proses kuantifikasi dan komparasi hasil simulasi aliran daya dari seluruh skenario penetrasi PLTS terhadap kondisi awal sebelum penambahan PLTS dan setelah penambahan PLTS. Evaluasi ini secara spesifik bertujuan untuk mengkuantifikasi perubahan rugi-rugi daya (aktif dan reaktif) dan mengevaluasi dampak penambahan PLTS terhadap batas operasi tegangan pada sistem distribusi riil Pekanbaru. Perbandingan kuantitatif dilakukan dengan menganalisis output profil tegangan dalam p.u. dan total rugi-rugi daya dari simulasi *load flow* untuk skenario 50%, 100%, 140% dan 150% dari beban. Fokus utama evaluasi adalah menganalisis efek dari penetrasi PLTS terhadap tegangan pada sistem distribusi radial dan rugi-rugi daya, menentukan kapasitas injeksi dari daya reaktif dan kapasitas PLTS yang sesuai dengan tidak melebihi 80% beban dari transformator .

Analisis kuantitatif ini secara cermat mengidentifikasi dan mengukur potensi masalah yang menjadi fokus penelitian, yaitu *drop* tegangan. Dengan membandingkan profil tegangan di setiap *bus* dengan batas operasi tegangan yang telah ditetapkan berdasarkan Standar PLN yaitu +5% dan -10% akan ditentukan secara numerik sejauh mana PLTS berhasil meminimalkan rugi-rugi daya dan meningkatkan Kualitas Daya Pada Sistem. Hasil evaluasi ini pada akhirnya akan merumuskan kesimpulan yang menjawab secara lugas rumusan masalah mengenai pengaruh penambahan PLTS pada sistem distribusi radial riil di Pekanbaru.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB V PENUTUP

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Kesimpulan

1. Analisis profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV ULP Rumbai mengidentifikasi dua penyulang yang mengalami penurunan tegangan melampaui standar SPLN 1:1995. Penyulang meranti menunjukkan tegangan operasi 17,76 kV (0,88 p.u.) dengan persentase penurunan tegangan 11,20% yang terhubung dengan GH Rumbai 2 menunjukkan tegangan 17,94 kV (0,897 p.u.) dengan persentase penurunan tegangan 10,30%, sedangkan penyulang damar mencatat tegangan 17,40 kV (0,87 p.u.) dengan persentase penurunan tegangan 13% yang terhubung dengan GI Teluk Lembu menunjukkan penurunan tegangan 17,99 kV (0,899 p.u.) dengan persentase penurunan tegangan mencapai 10,10%. Kedua kondisi ini melampaui batas toleransi maksimal -10% yang diperkenankan, disebabkan oleh kombinasi faktor panjang saluran ekstensif (12,8 km dan 15,2 km), impedansi saluran tinggi, serta faktor daya rendah (0,83 dan 0,81).
2. Simulasi empat skenario penetrasi PLTS (50%, 100%, 140%, dan 150% dari beban puncak) menunjukkan korelasi positif antara peningkatan kapasitas PLTS dengan perbaikan profil tegangan sistem. Pada Penyulang meranti, penetrasi 150% menghasilkan *loading* transformator optimal 78,9% dengan tegangan meningkat menjadi 18,00 kV (0,90 p.u.) dan pada penyulang damar, penetrasi 150% mencapai kondisi optimal dengan *loading* 60,5% dan tegangan 18,00 kV (0,90 p.u.). Integrasi PLTS berhasil meningkatkan faktor daya sistem dari kondisi 0,83-0,81 menjadi 0,98, yang berkontribusi signifikan terhadap pengurangan drop tegangan menjadi 10,00% sesuai batas standar SPLN 1:1995.
3. Berdasarkan analisis optimasi, kapasitas optimal PLTS yang diperlukan adalah 1.038,04 kW, 1.167,795 kVAR, 1.946,325 kVA untuk penyulang meranti dengan kebutuhan lahan 1,5 hektar di kawasan dekat SMK Negeri 7 Pekanbaru, dan 1.531,168 kW, 3.445,125 kVAR, 5.741,88 kVA untuk penyulang damar dengan kebutuhan lahan 4,4 hektar di kawasan Jalan Raja Panjang. Penempatan PLTS pada lokasi-lokasi strategis tersebut dipilih berdasarkan kriteria jarak optimal dari gardu

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

distribusi (≈ 1 km), ketersediaan lahan, dan aksesibilitas infrastruktur, dengan interkoneksi menggunakan kabel udara AAAC 150 mm² yang memiliki kapasitas hantar arus memadai dan impedansi rendah untuk meminimalkan *losses* transmisi. Selain itu fungsi dari PLTS sebagai pembangkit daya aktif sekaligus kompensator daya reaktif dinamis menjadikannya solusi superior dibandingkan kapasitor bank

4. Integrasi PLTS memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi sistem distribusi melalui reduksi rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya aktif berkurang dari 1,19 MW menjadi 1,09 MW (pengurangan 100 kW atau 8,40%), dengan persentase *losses* terhadap total supply menurun dari 2,85% menjadi 2,61%. Rugi-rugi daya reaktif mengalami penurunan dari 2,83 Mvar menjadi 2,70 Mvar (pengurangan 130 kVAR atau 4,59%), dengan persentase *losses* berkurang dari 22,14% menjadi 21,33%. Reduksi *losses* ini mengindikasikan peningkatan efisiensi sistem dari 97,15% menjadi 97,39%, yang disebabkan oleh kemampuan PLTS dalam menyuplai daya lokal, mengurangi arus dari gardu induk, serta menyediakan kompensasi daya reaktif dinamis melalui inverter Grid-tied, sehingga berkontribusi terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional dan peningkatan keandalan sistem distribusi sesuai standar operasional PLN.

5.2 Saran

Setelah penelitian ini dilakukan maka ada beberapa saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya dapat lebih baik lagi yaitu:

1. Mengetahui kelayakan dari sisi ekonomi, disarankan menambahkan analisis ekonomi pada penelitian selanjutnya.
2. Mengetahui kelayakan dan analisis pemasangan PLTS secara detail, disarankan menambahkan penelitian terkait perancangan PLTS

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hayati, "Analisis Kebutuhan Daya pada Jaringan Distribusi 20 KV Sistem Radial A-19," vol. 6, no. 1, pp. 118–121, 2022.
- [2] N. Fitri, N. Y. Irwan, S. Hidayatullah, and M. D. Faraby, "Analisa Penempatan Distributed Generator Pada IEEE 33 Bus Sistem Distribusi Radial," 2023.
- [3] Nazaruddin, Mahalla, and Fauzi, "Analisis Aliran Beban Tak Seimbang Pada Jaringan Distribusi Sistem Radial Feeder Lk 07 Sistem Kelistrikan Lhokseumawe," *Proceeding Semin. Nas. Politek. Negeri Lhokseumawe*, vol. 2, no. 1, pp. 8–13, 2018.
- [4] C. A. Lestari and U. Situmeang, "Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV dengan Metode FMEA pada Penyulang Akasia dan Lele PT PLN (Persero) ULP Kota Barat," vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2021, doi: 10.31849/sainetin.v6i1.7408.
- [5] P. Julianto, "Rekonfigurasi Jaringan Pada Sistem Distribusi Radial Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya," vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2023.
- [6] M. Ali, H. Nurohmah, D. Ajiatmo, and M. Ali, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial 65 Bus Berbasis Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) JEETech," pp. 57–61, 2022.
- [7] A. Penurunan *et al.*, "Tugas akhir," vol. 3, 2022.
- [8] T. Lekhuleni and B. Twala, "SS symmetry Distributed Optimal Placement Generators in Medium Voltage Redial Feeder," pp. 1–23, 2022.
- [9] Strategi Percepatan Pengembangan Plts Atap Di Indonesia," vol. 19, no. 1978, pp. 6407–6424, 2025.
- [10] M. R. Maghami and J. Pasupuleti, "Impact of Photovoltaic Penetration on Medium Voltage Distribution Network," pp. 1–13, 2023.
- [11] O. Ayanlade *et al.*, "Optimal Allocation of Photovoltaic Distributed Generations in Radial Distribution Networks," 2023.
- [12] Tersebar, "Studi Penetrasi Distributed Generation Pada Sistem Distribusi Bantul Feeder Bantul 07," vol. 6, no. 1, 2021.
- [13] TEMPO, "Potensi Energi Surya RI 3.294 GWP, ESDM Sebut Tiga Lokasi Prospektif ini." [Online]. Available: <https://www.tempo.co/ekonomi/potensi-energi-surya-ri-3-294-gwp-esdm-sebut-tiga-lokasi-prospektif-ini-450961>
- [14] IESR, "Potensi Tenaga Surya di Indonesia." [Online]. Available: <https://iesr.or.id/infografis/potensi-tenaga-surya-di-indonesia/>

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. D. S. Wahyuni, R. Rahmat, M. Ayu, M. Dzar, F. Ahmad, and R. Sultan, "Analisa Penempatan Distributed Generation (DG) Dan Kapasitor Bank Pada IEEE 118 - Bus Sistem Distribusi Radial," pp. 13–18, 2023.
2. A. Penempatan, D. A. N. Kapasitas, D. A. N. Rugi, D. Pada, and L. Kain-riau, "Tugas Akhir," 2020.
3. Badan Pusat Statistik, "Badan Pusat Statistik Kota Pekanbaru." [Online]. Available: <https://pekanbarukota.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTc0IzI=/jumlah-pelanggan-listrik-menurut-rayon.html>
4. R. Savira and B. Sudiarto, "Effect of PLTS power factor settings on power losses and voltage conditions in 20 kV medium voltage networks," vol. 6, no. 2, pp. 80–89, 2023.
5. R. Daya, "Pengaruh Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Terhadap Drop Tegangan dan Rugi-Rugi Daya.," vol. 1, 2025.
6. I. B. Suslistiowati, "Meningkatkan Profil Tegangan Dan Mereduksi Rugi-Rugi Daya," vol. 08, pp. 107–116, 2024.
7. M. Fikri, F. R. Priyana, R. A. Setiawan, and M. N. Khawarizmi, "Dampak Pemasangan PLTS pada Sistem Distribusi terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi – Rugi Daya (Studi Kasus Penyulang Nila 111 Bus)," vol. 8, no. 02, pp. 16–20, 2025.
8. Z. Abidin and N. Budiyanto, "Penerangan Jalan Umum (PJU) Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Lingkungan Kampus Politeknik Negeri Bengkalis," vol. 6, pp. 71–76, 2025.
9. A. A. Muzakkir *et al.*, "Penggunaan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Profil Tegangan," pp. 267–273, 2025.
10. M. Ilham, "Analisis Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Mengurangi Drop Tegangan pada Jaringan Distribusi 20 kV Di Penyulang Singapura ULP Pasir Pangaraian PT . PLN (Persero)," vol. 9, no. 2, pp. 58–68, 2025.
11. S. Martondi, R. Tamba, and D. A. Purba, "Perbaikan Drop Voltage Menggunakan Kapasitor Bank pada Sistem Distribusi 6 Bus," vol. 3, no. 6, pp. 1308–1316, 2025.
12. K. D. Shinde and P. B. Mane, "Analysis of Radial Distribution Test Feeders in Presence of Solar Photovoltaic Systems Using PowerFactory," *2022 IEEE Int. Conf. Power Eng. Appl. ICPEA 2022 - Proc.*, no. March, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/ICPEA53519.2022.9744648.
13. S. Bekhet, W. El-Khattam, and A. Magdy, "An Analysis of the Influence That Rooftop Photovoltaic Systems Have on the Characteristics of Distribution Networks Using DIGSILENT Power Factory," *2023 Int. Telecommun. Conf. ITC-Egypt 2023*, no. 1, pp.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

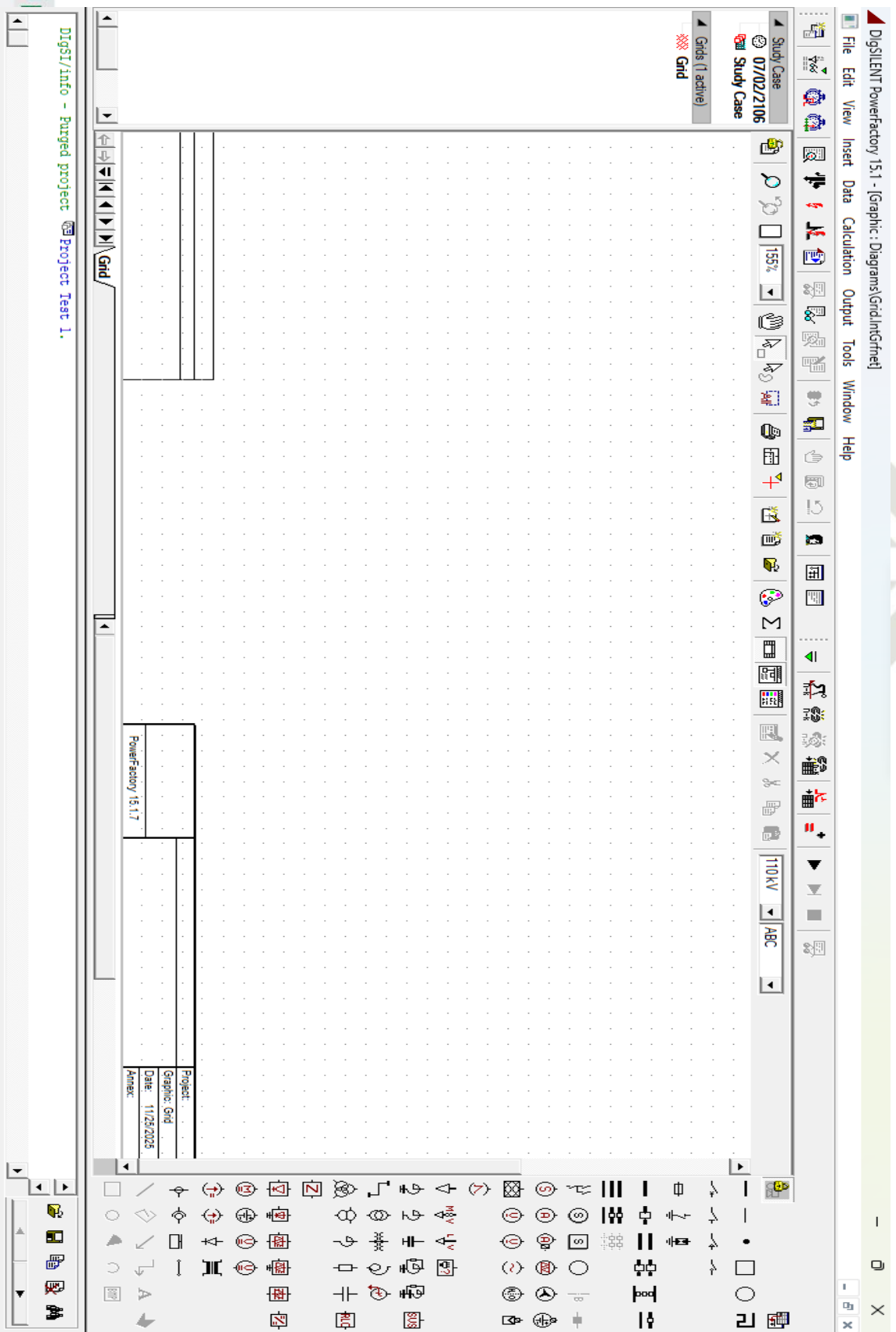
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

- 287–292, 2023, doi: 10.1109/ITC-Egypt58155.2023.10206128.
- [28] C. Acsinte, C. Nemes, and F. C. Baiceanu, “Impact of Distributed Generation on the Performance of Electrical Networks,” *2022 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 601–604, 2022, doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959757.
- [29] B. Bekhet, W. El-khattam, and A. Magdy, “Evaluation Of Rooftop Photovoltaic Penetration Impact on Distribution Networks Voltage Profile And The Impact Of Controlling The PV Inverter Using DIGSILENT Software,” *2023 Int. Telecommun. Conf.*, pp. 293–298, 2023, doi: 10.1109/ITC-Egypt58155.2023.10206346.
- [30] T. Khenissi, “Effects of high PV penetration level on voltage and frequency profile of a distribution network,” pp. 559–564, 2020, doi: 10.1109/SSD49366.2020.9364245.
- [31] A. H. Dharmasakya, “Reactive Power Management in Radial Distribution Grid Connected Photovoltaic System,” no. 4, pp. 251–256, 2020, doi: 10.1109/ICITEE49829.2020.9271680.
- [32] M. W. D. I. D. X, S. Purwo, and Y. A. H. Sitompul, “Analisa Pengaruh Penyambungan PLTS 1 MW Terhadap Arus Hubung Singkat dan Loadflow Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik 87,2 MW di Daerah X,” vol. 11, no. 1, 2023.
- [33] S. Suripto, “Sistem tenaga listrik”.
- [34] T. D. A. N. Distribusi and R. Syahputra, “Transmisi dan distribusi tenaga listrik”.
- [35] Spiderdot, “Tipe-tipe Jaringan Distribusi Tegangan Menengah 20 KV.” [Online]. Available: <https://electricdot.wordpress.com/2011/08/16/tipe-tipe-jaringan-distribusi-tegangan-menengah/>
- [36] Power Systems Analysis 3rd Edition -- Hadi Saadat -- (WeLib.org).pdf.”
- [37] *Distribution System Modeling and Analysis*.
- [38] H. Gönen, C. Ten, and A. Mehrizi-sani, *Electric Power Distribution Engineering*. CRC Press.
- [39] Power System Analysis -- G.Shrinivasan -- (WeLib.org).pdf.”
- [40] Permen-ESDM-No.-28-Tahun-2016.pdf.”
- [41] M. Kapasitor and B. Berbasis, “Optimasi Profil Tegangan Sistem Distribusi 6-Bus,” vol. , no. 6, pp. 224–234, 2025.
- [42] D. Rahmat, T. Yang, and M. Esa, “Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code } Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia , bahwa untuk menjamin peningkatan pemenuhan kebutuhan penyediaan tenaga listrik yang aman , andal , dan efisien , perlu penyesuaian aturan jaringan sistem bahwa untuk mendorong peran pembangkit energi baru dan terbarukan dalam jaringan sistem tenaga listrik , perlu

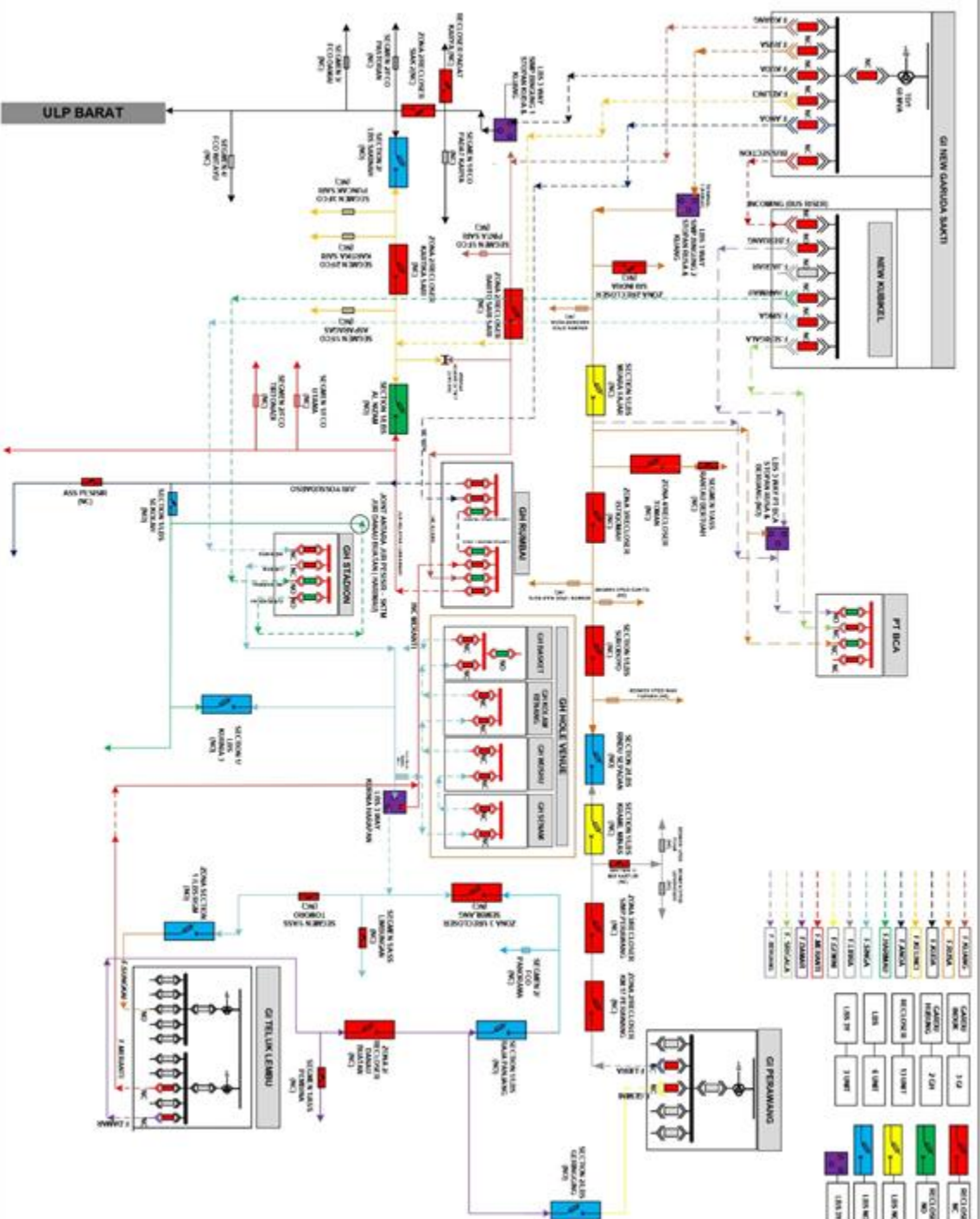
- aturan jaringan sistem tenaga listrik (grid code); dalam huruf a dan huruf b , perlu menetapkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang Aturan Mengingat,” no. 3, 2020.
 - [43] G. Penempatan, “— Distributed Generator, Cucko Search Algorithm, Rugi Daya, Aliran Daya.,” vol. 6, no. November, pp. 153–162, 2025.
 - [44] SOLUSI, “Ini Delapan PLTS yang Dibangun Pemerintah Tahun 2016,” 2016. [Online]. Available: <https://environment-indonesia.com/articles/ini-delapan-plts-yang-dibangun-pemerintah-tahun-2016/>
 - [45] M. Hadi *et al.*, “Literature Review : Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indoensia,” vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025.
 - [46] H. Bayu and J. Windarta, “Tinjauan Kebijakan dan Regulasi Pengembangan PLTS di,” vol. 2, no. 3, pp. 123–132, 2025, doi: 10.14710/jebt.2021.10043.
 - [47] “JINKO SOLAR DATA SHEET JKM545-565M-72HL4-BDVP-EN.pdf.”
 - [48] S. Prayogo, “Pengembangan Sistem Manajemen Baterai Pada PLTS Menggunakan On-Off Grid Tie Inverter,” vol. 9, no. November, pp. 58–63, 2019.
 - [49] T. Digsilent, “PowerFactory 15”.
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LAMPIRAN A

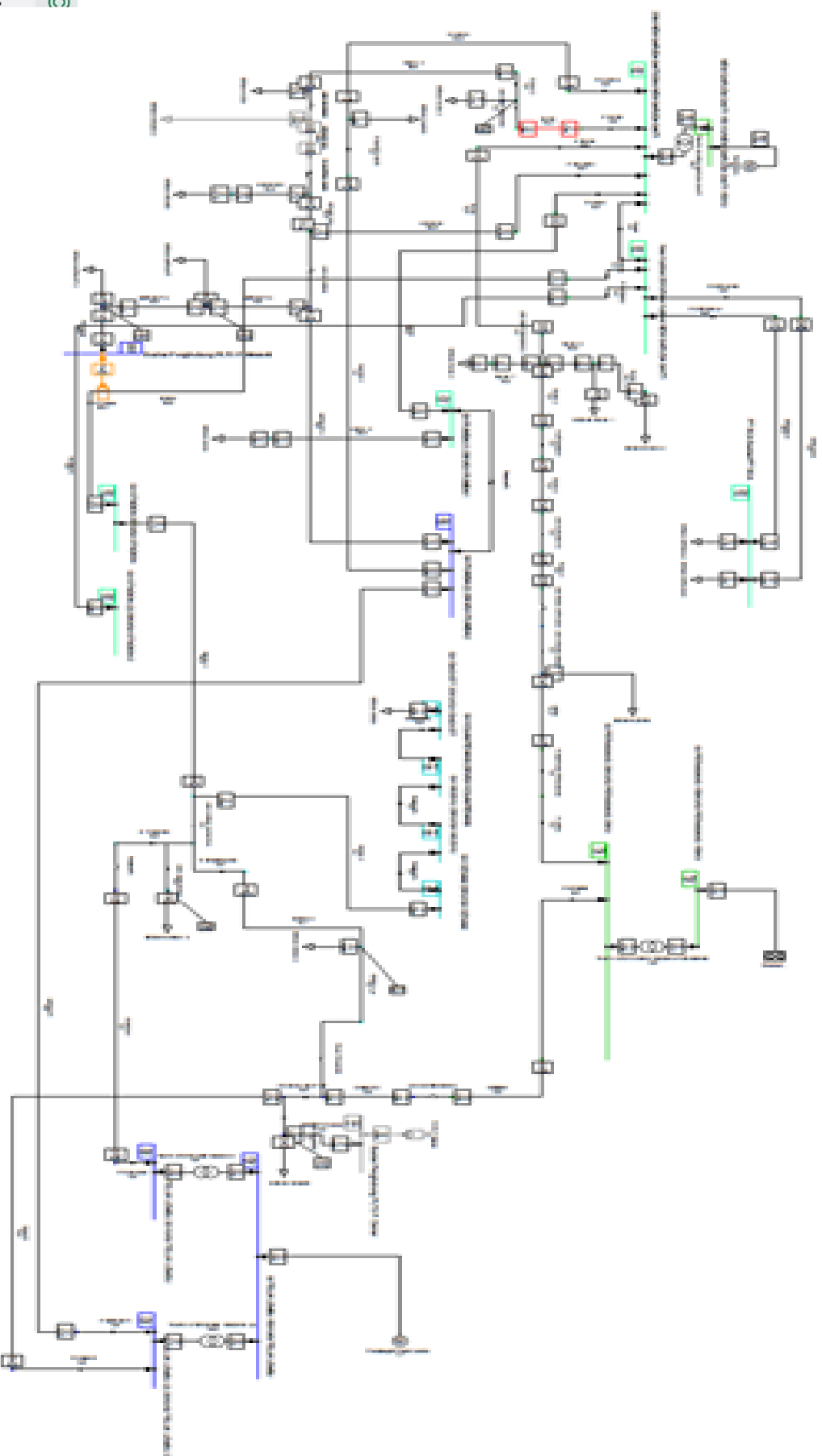
Lampiran Antarmuka *Software DigSILENT*



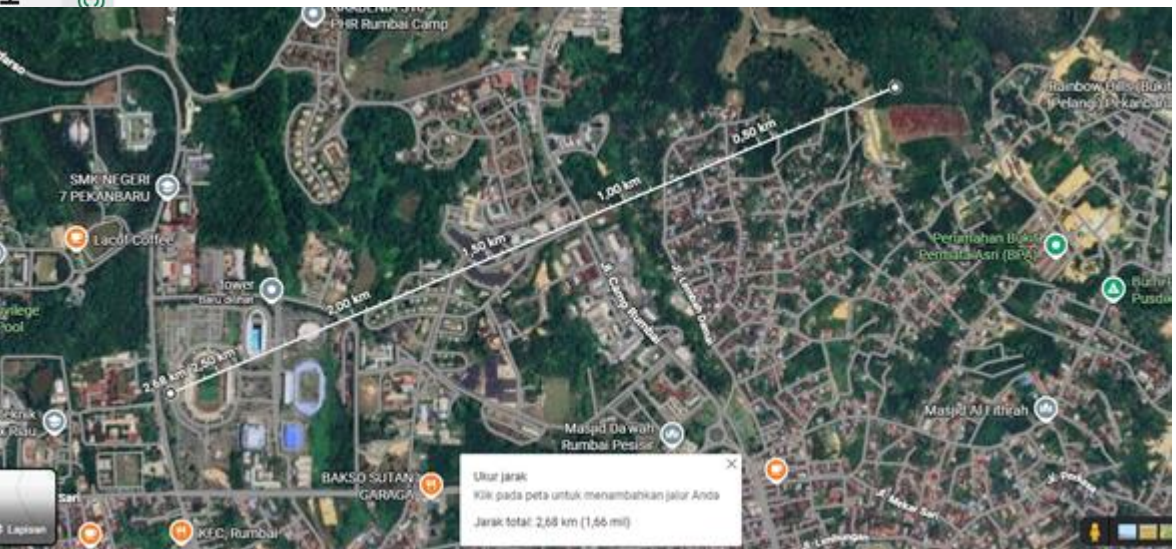
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



a Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

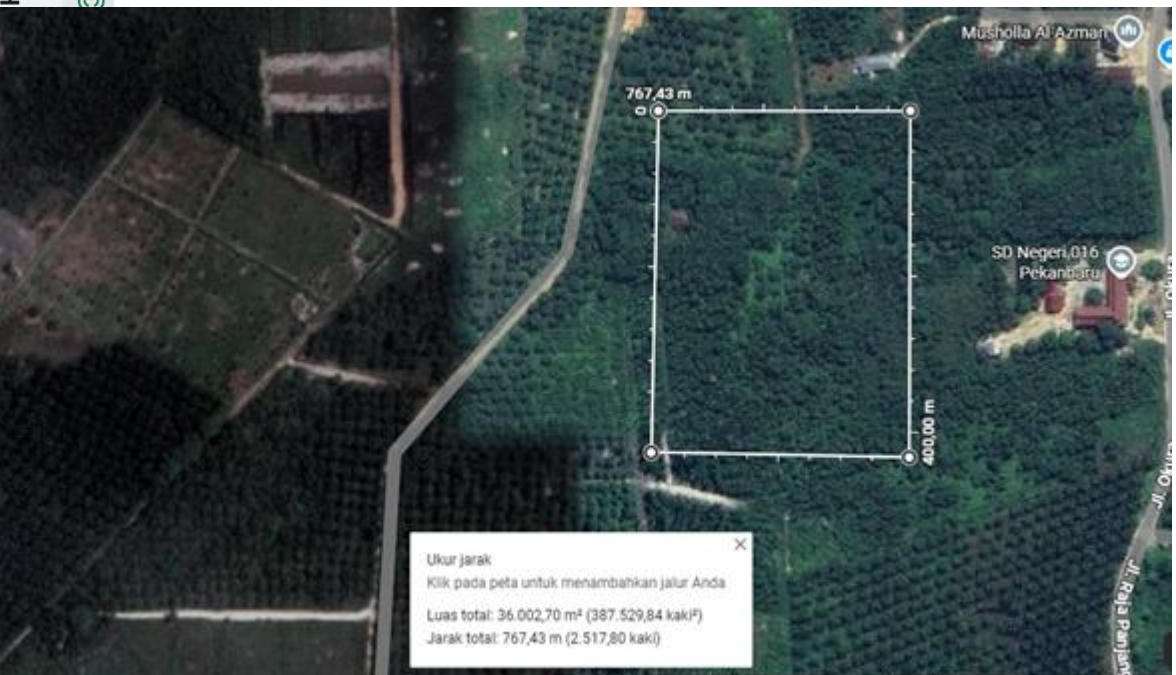


UIN SUSKA RIAU

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.





1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LAMPIRAN B

Tabel Jenis Konduktor: AAAC / AAAC-S

Penampang (mm ²)	Impedansi Urutan Positif (Ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/km)	Kuat Hantar Arus (A)
16	2,0161 + j0,4036	2,1641 + j1,6911	105
25	1,2903 + j0,3895	1,4384 + j1,6770	135
35	0,9217 + j0,3790	1,0697 + j1,6665	170
50	0,6452 + j0,3678	0,7932 + j1,6553	210
70	0,4608 + j0,3572	0,6088 + j1,6447	255
95	0,3096 + j0,3449	0,4876 + j1,6324	320
120	0,2688 + j0,3376	0,4168 + j1,6324	365
150	0,2162 + j0,3305	0,3631 + j1,6180	425
240	0,1344 + j0,3158	0,2824 + j1,6034	585

Tabel Jenis Konduktor: Kabel Tanah NA2XSEBY (XLPE)

Penampang (mm ²)	Impedansi Urutan Positif (Ohm/km)	Impedansi Urutan Nol (Ohm/km)	Kuat Hantar Arus (A)
× 150	0,206 + j0,104	0,356 + j0,312	259
× 240	0,125 + j0,097	0,275 + j0,029	338
× 300	0,100 + j0,094	0,250 + j0,282	380

Tabel Data Impedansi Transformator

JENIS TRAFO	KV PR IM ER	KV SEKUN DER	FLA PRIMER	FLA SEKU NDER	POSITIVE SEQUENCE					ZERO SEQUENCE				
					%Z	X / R	R/X	% X	%R	% Z	X/ R	R/X	%X	%R

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

JENIS TRAF0	KV PRIMER	KV SEKUNDER	FLA PRIMER	FLA SEKUNDER	POSITIVE SEQUENCE					ZERO SEQUENCE				
TRAF0 60 MVA STEP DOWN	150	20	230.9	1732	12.5	45	0.022	12.497	0.278	12.5	45	0.022	12.497	0.278

Tabel Informasi Asset Sistem Distribusi ULP Rumbai

NO	PENYULANG	BEBAN (A)	BEBAN (MW)	PANJANG PENYULANG (KMS)	JUMLAH GARDU	TOTAL MW GARDU	NERACA BEBAN GARDU
1	GINEWGS-ANOA-CB	185	5.4	11.1	49	7.9	68.9%
2	GINEWGS-KELINCI-CB	216	6.4	27.6	46	7.4	85.8%
3	GINEWGS-KUDA-CB	233	6.9	45.5	91	12.7	54.0%
4	GINEWGS-RUSA-CB	142	4.2	64.2	53	5.6	74.6%
5	GINEWGS-SINGA-CB	132	3.9	4.3	56	12.9	30.1%
6	GINEWGS-SERIGALA-CB	102	3.0	5.8	1	3.15	95.2%
7	GINEWGS-KIJANG-CB	92	2.7	14.8	35	4.4	61.5%
8	GINEWGS-HARIMAU-CB	116	3.4	5.8	41	5.3	64.4%
9	GINEWGS-BERUANG-CB	4	0.1	3.3	1	0.6	19.6%
10	GITL-DAMAR-CB	164	4.8	56.4	60	6.5	74.2%
11	GITL-MERANTI-CB	52	1.5	7	28	2.6	58.8%
12	GITL-SUNGKAI-CB	4	0.1	6.2	1	0.25	47.1%
TOTAL	ULP RUMBAI	1442	42.4	252	462	69.3	61.2%

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Abdul Hamid Khalilullah, Lahir di Pekanbaru pada tanggal 14 Mei 2004, penulis merupakan putra dari Bapak Hanifulkhair dan Ibu Delita Febriana. Tumbuh dalam lingkungan keluarga yang hangat bersama dua Saudara, Khairunnisa' dan Karim Abdullah, penulis dibentuk menjadi pribadi yang penuh semangat dalam mengejar impian.

Perjalanan akademik penulis dimulai sejak usia dini di TK Kembang Harapan, yang kemudian berlanjut ke SDN 017 Pandau Jaya hingga lulus pada tahun 2016. Semangat menuntut ilmu membawa penulis melangkah ke SMPN 4 Pekanbaru, dan menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Pekanbaru pada tahun 2022 dengan mengambil peminatan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) sesuai dengan minat dan ketertarikan penulis terhadap dunia eksakta.

Pada tahun 2022, penulis diterima di program studi pilihannya, Teknik Elektro UIN Sultan Syarif Kasim Riau, dan mengambil konsentrasi Energi pada semester 5. Di samping akademik, penulis aktif mengembangkan kapasitas kepemimpinan melalui organisasi, di mana penulis diamanahkan sebagai Ketua divisi Elektrik Vehicle Sumatra Energy And Sustainability Club (SESCLUB) Periode 2024-2025.

Berkat ketekunan dan izin Allah SWT, penulis berhasil menuntaskan masa studi pada awal tahun 2026 dengan tugas akhir berjudul **"Analisis Penempatan dan Kapasitas Optimal Distributed Generation Berbasis PLTS untuk Mitigasi Drop Tegangan pada Sistem Distribusi Radial 20 kV Berdasarkan Standar SPLN 1:1995"**. Pencapaian ini merupakan perwujudan cita-cita penulis untuk mendalami sistem *Power*, khususnya teknologi Sistem Tenaga Listrik. Penulis berharap karya sederhana ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan bermanfaat bagi siapa saja yang membutuhkannya.

No. HP : 0822-4191-1967
Email : hamidkhaa0514@gmail.com
Instagram : @hamidkhaa__