

**DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA PENYULANG ROBUSTA
MENGUNAKAN METODE *EXTENDED IMPEDANCE*
*BASED FAULT-LOCATION***

(Skripsi)

**Oleh
PIZ RONI
NPM 2115031031**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA PENYULANG ROBUSTA MENGUNAKAN METODE *EXTENDED IMPEDANCE BASED FAULT-LOCATION*

Oleh

PIZ RONI

Penyulang Robusta merupakan salah satu penyulang di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Liwa, Kabupaten Lampung Barat, yang menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk Liwa hingga ke pelanggan pada tegangan menengah 20 kV. Dalam operasionalnya, penyulang ini kerap mengalami gangguan, khususnya gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (*single line-to-ground fault*), yang dapat menyebabkan pemadaman dan menurunkan keandalan sistem distribusi. Penentuan lokasi gangguan secara cepat dan tepat sangat penting untuk mempercepat proses penanganan dan pemulihan sistem. Penelitian ini menerapkan metode *Extended Impedance-Based Fault Location* untuk mengestimasi lokasi gangguan satu fasa ke tanah pada Penyulang Robusta, dengan menggunakan data arus dan tegangan gangguan di gardu induk serta impedansi saluran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini menghasilkan tingkat akurasi yang bervariasi, tergantung pada jarak bus dari gardu induk dan kondisi ketidakseimbangan beban. Pada bus terdekat, tingkat kesalahan estimasi lokasi gangguan hanya sebesar 8%, sedangkan pada bus yang lebih jauh, kesalahan estimasi mencapai 30–34%. Hasil ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi metode yang digunakan.

Kata kunci: Sistem Distribusi, Gangguan Satu Fasa Ke Tanah, Estimasi Lokasi Gangguan, *Extended Impedance Based Fault Location*.

ABSTRAK

FAULT LOCATION DETECTION ON ROBUSTA FEEDER USING EXTENDED IMPEDANCE-BASED FAULT LOCATION METHOD

By

PIZ RONI

The Robusta Feeder is one of the feeders in the working area of PT PLN (Persero) ULP Liwa, West Lampung Regency, which distributes electrical energy from Liwa Substation to customers at a medium voltage of 20 kV. In its operation, this feeder frequently experiences disturbances, particularly single line-to-ground faults, which can cause power outages and reduce the reliability of the distribution system. Rapid and accurate fault location determination is crucial for accelerating the handling process and system recovery. This research applies the Extended Impedance-Based Fault Location method to estimate the location of single line-to-ground faults on the Robusta Feeder, using fault current and voltage data at the substation as well as line impedance. Simulation results show that this method produces varying levels of accuracy, depending on the bus distance from the substation and load imbalance conditions. At the nearest bus, the fault location estimation error is only 8%, while at more distant buses, the estimation error reaches 30–34%. These results indicate that load imbalance has a significant influence on the accuracy of the method used.

Keywords: Distribution System, Single Line-to-Ground Fault, Fault Location Estimation, Extended Impedance-Based Fault Location.

**DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA PENYULANG ROBUSTA
MENGUNAKAN METODE *EXTENDED IMPEDANCE*
*BASED FAULT-LOCATION***

Oleh

PIZ RONI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025


**Judul Skripsi : DETEKSI LOKASI GANGGUAN PADA
PENYULANG ROBUSTA MENGGUNAKAN
METODE *EXTENDED IMPEDANCE BASED*
FAULT-LOCATION**

Nama Mahasiswa : Riz Roni
Pokok Mahasiswa : 2115031031
Program Studi : Teknik Elektro
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

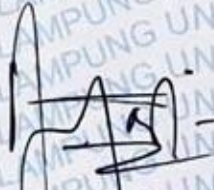

Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.
NIP. 19700719 200012 1 001


Ubaidah, S.T., M.T.
NIP. 19951122 202321 2 036

2. Mengetahui


Ketua Jurusan
Teknik Elektro

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


Ketua Program Studi
Teknik Elektro

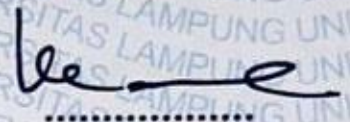
Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Eng. Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.



Sekretaris

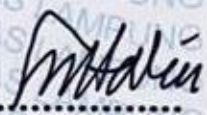
: Ubaidah, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.





2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi

: 20 Mei 2025

SURAT PERNYATAAN

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

Apabila di kemudian hari terdapat ketidakbenaran pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Juni 2025



Piz Roni

NPM. 2115031031

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Negeri Ratu, Kecamatan Sukau, Kabupaten Lampung Barat pada tanggal 09 September 2002. Penulis merupakan anak bungsu dari empat bersaudara, putra dari Bapak Asrori dan Ibu Hoiriah. Penulis memiliki riwayat pendidikan sebagai berikut: Pendidikan formal diawali pada tahun 2009 di SD Negeri 01 Buay Nyerupa dan diselesaikan pada tahun 2015. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Sukau dan lulus pada tahun 2018. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Negeri 1 Liwa dan lulus pada tahun 2021. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti organisasi tingkat jurusan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Universitas Lampung sebagai anggota divisi Pendidikan selama dua periode pada tahun 2022-2024. Selain berorganisasi, penulis juga bergabung menjadi asisten di Laboratorium Teknik Digital (LAB-TD). Penulis juga pernah mengikuti Program Kerja Praktik di PT. PLN (Persero) ULP LIWA dari bulan Januari hingga Februari 2024 dengan mengangkat judul "Penentuan Rating NH-Fuse dan Fuselink Sebagai Pengaman Trafo Distribusi 20 kV di Wilayah Kerja PT PLN (Persero) ULP Liwa" untuk Laporan Kerja Praktik.



Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah
Kupersembahkan karya kecil ini untuk orang-orang yang kusayangi:

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Untuk Ayahanda Asrori dan Ibunda Hoiriah,
Setiap huruf dalam karya ini adalah wujud cinta dan pengorbanan kalian. Di balik pencapaian ini, tersimpan jutaan doa yang kalian panjatkan dalam keheningan malam. Maafkan anakmu yang belum mampu membalas samudra kasih sayang kalian. Semoga Allah membalas kebaikan kalian dengan surga-Nya yang tak pernah ku mampu berikan.

Saudara-Saudaraku Tersayang

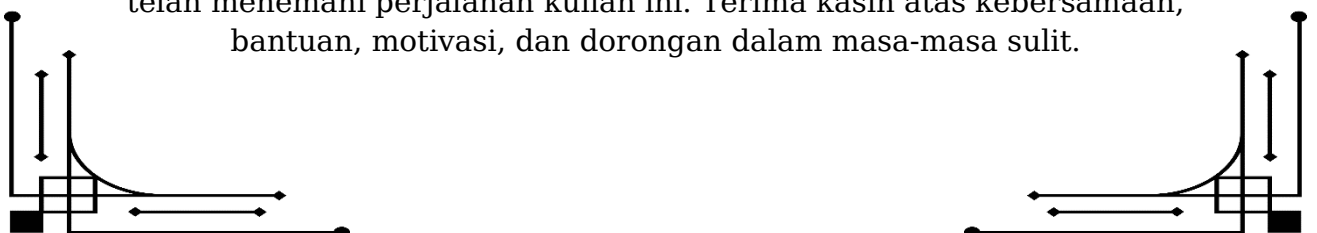
Untuk kakak-kakakku, terima kasih atas doa dan bantuan kalian selama ini. Terima kasih telah menjadi penyemangat dan pendorong langkahku untuk terus berjuang menggapai cita-cita.

Bapak/Ibu Dosen Pembimbing Dan Penguji

Terima kasih atas kesabaran, bimbingan, dan ilmu yang tak ternilai. Setiap kritik dan saran bapak/ibu telah memahat diriku menjadi pribadi yang lebih baik. Semoga Allah membalas kebaikan kalian berlipat ganda.

Sahabat dan Teman-Teman

Terima kasih untuk sahabat dan teman-teman seperjuangan yang telah menemani perjalanan kuliah ini. Terima kasih atas kebersamaan, bantuan, motivasi, dan dorongan dalam masa-masa sulit.





MOTTO

وَمَنْ يَتَّقِ اللَّهَ يَجْعَلْ لَهُ مَخْرَجًا

“Dan barangsiapa bertakwa kepada Allah, niscaya Dia akan membukakan baginya jalan keluar”.

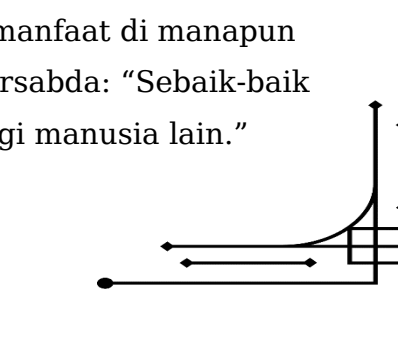
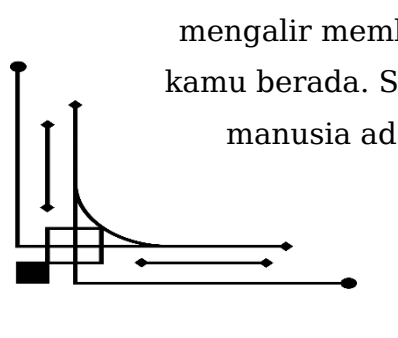
(QS. At-Talaq: 2)

“Dalam rangkaian kehidupan, setiap hambatan adalah resistor yang menguji ketahananmu. Allah SWT berfirman “Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan, sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(QS. Al-Insyirah: 5-6)

“Seperti impedansi kompleks yang terdiri dari komponen nyata dan imajiner, kehidupan manusia harus seimbang antara dunia dan akhirat. “Dan carilah (pahala) negeri akhirat dengan apa yang telah dianugerahkan Allah kepadamu, tetapi janganlah kamu lupakan bagianmu di dunia.”

(QS. Al-Qasas: 77)



“Ilmu adalah cahaya yang tak pernah padam. Seperti arus listrik yang mengalir membawa terang, jadilah pembawa manfaat di manapun kamu berada. Sebagaimana Rasulullah SAW bersabda: “Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia lain.”

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan ridha-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Deteksi Lokasi Gangguan Pada Penyulang Robusta Menggunakan Metode *Extended Impedance Based Fault-Location*” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro. Dalam perjalanan menyusun karya ilmiah ini, penulis menyadari adanya keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki. Namun berkat bimbingan, bantuan, serta arahan dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Perjalanan akademik ini tentu tidak lepas dari dukungan dan kontribusi berharga dari banyak pihak yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membantu penulis. Tanpa uluran tangan dan ketulusan hati mereka, karya ini mungkin tidak akan pernah terwujud. Oleh karena itu, pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Ayahanda Asrori dan Ibunda Khoiriah yang tiada hentinya mencurahkan kasih sayang, memberikan dukungan moral maupun material, serta doa yang tulus dan tiada putus untuk keberhasilan dan kesuksesan penulis.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM. selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

5. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Ir. Khairudin, Ph.D.Eng. selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan arahan, bimbingan, motivasi, serta bantuan dengan baik, ramah, dan penuh kesabaran dalam membimbing pengerjaan skripsi ini.
7. Ibu Ubaidah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang selalu memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing, memberikan arahan, dan nasihat seputar perkuliahan dan akademik, dan dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran yang membangun kepada penulis dalam pengerjaan skripsi ini.
9. Dosen-dosen yang telah mengajar dan membagikan ilmunya sehingga penulis dapat menjalani perkuliahan dengan baik, serta staf dan administrasi di Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu proses administrasi selama perkuliahan.
10. Kakak-kakakku tercinta (Yeni Yunita, Santri Yana, dan Puspita Dewi) yang senantiasa membantu penulis dengan sepenuh hati, selalu memberikan dukungan moral dan spiritual serta doa yang tulus sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan hingga saat ini.
11. Terima kasih yang mendalam kepada keluarga besar dari pasangan Bapak Asrori dan Ibu Khoiriah, yaitu abang-abangku (Yoyon Effendi, Edison Saputra, Roni Apriyansyah), kakak-kakakku (Yeni Yunita, Santri Yana, Puspita Dewi), keponakan tercinta (Nafila, Aulia, Resya, Assyifa, Kenzi, Aqila dan adik Arsyah), serta Among dan Ajong tercinta yang selalu memberikan kehangatan keluarga dan dukungan yang tak terhingga.
12. Asni Rahma Tika seseorang yang telah membantu penulis dari awal hingga akhir perkuliahan, yang senantiasa selalu memberikan semangat, bantuan dan menjadi patner yang selalu ada dari masa-masa sulit hingga sekarang.
13. Rekan-rekan seperjuangan: Ruli, Arya, Jefri, dan Rijal yang telah berjuang bersama sejak awal masa perkuliahan, berbagi suka dan duka, serta senantiasa

memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis dalam menghadapi berbagai tantangan perkuliahan.

14. Keluarga besar Asisten Laboratorium Teknik Digital (LAB-TD): Kak Aris selaku PLP yang selalu memberikan motivasi yang menginspirasi, dukungan yang tulus, dan semangat yang tak pernah padam, serta teman-teman asisten laboratorium Teknik Digital Angkatan 2021 yang senantiasa membantu penulis untuk terus berkembang dan belajar banyak hal berharga, serta adik-adik asisten lainnya yang telah memberikan suasana kerja yang menyenangkan.
15. Kawan-kawan sepengkaderan di (EXALTO) 2021 yang telah berjuang bersama sejak awal masa perkuliahan, melewati masa pengkaderan penuh tantangan, masa kepengurusan HIMATRO dengan segala dinamikanya hingga menjadi demisioner, sampai akhirnya bersama-sama menyelesaikan masa studi dengan penuh kebanggaan.
16. Segenap keluarga besar HIMATRO Universitas Lampung yang telah memberikan wadah dan kesempatan berharga untuk mengembangkan diri serta memberikan pelajaran tak ternilai dalam berorganisasi dan kepemimpinan.
17. Diri sendiri (Piz Roni), terima kasih yang terdalam untuk setiap perjuangan yang telah ditempuh selama ini dengan gigih dan tanpa kenal menyerah, terima kasih untuk selalu tetap kuat dan bersemangat hingga saat ini dan hingga akhir hayat nanti. Semoga selalu mampu mempertahankan sikap rendah hati dan senantiasa bersyukur atas segala pencapaian dan keberkahan hidup.

Bandar Lampung, 12 Juni 2025

Penulis

Piz Roni

NPM. 2115031031

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN.....	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	3
1. 3 Tujuan Penelitian	3
1. 4 Batasan Masalah.....	3
1. 5 Manfaat Penelitian	4
1. 6 Hipotesis.....	4
1. 7 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2. 1 Penelitian Terdahulu	6
2. 2 Sistem Tenaga Listrik	8
2. 3 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	9
2.3.1 Penyulang Distribusi	11
2.3.2 Komponen Sistem Distribusi	14
2. 4 Peralatan Pada Gardu Induk (GI).....	17
2. 5 Gangguan Pada Sistem Distribusi.....	19

2.5.1 Gangguan Hubung Singkat.....	20
2.5.2 Faktor Penyebab Gangguan Hubung Singkat	23
2.5.3 Dampak Gangguan Hubung Singkat.....	24
2. 6 Metode Penentuan Lokasi Gangguan.....	25
2.6.1 Metode impedansi.....	25
2.6.2 Prinsip Kerja Metode Impedansi	26
2.6. 3 Identifikasi Lokasi Gangguan	29
2.6. 4 Impedansi Ekivalen Bus Dengan Matriks Admitansi	30
III. METODOLOGI PENELITIAN	36
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	36
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	36
3.3 Prosedur Penelitian.....	37
3.4 Pemodelan Sistem	38
3.5 Data Penghantar dan Panjang Saluran	39
3.6 Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan	41
3.6.1 Gangguan Hubung Singkat 1 Safa Ke Tanah	42
3.7 Sistem Kelistrikan	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	Error! Bookmark not defined.
4.1 Simulasi Gangguan pada Penyulang.....	Error! Bookmark not defined.
4.2 Perhitungan Estimasi Lokasi Jarak Gangguan	Error! Bookmark not defined.
V. KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Proses penyaluran tenaga listrik sampai pelanggan.	8
2.2 Hubungan antara TM, TR dan pelanggan.	10
2.3 Konfigurasi radial.....	13
2.4 Konfigurasi <i>loop</i>	14
2.5 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah.....	22
2.6. Komponen-komponen simetris	29
2.7 Rangkaian komponen urutan positif (a), negatif (b) dan nol (c).....	29
2.8 Diagram impedansi system sederhana	30
2.9 Diagram masuk system	31
3.1 Diagram alir penelitian.....	38
3.2 Gangguan 1 fasa ke tanah.	42
3.3 <i>Single Line Diagram</i> Penyulang Robusta	44

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 3.1 Ukuran dan konstruksi kabel AAAC berdasarkan SPLN 41-8:1981....	39
Tabel 3.2 Data impedansi dan panjang saluran penyulang.....	45
Tabel 3.3 Data beban untuk masing-masing gardu.....	47
Tabel 3.4 Total jarak pengukuran lokasi gangguan.	49
Tabel 3.5 Data gardu induk penyulang	49
Tabel 4.1 Tegangan Fasa-A Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah. Error! Bookmark not defined.	
Tabel 4.2 Arus Fasa A pada Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah.. Error! Bookmark not defined.	
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Estimasi Lokasi Gangguan..... Error! Bookmark not defined.	

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan komponen penting dalam penyaluran energi listrik dari sumber pembangkit hingga ke konsumen akhir. Salah satu komponen utama dalam sistem distribusi adalah penyulang (*feeder*), yang berperan dalam menyalurkan energi listrik dari Gardu Induk (GI) ke pelanggan. Di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Liwa, Kabupaten Lampung Barat, Penyulang Robusta menghubungkan GI Liwa dengan Gardu Hubung (GH) dan beroperasi pada tegangan menengah 20 kV. Penyulang ini melayani wilayah yang cukup luas, mencakup Seranggas, Bahway, Sukarame, Talang 8, Sukau, Tapak Siring, Talang Jawa, Jaga Raga, Sulung, Teba Pering, Lumbok Seminung, dan Tawan, dengan beban kerja yang cukup besar.

Dalam operasionalnya, sistem tenaga listrik tidak akan terlepas dari adanya gangguan yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti cuaca buruk, gangguan lingkungan sekitar, atau kerusakan peralatan[1]. Gangguan yang terjadi akan menyebabkan area terdampak mengalami pemadaman, bahkan dapat memengaruhi sistem-sistem lain yang terhubung dalam jaringan. Kondisi ini dapat menimbulkan kerusakan bersifat sementara maupun permanen, baik pada peralatan jaringan maupun pada sistem distribusi secara keseluruhan, yang akhirnya merugikan konsumen dan mengganggu aktivitas masyarakat[2]. Jaringan distribusi tenaga listrik memiliki cakupan jarak yang panjang dan menyebar, sehingga ketika terjadi gangguan, seringkali sulit untuk menentukan lokasi pasti terjadinya gangguan tersebut. Kesulitan dalam menentukan lokasi gangguan ini tentu menjadi kendala bagi teknisi dalam melakukan penanganan secara cepat dan tepat. Apabila gangguan dibiarkan terlalu lama, hal ini dapat menimbulkan kerugian besar, baik bagi konsumen maupun produsen tenaga

listrik. Oleh karena itu, penentuan lokasi gangguan dengan cepat dan akurat menjadi sangat penting untuk meminimalkan waktu pemadaman[3].

Metode impedansi merupakan pendekatan yang dapat digunakan dalam penentuan lokasi gangguan pada sistem distribusi[4]. Metode ini bekerja dengan menghitung impedansi dari titik sumber hingga titik gangguan berdasarkan data arus dan tegangan yang terukur di gardu induk[5]. Untuk menentukan lokasi gangguan dengan metode impedansi, diperlukan data-data saat terjadi gangguan hubung singkat, antara lain arus gangguan per fasa, tegangan fasa saat gangguan di gardu induk, nilai impedansi fasa saluran, serta data arus beban yang dihitung berdasarkan arus beban sebelum gangguan, tegangan sebelum gangguan, dan tegangan setelah gangguan[6].

Metode *Extended Impedance-Based Fault Location* merupakan pendekatan yang lebih menyeluruh dalam mendeteksi lokasi gangguan pada jaringan distribusi. Pendekatan ini memberi estimasi lokasi gangguan yang lebih presisi dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti variasi arus gangguan, jenis gangguan, dan konfigurasi sistem distribusi yang kompleks. Penerapan metode ini pada sistem distribusi seperti Penyulang Robusta dapat memberikan manfaat signifikan dalam meningkatkan kecepatan dan akurasi deteksi lokasi gangguan dengan lebih cepat dan akurat, sehingga mempercepat proses perbaikan, meminimalkan durasi pemadaman, serta meningkatkan keandalan dan kualitas layanan distribusi tenaga listrik kepada masyarakat. Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis memilih judul "Deteksi Lokasi Gangguan Pada Penyulang Robusta Menggunakan Metode *Extended Impedance-Based Fault Location*".

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mendeteksi lokasi gangguan pada Penyulang Robusta dengan menggunakan Metode *Extended Impedance Based Fault-Location*?
2. Bagaimana tingkat akurasi metode *Extended Impedance-Based Fault Location* dalam mendeteksi lokasi gangguan pada Penyulang Robusta dibandingkan dengan data lokasi gangguan sebenarnya?
3. Apakah penerapan metode *Extended Impedance-Based Fault Location* dapat memberikan estimasi lokasi gangguan yang lebih akurat pada sistem distribusi dengan konfigurasi jaringan yang kompleks seperti Penyulang Robusta?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi lokasi gangguan yang efektif dan efisien, sehingga dapat mempercepat penanganan gangguan ketika gangguan tersebut terjadi.
2. Menerapkan metode *Extended Impedance-Based Fault Location* dalam menentukan estimasi lokasi gangguan *Single Line to Ground* (SLG) pada sistem distribusi 20kV Penyulang Robusta PLN ULP Liwa.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada Penyulang Robusta di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Liwa, Kabupaten Lampung Barat.
2. Gangguan yang dianalisis pada penelitian ini telah ditentukan, yaitu gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (*Single Line To Ground*).
3. Ketidakseimbangan sistem pada penyulang Robusta diakibatkan oleh ketidakseimbangan beban.
4. Pada penelitian tugas akhir ini, seluruh data diperoleh dari hasil pengambilan data lapangan di UP2D Lampung.

5. penelitian ini terfokus pada sistem distribusi radial lurus tanpa percabangan lateral atau sublateral. Seluruh beban diasumsikan terdistribusi sepanjang jalur utama penyulang, sehingga tidak memperhitungkan kompleksitas jaringan dengan percabangan ke sisi lain.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan keandalan dan kualitas layanan sistem distribusi tenaga listrik dengan meminimalkan waktu pemadaman akibat gangguan.
2. Meminimalkan kerugian yang ditimbulkan akibat gangguan dengan penanganan yang lebih cepat dan tepat.
3. Memberikan informasi yang bermanfaat bagi PT PLN (Persero) ULP Liwa dalam pengelolaan dan pemeliharaan sistem distribusi, khususnya penyulang Robusta.
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang melakukan penelitian terkait topik yang sejenis dengan penelitian ini.

1.6 Hipotesis

Adapun hipotesis dari Laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

Pada penelitian ini akan dilakukan studi untuk mendeteksi lokasi gangguan yang efektif dan akurat dengan menggunakan metode *Extended Impedance-Based Fault Location*. Metode ini mampu memberikan estimasi lokasi gangguan satu fasa ke tanah secara efektif dan cukup akurat pada sistem distribusi radial lurus tanpa percabangan, dengan tingkat kesalahan estimasi yang masih berada dalam batas toleransi teknis untuk keperluan identifikasi dan penanganan gangguan.

1. 7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan Laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Berisi Mengenai Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Perumusan Masalah, Batasan Masalah, Manfaat Penelitian, Hipotesis, Metodologi Penelitian, Dan Sistematika Penulisan Laporan Tugas Akhir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang beberapa teori pendukung dan referensi materi yang diperoleh dari berbagai sumber buku, jurnal, datasheet dan penelitian ilmiah yang digunakan untuk penulisan laporan tugas akhir ini.

III. METODELOGI PENELITIAN

Berisi tentang waktu, tempat, alat, bahan, metode penelitian dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pembahasan hasil simulasi dan analisis hasil pengujian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran yang di dasarkan pada hasil data penelitian untuk perbaikan dan pengembangan yang lebih lanjut agar mendapatkan hasil yang lebih baik dari penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai landasan teoretis yang berfungsi sebagai referensi pembandingan dan pedoman dalam penelitian guna menunjukkan kebaruan dan originalitas penelitian ini, serta untuk mencegah persepsi adanya duplikasi dengan kajian-kajian terdahulu, maka dalam tinjauan pustaka berikut ini disajikan beberapa temuan dari penelitian sebelumnya:

1. Penelitian oleh Mustapha Zahri, dkk. (2015).

Penelitian yang dilakukan oleh Mustapha Zahri, dkk. dengan judul "*Simplified Method for Single Line to Ground-Fault Location in Electrical Power Distribution Systems*" membahas tentang pengembangan metode yang lebih sederhana untuk mencari lokasi gangguan satu fasa ke tanah pada sistem distribusi tenaga listrik. Peneliti membuat algoritma baru yang tidak menggunakan pendekatan iteratif seperti biasanya, tetapi memanfaatkan jumlah arus dari ketiga fasa untuk menentukan arus gangguan. Cara ini berhasil mengurangi beban perhitungan yang diperlukan. Pengujian dilakukan melalui simulasi dengan data jaringan distribusi bawah tanah yang nyata. Setelah dibandingkan dengan algoritma iteratif biasa, hasilnya menunjukkan bahwa metode ini lebih efisien dan akurat dalam menentukan lokasi gangguan[7].

2. Penelitian oleh Youssef Menchafou, dkk. (2017).

Penelitian yang dilakukan oleh Youssef Menchafou, dkk. dengan judul "*Optimal Load Distribution Estimation for Fault Location in Electric Power Distribution Systems*", membahas tentang teknik untuk mengestimasi distribusi beban yang optimal sebagai pengganti beban nyata dalam algoritma pencarian lokasi gangguan. Tujuan utamanya adalah meningkatkan keakuratan metode berbasis impedansi

yang sangat bergantung pada kondisi beban saat gangguan terjadi. Keunggulan teknik ini adalah tidak perlu melakukan pengukuran di setiap titik beban, cukup menggunakan data total beban dari gardu induk dan topologi jaringan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi beban yang seimbang (*balanced*) menghasilkan kesalahan estimasi lokasi gangguan yang paling kecil[3].

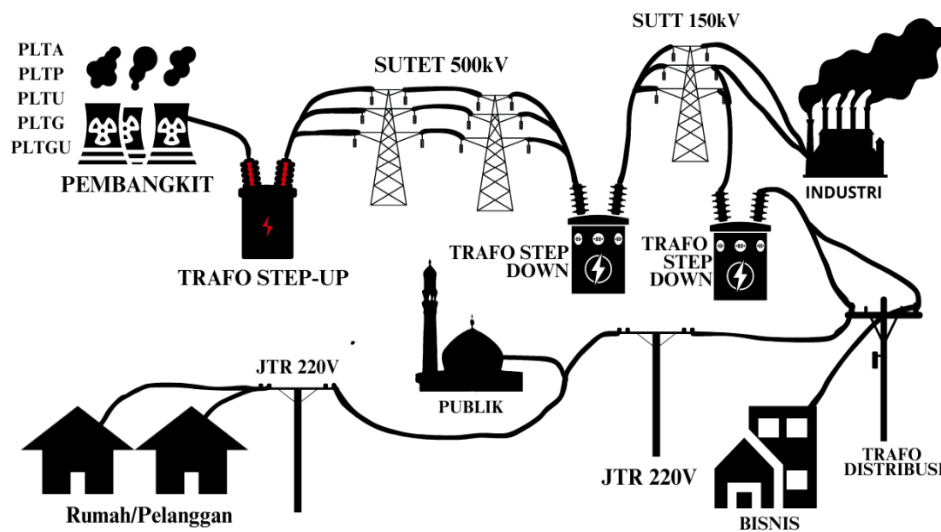
3. Penelitian oleh Rodrigo H. Salim, dkk. (2009).

Penelitian yang dilakukan oleh Salim, dkk. dengan judul "*Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems*" membahas tentang pengembangan rumus lokasi gangguan berbasis impedansi yang diperluas untuk sistem distribusi yang kompleks, termasuk operasi tidak seimbang, cabang lateral, dan profil beban yang berubah-ubah. Metode ini menggunakan pengukuran lokal (tegangan dan arus di gardu induk) untuk menghitung lokasi berbagai jenis gangguan, seperti gangguan satu fasa ke tanah, antar-fasa, dan tiga fasa. Teknik ini sudah diterapkan dalam bentuk perangkat lunak dan digunakan oleh perusahaan distribusi listrik di Brazil Selatan. Hasil penerapannya menunjukkan kehandalan yang tinggi dalam berbagai kondisi jaringan nyata[6].

4. Penelitian oleh Seung-Jae Lee, dkk. (2004).

Penelitian yang dilakukan oleh Seung-Jae Lee, dkk. dengan judul "*An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems*" mengusulkan tentang algoritma penentuan lokasi gangguan berdasarkan estimasi berulang (*iteratif*) dari arus beban dan arus gangguan, disertai dengan sistem diagnosis cerdas yang menganalisis pola arus saat gangguan terjadi. Selain itu, metode ini juga mempertimbangkan perubahan arus beban setelah perangkat proteksi seperti recloser dan fuse beroperasi. Skema ini telah diuji secara menyeluruh dengan simulasi EMTP pada sistem distribusi yang realistis, dan menunjukkan hasil yang sangat efektif dalam menghadapi ketidakpastian beban dan variasi resistansi gangguan[8].

2. 2 Sistem Tenaga Listrik



Gambar 2.1 Proses penyaluran tenaga listrik sampai pelanggan.

Gambar 2.1 menunjukkan proses distribusi energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen akhir, distribusi tenaga listrik merupakan rangkaian kegiatan pengiriman energi elektrik dari fasilitas pembangkitan menuju pengguna akhir. Saat instalasi pembangkitan seperti PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel), dan PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi) memproduksi daya listrik, tegangan yang dihasilkan harus ditingkatkan terlebih dahulu melalui transformator step-up sebelum dialirkan ke sistem transmisi. Kenaikan tegangan ini dimaksudkan untuk mengurangi losses atau rugi-rugi daya yang terjadi pada saat pendistribusian energi listrik.

Jaringan transmisi umumnya beroperasi pada tegangan tinggi, seperti 66 kV, 150 kV, hingga 500 kV (Tegangan Ekstra Tinggi). Penyaluran listrik pada sistem ini dapat dilakukan melalui kabel udara atau kabel tanah, tergantung pada kondisi daerah dan kebutuhan sistem listrik. Di Indonesia, PT PLN (Persero) cenderung memilih saluran udara karena biaya pembangunannya relatif lebih murah dibandingkan kabel tanah. meskipun risiko terhadap gangguan eksternal seperti petir, sentuhan dengan pohon, dan lainnya relatif lebih tinggi[9]. Setelah melalui

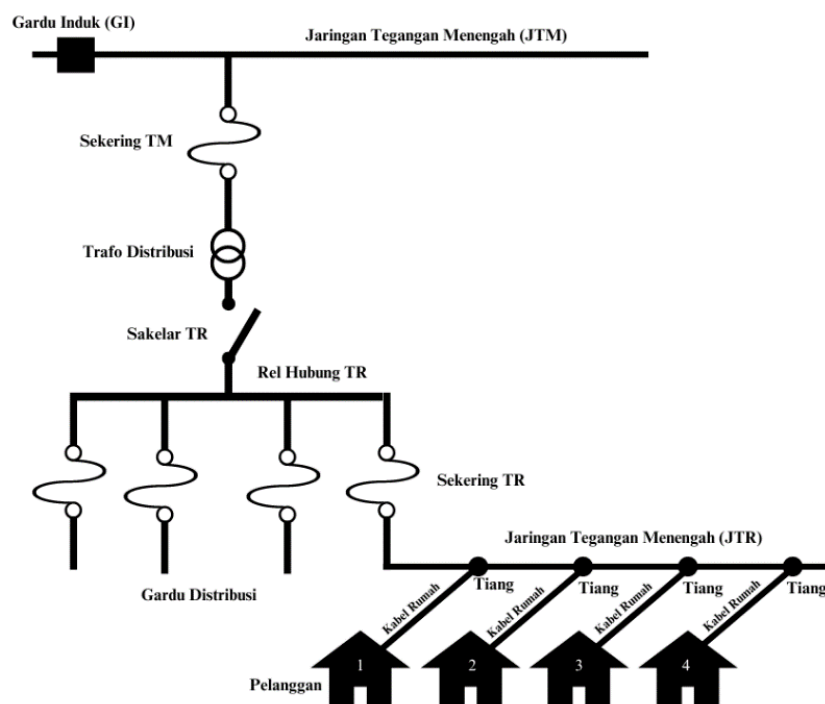
jaringan transmisi, energi listrik dialirkan ke gardu induk untuk diturunkan tegangannya menggunakan transformator jenis *step-down*. Penurunan tegangan ini bertujuan untuk mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan menengah, yang dikenal sebagai tegangan distribusi primer. Umumnya, jaringan distribusi primer beroperasi pada tegangan 20 kV, 12 kV, atau 6 kV[10]. Dari gardu induk, energi listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer menuju konsumen. Pada tingkat tegangan ini, listrik dapat langsung digunakan oleh konsumen industri, seperti pabrik, yang memerlukan daya dan tegangan lebih tinggi dibandingkan konsumen rumah tangga. Dalam beberapa kasus, terdapat juga konsumen yang memanfaatkan tegangan tinggi secara langsung, tergantung pada kebutuhan daya operasionalnya. Selanjutnya, dari jaringan distribusi primer, tegangan listrik diturunkan kembali menjadi 380/220 Volt menggunakan transformator distribusi. Tegangan ini kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi rendah menuju konsumen akhir, seperti rumah tangga, melalui sambungan rumah. Jaringan yang menghubungkan transformator distribusi dengan konsumen akhir ini dikenal sebagai jaringan distribusi sekunder.

2. 3 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, jaringan distribusi tenaga listrik memiliki beragam bentuk konfigurasi dan rentang panjang jaringan. Komponen utama yang menjadi inti dari sistem ini adalah jalur penyalur utama atau *feeder* yang berbentuk tiga fasa. *Feeder* terletak di luar pusat distribusi utama atau *substation*. Pada umumnya, *feeder* terbuat dari konduktor berukuran besar seperti aluminium dengan diameter antara 500-750 kcmil. Dari *feeder* ini, terdapat banyak percabangan yang dapat mengalirkan satu, dua, atau tiga fasa arus listrik. Setiap cabang dilengkapi dengan pemutus yang memisahkan cabang tersebut dari jalur utama apabila terjadi gangguan. Jaringan distribusi primer pada umumnya terdiri dari empat kabel, yaitu tiga konduktor untuk masing-masing fasa dan satu konduktor sebagai pentanahan. Beban satu fasa disalurkan melalui transformator yang menghubungkan antara satu fasa dengan kabel netral. Saluran satu fasa terdiri dari satu konduktor fasa dan satu netral, sementara saluran dua fasa terdiri dari dua konduktor fasa dan satu netral.

Pada kondisi tertentu, sistem distribusi primer dapat beroperasi tanpa menggunakan kabel netral, sehingga hanya terdiri dari tiga konduktor fasa. Dalam konfigurasi ini, beban satu fasa dihubungkan antara dua fasa yang tersedia, sehingga arus listrik mengalir melalui dua dari tiga fasa yang ada.

Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi menuju konsumen akhir. Pada sistem distribusi primer, atau yang dikenal juga sebagai tegangan menengah, level tegangan yang digunakan berkisar di atas 1 kV hingga maksimal 30 kV. Di Indonesia, PLN (Perusahaan Listrik Negara) secara umum menerapkan standar tegangan distribusi menengah sebesar 6 kV, 10 kV, dan 20 kV. Tegangan distribusi primer disalurkan menuju gardu distribusi, di mana tegangan diturunkan lagi oleh transformator penurun tegangan dan disebut sebagai tegangan distribusi sekunder atau tegangan rendah yang memiliki tegangan kerja maksimal 1 kV, dengan standar PLN yaitu 220/380 V.



Gambar 2.2 Hubungan antara TM, TR dan pelanggan.

Gambar 2.2 menggambarkan hubungan antara sistem tegangan menengah, tegangan rendah, dan pelanggan listrik. Secara umum, sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari dua komponen utama, yaitu jaringan distribusi primer (tegangan menengah) dan jaringan distribusi sekunder (tegangan rendah). Penyaluran energi

listrik dalam sistem ini dapat dilakukan melalui saluran udara atau kabel bawah tanah[11]. Namun, karena biaya pembangunan saluran udara lebih rendah dibandingkan kabel bawah tanah, maka jalur distribusi umumnya menggunakan saluran udara. Setelah listrik keluar dari gardu induk, penyalurannya masuk ke dalam kategori jaringan distribusi. Berdasarkan tingkat tegangannya, jaringan distribusi dibagi menjadi dua jenis, yaitu distribusi primer untuk tegangan menengah dan distribusi sekunder untuk tegangan rendah. Jaringan distribusi primer dapat dibentuk dalam konfigurasi tiga fasa, satu fasa, maupun menggunakan sistem *Single Wire Earth Return* (SWER). Sistem SWER merupakan metode distribusi yang digunakan untuk menjangkau wilayah pedesaan dengan kebutuhan listrik yang relatif kecil dan tersebar, secara efisien dan ekonomis. Teknologi ini menggunakan satu konduktor tegangan menengah sebagai penghantar utama, sementara jalur arus baliknya memanfaatkan tanah sebagai media penghantar[12]. Sementara Jaringan Distribusi Sekunder atau tegangan rendah dapat berupa satu fasa, tiga fasa dengan empat kabel, atau satu fasa tiga kabel dari sistem *Single Wire Earth Return* (SWER) tegangan menengah. Sistem distribusi primer mempunyai banyak bentuk dan ukuran tergantung pada pola jalan, bentuk dari wilayahnya, penghambat seperti danau, dan letak beban-beban besar berada. *Feeder* distribusi radial mempunyai percabangan yang panjang, yang berfungsi untuk mencapai beban-beban yang ada.

2.3.1 Penyulang Distribusi

Penyulang distribusi berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari gardu induk ke konsumen. Penyulang distribusi terdiri dari jaringan tegangan menengah yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi, serta jaringan tegangan rendah yang menghubungkan gardu distribusi dengan konsumen rumah tangga dan industri kecil[13]. Energi listrik yang dibangkitkan di pembangkit listrik disalurkan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi menuju gardu induk, kemudian diturunkan tegangannya menjadi tegangan menengah dan didistribusikan melalui penyulang distribusi kepada pelanggan. Penyulang distribusi dibagi menjadi:

1) Penyulang Radial

Penyulang radial merupakan konfigurasi penyulang yang paling sederhana, di mana energi listrik disalurkan dari satu sumber (Gardu Induk) menuju beban-beban secara linier atau tersusun secara radial.

2) Penyulang Lingkaran (*Loop*)

Penyulang lingkaran memiliki dua ujung yang terhubung ke sumber yang sama (Gardu Induk), sehingga membentuk lingkaran. Konfigurasi ini memungkinkan adanya alternatif sumber pasokan listrik jika terjadi gangguan pada salah satu bagian penyulang.

3) Penyulang Tertutup (*Interkoneksi*)

Penyulang tertutup merupakan gabungan dari beberapa penyulang radial atau lingkaran yang dihubungkan satu sama lain. Dengan adanya *interkoneksi* antar penyulang, kontinuitas pelayanan menjadi sangat baik karena adanya banyak alternatif sumber pasokan listrik.

4) Penyulang Udara

Penyulang udara menggunakan penghantar kabel udara yang dipasang di tiang-tiang listrik. Jenis penyulang ini memiliki kelebihan konstruksi yang relatif mudah dan biaya investasi yang murah[14].

5) Penyulang Bawah Tanah

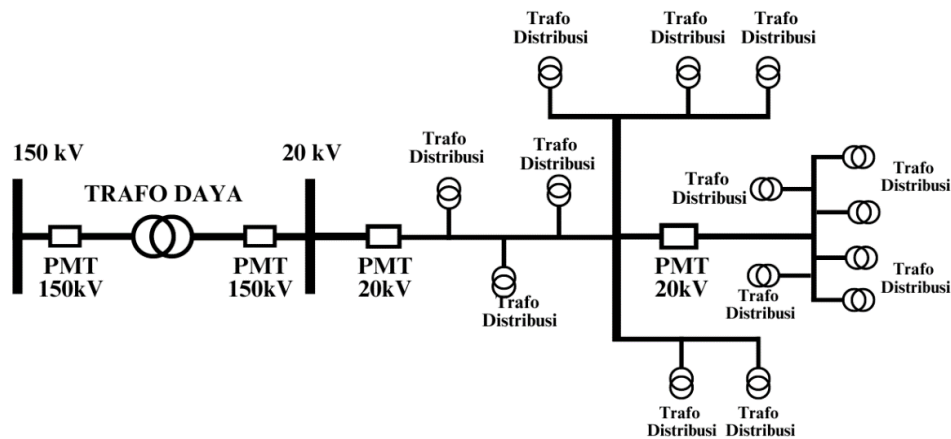
Penyulang bawah tanah menggunakan kabel yang ditanam di dalam tanah atau saluran kabel. Jenis penyulang ini memiliki kelebihan terlindung dari gangguan cuaca dan lingkungan, serta lebih estetik karena tidak terlihat di permukaan tanah.

2.3.1.a Konfigurasi Radial

Konfigurasi radial merupakan konfigurasi yang paling banyak digunakan dalam sistem distribusi tenaga listrik. Sistem distribusi radial merupakan tipe sistem distribusi yang paling sederhana, karena terdiri atas beberapa jalur atau rangkaian yang bekerja secara mandiri dan tidak saling terhubung [15]. Konfigurasi sistem ini menyerupai struktur cabang pada pohon, di mana satu sumber utama menyalurkan energi listrik langsung ke konsumen tanpa membentuk lintasan tertutup (*loop*). Akibatnya, arus listrik hanya mengalir satu arah, yaitu dari sumber ke arah beban

[16]. Umumnya, sistem ini mencakup satu atau lebih transformator distribusi yang tersambung ke sejumlah cabang, dan setiap cabang mendistribusikan daya ke kelompok beban masing-masing.

Pada konfigurasi ini, terdapat satu jalur utama (Feeder) yang menyalurkan daya dari pusat distribusi utama ke beban melalui cabang-cabang lateral. Feeder utama tidak membentuk loop, sehingga terdapat satu jalur suplai daya dari sumber ke beban. Karakteristik utama dari konfigurasi radial adalah kesederhanaan desain, biaya konstruksi dan operasional yang lebih rendah, serta perawatan yang relatif mudah. Konfigurasi ini sesuai untuk digunakan di area dengan kepadatan beban rendah hingga sedang karena dapat meminimalkan investasi infrastruktur. Namun, keandalan konfigurasi radial lebih rendah dibandingkan konfigurasi lain seperti loop atau jaringan. Apabila terjadi gangguan pada feeder utama, seluruh beban yang disuplai oleh feeder tersebut akan mengalami pemadaman total hingga gangguan diisolasi dan diperbaiki.



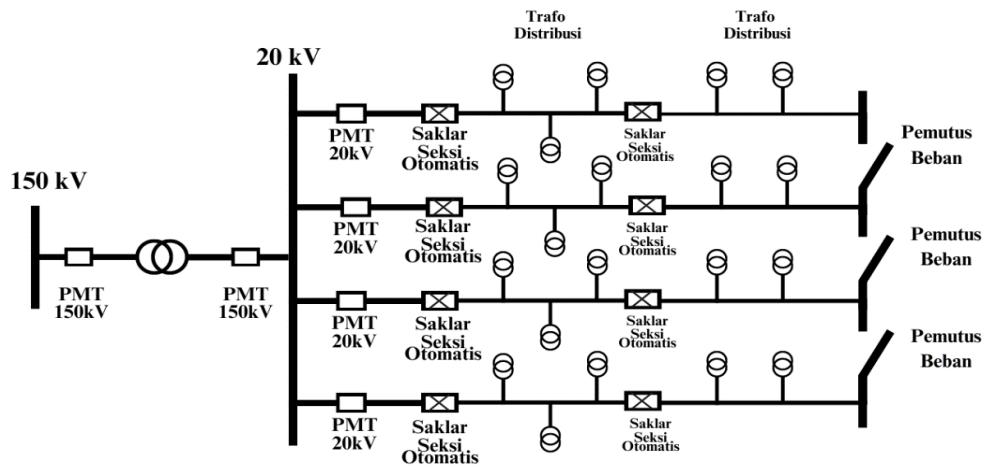
Gambar 2.3 Konfigurasi radial

2.3.1.b Konfigurasi Loop

Konfigurasi loop dalam sistem distribusi tenaga listrik ditandai dengan jalur penyalur utama (*Feeder*) yang membentuk lingkaran tertutup[17]. Pengaturan ini memungkinkan beban untuk mendapatkan suplai daya dari dua arah yang berlawanan melalui cabang-cabang lateral. Karakteristik utama dari konfigurasi

loop adalah tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi radial, sebab terdapat jalur alternatif jika terjadi gangguan pada salah satu bagian *feeder*. Ketika gangguan terjadi, beban pada seksi yang tidak terganggu masih dapat disuplai dari arah yang berlawanan melalui pengoperasian alat pemutus (*tie switch*) atau pemisah (*sectionalizer*).

Konfigurasi loop sesuai untuk diterapkan di area dengan kepadatan beban tinggi dan kontinuitas pasokan listrik yang baik diperlukan. Meskipun demikian, kelemahan dari pengaturan ini adalah adanya arus gangguan yang lebih besar akibat suplai daya dari dua arah, serta koordinasi proteksi yang lebih kompleks karena arah aliran daya yang dapat berubah-ubah. Untuk meningkatkan keandalan, dapat diterapkan konfigurasi loop terbuka (*open loop*), di mana salah satu titik pada lingkaran dibuka sehingga konfigurasinya menyerupai radial. Saat terjadi gangguan, pemutus pada titik terbuka tersebut dapat dioperasikan sehingga *loop* tertutup kembali dan beban dapat disuplai dari dua arah.



Gambar 2.4 Konfigurasi *loop*

2.3.2 Komponen Sistem Distribusi

Dalam oprasionalnya, sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari berbagai komponen yang saling terhubung dan membentuk satu kesatuan sistem. Salah satu elemen penting dalam sistem ini adalah penghantar, yang digunakan pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) maupun Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Secara

garis besar, jenis penghantar dapat dibedakan menjadi dua, yaitu kawat tanpa isolasi dan kabel berisolasi.

1. Penghantar

Kawat penghantar merupakan konduktor tanpa lapisan pelindung yang umumnya digunakan pada JTM. Beberapa jenis kawat yang sering diterapkan adalah AAC (All Aluminium Conductor) dan AAAC (All Aluminium Alloy Conductor). Sementara itu, kabel penghantar adalah konduktor yang dilapisi bahan isolasi, dan umumnya digunakan dalam jaringan distribusi PLN, seperti tipe AAAC-S dan XLPE.AAAC (*All Alluminium Alloy Conductor*) yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari campuran logam alluminium tanpa isolasi[18].

- a) AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) – konduktor berbahan campuran aluminium tanpa isolasi pelindung [18].
- b) ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) – konduktor aluminium yang diperkuat dengan inti baja untuk meningkatkan kekuatan mekanisnya [19].
- c) ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) – konduktor aluminium yang diperkuat dengan campuran logam khusus guna meningkatkan performa [20].

Pemilihan jenis penghantar, baik berupa kawat tanpa isolasi maupun kabel berisolasi, harus mempertimbangkan sejumlah faktor teknis, seperti tegangan kerja, desain konstruksi, ukuran konduktor, dan kemampuan hantar arus (KHA) [21]. Selain itu, ukuran atau luas penampang penghantar juga ditentukan berdasarkan kepadatan arus nominal (*current density*), yang berkaitan erat dengan suhu maksimum yang dapat ditoleransi akibat aliran arus. Perhitungan kepadatan arus (S) dilakukan dengan mempertimbangkan batas kemampuan termal dari material konduktor, seperti rumus berikut ini:

$$S = \frac{I}{A} \quad (1)$$

Dimana:

S : Rapat Arus (A/mm^2)

I : Arus Lewat (A)

A : luas penampang kabel (mm^2)

2. Tiang Penyangga

Tiang penyangga dibutuhkan pada saluran udara jaringan distribusi. Fungsi dari tiang adalah untuk menyangga saluran tetap pada jarak aman yang diperbolehkan[22]. Tiang penyangga harus memiliki kekuatan mekanis yang cukup untuk menahan tarikan dan beban mekanis dari saluran yang disangganya. Tiang penyangga dapat terbuat dari bahan kayu, beton, atau besi. Jarak antar tiang diatur sedemikian rupa sehingga penghantar tetap terletak pada jarak aman. Jarak antar tiang juga disesuaikan berdasarkan jenis penghantar yang dipakainya.

3. Trafo Distribusi

Transformator distribusi merupakan perangkat utama dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menurunkan tegangan dari level tegangan menengah (TM) ke tegangan rendah (TR) sesuai kebutuhan konsumen [22]. Misalnya, transformator ini berperan dalam menurunkan tegangan 20 kV menjadi 220/380 V, yang lazim digunakan oleh pelanggan rumah tangga maupun industri kecil.

4. Isolator

Isolator adalah komponen penting dalam sistem distribusi listrik yang berfungsi untuk memisahkan bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan atau terhubung ke tanah. Umumnya, isolator digunakan untuk menopang konduktor pada tiang distribusi, serta mencegah terjadinya arus bocor atau loncatan listrik yang dapat merusak sistem. Kemampuan isolasi sangat bergantung pada kekuatan dielektrik material penyusunnya. Selain itu, isolator harus memiliki sifat nonkonduktif, ringan, kuat secara mekanis, tahan terhadap suhu tinggi, kelembaban, dan paparan sinar matahari, serta efisien secara biaya. Bahan yang sering digunakan untuk isolator adalah porselin dan kaca, dengan porselin menawarkan performa lebih baik meskipun harganya relatif lebih mahal dibandingkan kaca.

2. 4 Peralatan Pada Gardu Induk (GI)

Gardu Induk (GI) merupakan fasilitas vital dalam sistem tenaga listrik yang menerima pasokan daya dari jaringan transmisi atau subtransmisi untuk selanjutnya disalurkan ke jaringan distribusi primer menuju area beban [23]. Gardu Induk berperan sebagai titik transisi antara tegangan tinggi dan tegangan menengah. Salah satu fungsi utamanya adalah menurunkan tegangan dari level tinggi, seperti 150 kV, menjadi tegangan menengah, seperti 20 kV, sebelum dialirkan ke konsumen akhir melalui jaringan distribusi. Pada gardu induk, terdapat peralatan untuk memantau kondisi jaringan, mengukur parameter-parameter listrik, serta melindungi komponen-komponen sistem dari gangguan atau kondisi abnormal. Pada sebuah gardu induk, terdapat beberapa peralatan penting yang berperan dalam mengoperasikan dan mendistribusikan tenaga listrik. Peralatan-peralatan tersebut antara lain:

1. Transformator Daya

Transformator Daya berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan listrik, baik menaikkan atau menurunkan tegangan, namun tetap mempertahankan frekuensinya yang sama. Pada gardu induk, transformator daya bertugas menurunkan tegangan tinggi dari saluran transmisi menjadi tegangan menengah agar dapat disalurkan ke pelanggan.

2. Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan perangkat utama dalam gardu induk yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik internal. Transformator ini menghasilkan tegangan AC sebesar 220/380 V yang digunakan untuk mendukung berbagai sistem operasional, seperti pencahayaan area switchyard, gedung kontrol, halaman, sistem pendingin, motor listrik, serta peralatan pendukung lainnya.

3. Resistor Pentanahan Netral (NGR)

NGR dipasang pada titik netral transformator dengan konfigurasi sambungan bintang (Y). Pada sisi primer bertegangan tinggi (150 kV atau 500 kV), diterapkan sistem pentanahan langsung (*solid grounding*), sedangkan pada sisi sekunder bertegangan menengah (seperti 20 kV), digunakan sistem pentanahan dengan

resistor (*resistance grounding*). Tujuan utama pemasangan NGR adalah untuk membatasi arus gangguan satu fasa ke tanah, menekan tegangan lebih pada fasa yang tidak terganggu, serta membantu pemadaman busur listrik saat terjadi gangguan.

4. Rel/Busbar

Rel atau busbar merupakan penghantar yang berfungsi sebagai titik pertemuan antara transformator daya, saluran udara tegangan menengah, saluran kabel tegangan menengah, dan komponen listrik lainnya untuk menyalurkan daya listrik.

5. Transformator Arus (*Current Transformer*)

Transformator arus adalah jenis transformator instrumen yang berperan sebagai alat ukur arus listrik. Arus dengan nilai yang besar akan diturunkan pada kumparan sekunder agar dapat dibaca pada alat ukur. Arus dari sisi sekunder akan dihubungkan pada alat ukur dan relay pengaman. Beberapa aspek penting yang harus diperhatikan pada transformator arus adalah rasio transformasi, kelas akurasi, arus nominal, batas kemampuan (*burden*), dan kejenuhan.

6. Transformator Pengukur Tegangan (*Potential Transformer*).

PT (*Potential Transformer*) merupakan jenis transformator instrumen khusus yang berfungsi untuk menurunkan tingkat tegangan listrik dari nilai sangat tinggi ke nilai yang lebih rendah dan aman untuk diukur atau dimonitor. *Potential Transformer* memiliki dua lilitan utama, yaitu lilitan primer yang terhubung dengan sumber tegangan tinggi dan lilitan sekunder yang menghasilkan tegangan rendah sesuai dengan rasio penurunan yang diinginkan. Berdasarkan konstruksinya, *Potential Transformer* dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Potential Transformer* induktif dan *Potential Transformer* kapasitif.

- a) *Potential Transformer* induktif bekerja dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik antara lilitan masukan dan lilitan keluaran melalui sebuah inti besi.
- b) *Potential Transformer* kapasitif menggunakan rangkaian kapasitor sebagai media untuk menginduksikan tegangan dari sisi masukan ke sisi keluaran.

7. Pemutus Tenaga Atau *Circuit Breaker* (PMT).

PMT merupakan perangkat proteksi yang berfungsi untuk menghubungkan atau memutuskan rangkaian listrik dalam kondisi normal maupun saat gangguan. Saat pemutusan arus terjadi, terbentuk busur listrik yang harus dipadamkan dengan media tertentu seperti udara tekan, minyak isolasi, gas SF₆, atau medan magnet, sesuai jenis pemutus tenaga yang digunakan.

8. Pemisah Atau *Disconnecting Switch* (PMS).

PMS adalah saklar yang digunakan untuk memisahkan bagian sistem kelistrikan dalam kondisi tidak berbeban umumnya terbuat dari konduktor tembaga. PMS berfungsi menghubungkan peralatan satu dengan lainnya dan harus mampu menghantarkan arus, menahan tegangan kerja, serta tahan terhadap arus gangguan. PMS hanya boleh dioperasikan setelah aliran beban diputus terlebih dahulu oleh PMT.

9. Penangkal Petir (*Lightning Arrester*).

Lightning arrester berfungsi melindungi peralatan listrik dari tegangan lebih akibat sambaran petir atau surja hubung. Dalam kondisi normal, perangkat ini bersifat isolatif, namun saat terjadi lonjakan tegangan, akan menjadi konduktif dan menyalurkan arus ke tanah guna mencegah kerusakan pada sistem kelistrikan.

2.5 Gangguan Pada Sistem Distribusi

Gangguan merupakan kondisi abnormal yang dapat terjadi pada sistem penyaluran energi listrik. Menurut standar ANSI/IEEE Std. 100-1992, suatu kondisi yang menyimpang dari keadaan normal akibat kegagalan suatu komponen atau elemen untuk berfungsi sebagaimana mestinya sehingga dapat dikategorikan sebagai gangguan[24]. Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik dapat membawa dampak negatif yang signifikan. Dampak terparah adalah terjadinya kebakaran yang tidak hanya merusak peralatan, tetapi juga berpotensi menyebar ke sistem lain dan menyebabkan kegagalan total pada seluruh sistem distribusi (*black out*). Selain risiko kebakaran, gangguan juga dapat menyebabkan arus hubung singkat yang berlebihan, menyebabkan pemanasan berlebih (*overheating*) pada peralatan.

Penurunan tegangan kerja juga dapat mengakibatkan kegagalan operasi pada peralatan sistem tenaga listrik, yang pada akhirnya merugikan pelanggan. Gangguan yang terjadi dapat mengganggu stabilitas sistem dan bahkan memicu pemadaman total pada sistem distribusi.

Gangguan pada sistem distribusi mengacu pada situasi di mana terjadi insiden yang menyebabkan perangkat pengaman pada penyulang di gardu induk bekerja, mengakibatkan terputusnya aliran daya listrik. Tindakan ini dilakukan untuk melindungi peralatan yang dilalui arus gangguan tersebut dari kerusakan lebih lanjut. Dengan demikian, fungsi utama dari peralatan pengaman adalah untuk mencegah kerusakan pada komponen-komponen sistem, bukan untuk menghilangkan gangguan itu sendiri. Kejadian gangguan lebih sering terjadi pada saluran distribusi yang terbentang di udara terbuka (Saluran Udara Tegangan Menengah/SUTM) yang umumnya tidak memiliki isolasi pelindung, dibandingkan dengan saluran distribusi yang ditanam dalam tanah (Saluran Kabel Tanah Menengah/SKTM) yang dilengkapi dengan isolasi pembungkus. Menurut (SPLN 52 –3, 1983) Sumber gangguan pada sistem distribusi saluran udara sebagian besar karena pengaruh luar[25].

1. Angin atau pohon.
2. Petir.
3. Kegagalan atau kerusakan peralatan dan saluran.
4. Hujan dan Cuaca.
5. Binatang dan benda – benda asing.

2.5.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik yang terjadi akibat menurunnya kemampuan isolasi dasar (basic insulation strength) antara konduktor fasa, atau antara konduktor fasa dengan tanah. Kondisi ini memicu aliran arus listrik yang melebihi batas kapasitas operasi normal sistem. Gangguan dapat terjadi dalam berbagai bentuk, seperti gangguan antar fasa (dua atau tiga fasa), maupun gangguan satu fasa ke tanah. Berdasarkan sifat kejadiannya,

gangguan hubung singkat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama menurut SPLN 52-3 (1983):

1. Gangguan Temporer

Bersifat sementara dan umumnya disebabkan oleh faktor eksternal, seperti sambaran petir, angin kencang yang menyebabkan penghantar bersentuhan dengan objek sekitar, atau jatuhnya ranting pohon. Gangguan ini biasanya akan hilang dengan sendirinya tanpa intervensi manual.

2. Gangguan Kontinyu (Permanen)

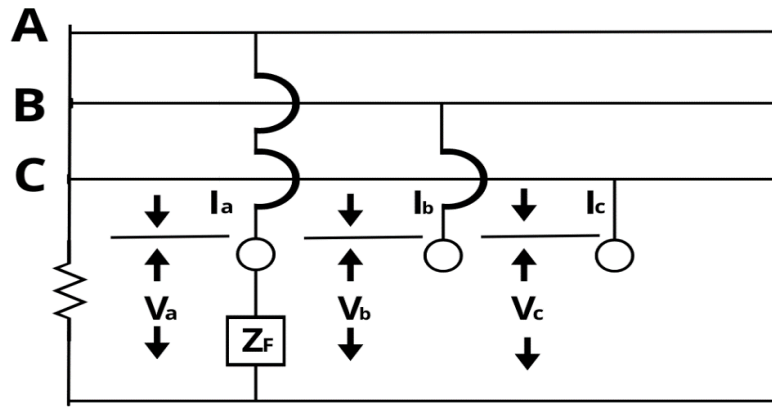
Gangguan ini tidak dapat pulih secara otomatis dan memerlukan perbaikan langsung. Peralatan yang terdampak harus diperbaiki atau diganti sebelum dapat dioperasikan kembali. Jika tidak segera

Gangguan hubung singkat terjadi saat penghantar listrik saling terhubung secara langsung, baik antar konduktor maupun antara konduktor dengan tanah. Akibatnya, muncul arus gangguan (fault current) yang jauh melampaui arus nominal sistem. Dampak dari gangguan ini, jika tidak segera ditangani, antara lain:

1. Menurunnya margin kestabilan sistem tenaga listrik.
2. Kerusakan peralatan akibat arus tidak seimbang atau penurunan tegangan ekstrem.
3. Risiko ledakan pada peralatan berisi cairan isolasi, yang dapat menyebabkan kebakaran dan membahayakan keselamatan operator serta integritas sistem.

2.5.1.a Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah

Gangguan fasa tunggal ke tanah merupakan jenis gangguan yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga. Gangguan ini termasuk dalam kategori tidak simetris (asimetris), di mana satu konduktor fasa bersentuhan langsung dengan tanah atau objek konduktif lainnya, seperti pepohonan, kabel putus, atau struktur logam[24]. Umumnya, gangguan ini bersifat temporer dan dapat hilang apabila penyebab eksternal terlepas dari konduktor. Representasi visual gangguan ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah

Persamaan arus yang diperoleh dari rangkaian gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dituliskan sebagai berikut:

$$V_a = I_a \times Z_f; I_b = 0; I_c = 0 \quad (2.1)$$

Berdasarkan Persamaan (2.1), komponen arus urutan dapat dihitung sebagai:

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_{a1} &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_{a2} &= \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3} I_a \end{aligned}$$

Sehingga:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (2.2)$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semua komponen arus urutan memiliki nilai yang sama:

$$V_{a0} = -I_{a0} \times Z_0$$

Selanjutnya, tegangan tiap urutan dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_f - I_{a1} \times Z_1 \\ V_{a2} &= I_{a2} \times Z_2 \\ V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dengan substitusi Persamaan (2.2) ke dalam Persamaan (2.3), diperoleh:

$$V_a = Va_1 + Va_2 + Va_0 = (I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}) \times Z_f \quad (2.4)$$

Kemudian, apabila disusun kembali, didapatkan:

$$\begin{aligned} V_a &= Vf_1 - I_{a1} \times Z_1 - I_{a2} \times Z_2 - I_{a0} \times Z_0 \\ V_a &= V_f - I_{a1} \times (Z_1 \times Z_2 \times Z_0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Menggabungkan Persamaan (2.4) dan (2.5), diperoleh:

$$\begin{aligned} V_f - I_{a1} \times (Z_1 \times Z_2 \times Z_0) &= 3 \times I_{a1} \times Z_f \\ V_f &= I_{a1} \times (Z_1 \times Z_2 \times Z_0) + 3 \times Z_f \\ I_{a1} &= \frac{1}{3} I_a = \frac{V_f}{Z_1 \times Z_2 \times Z_0} \\ I_{a1} &= I_f \\ &= \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Jika Z_f dianggap sangat kecil atau diabaikan, maka persamaan akhir menjadi:

$$I_f = \frac{3V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.7)$$

Keterangan:

V_{L-N} : Tegangan yang muncul sesaat sebelum gangguan terjadi.

Z_1 : Impedansi urutan positif yang dilihat dari titik gangguan.

Z_2 : Impedansi urutan negatif yang dilihat dari titik gangguan.

Z_0 : Impedansi urutan nol yang dilihat dari titik gangguan

2.5.2 Faktor Penyebab Gangguan Hubung Singkat

Adapun Faktor-faktor penyebab terjadinya gangguan pada jaringan distribusi adalah sebagai:

1. Kesalahan Isolasi

Kesalahan isolasi merupakan penyebab paling umum terjadinya gangguan hubung singkat. Isolasi yang rusak atau aus dapat menyebabkan konduktor atau kabel yang

berbeda potensial saling bersentuhan, sehingga terjadi hubung singkat. Kerusakan isolasi dapat disebabkan oleh faktor usia, cuaca buruk, polusi udara, atau kerusakan mekanis.

2. Gangguan Eksternal

Gangguan eksternal seperti pohon tumbang, benturan kendaraan, aktivitas hewan, atau benda asing lainnya yang mengenai saluran transmisi atau distribusi dapat menyebabkan gangguan hubung singkat.

3. Kegagalan Peralatan

Kegagalan peralatan seperti transformator, sakelar, atau peralatan lainnya dapat menyebabkan terjadinya gangguan hubung singkat. Kegagalan ini dapat disebabkan oleh usia peralatan, beban berlebih, atau kesalahan dalam desain atau manufaktur.

4. Surja Petir

Sambaran petir pada saluran transmisi atau distribusi dapat menyebabkan terjadinya gangguan hubung singkat. Petir dapat merusak isolasi atau menyebabkan loncatan bunga api yang dapat memicu hubung singkat.

2.5.3 Dampak Gangguan Hubung Singkat

Adapun dampak yang dapat terjadi akibat gangguan hubung singkat adalah sebagai berikut:

1. Kerusakan Peralatan

Arus hubung singkat yang tinggi dapat mengakibatkan kerusakan parah hingga kegagalan total pada peralatan listrik, seperti generator, transformator, kabel, pemutus sirkuit, dan komponen distribusi lainnya. Hal ini terjadi karena arus melebihi batas termal dan mekanik perangkat, yang dapat menyebabkan panas berlebih, kerusakan fisik, hingga ledakan, khususnya pada peralatan dengan bahan isolasi atau minyak pendingin. Arus yang sangat besar dapat menyebabkan pemanasan berlebih (*overheating*) pada peralatan, kerusakan isolasi, dan kerusakan mekanis seperti deformasi atau pelelehan komponen logam. Pada kabel, arus hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan isolasi dan kemungkinan kebakaran.

Pada sakelar atau pemutus tenaga (*circuit breaker*), arus hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan kontak atau kegagalan dalam memutus arus.

2. Gangguan Stabilitas Sistem

Gangguan hubung singkat dapat mengganggu kestabilan operasi sistem tenaga listrik, karena menyebabkan perubahan mendadak pada arus dan tegangan yang berdampak pada kestabilan tegangan, sudut rotor, serta kontinuitas pelayanan beban. Ketika terjadi gangguan, terjadi perubahan aliran daya secara tiba-tiba dan signifikan. Jika gangguan tidak segera diisolasi, sistem dapat kehilangan sinkronisasi antara generator-generator yang terhubung. Hal ini dapat menyebabkan ayunan sudut rotor yang berlebihan, hilangnya sinkronisasi, dan pada akhirnya dapat menyebabkan pemadaman total pada sistem.

3. Kerusakan Beban

Arus hubung singkat yang besar dapat menyebabkan kerusakan pada beban listrik seperti motor induksi, peralatan elektronik, dan peralatan lainnya. Lonjakan arus yang tiba-tiba dapat menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen elektronik seperti kapasitor, dioda, dan transistor. Pada motor induksi, arus hubung singkat yang besar dapat menyebabkan kerusakan pada belitan stator atau rotor, serta kerusakan pada bantalan (bearing).

4. Gangguan Kualitas Daya

Gangguan hubung singkat dapat menyebabkan gangguan pada kualitas daya listrik, seperti jatuh tegangan (*voltage sag*), lonjakan tegangan (*voltage swell*), fluktuasi tegangan, dan harmonisa yang dapat mempengaruhi kinerja beban listrik.

2. 6 Metode Penentuan Lokasi Gangguan

2.6.1 Metode impedansi

Metode impedansi merupakan metode yang digunakan untuk melakukan lokalisasi gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Metode ini didasarkan pada estimasi jarak gangguan dengan menghitung impedansi urutan positif suatu bagian antara pengukuran dan gangguan[27]. Metode ini juga didasarkan pada pengukuran

impedansi yang dilihat dari titik sumber gangguan, seperti gardu induk atau pembangkit listrik[28]. Dengan mengukur impedansi, jarak antara titik sumber gangguan sehingga lokasi gangguan dapat diestimasi.

Metode impedansi bergantung pada hubungan antara impedansi saluran transmisi atau distribusi dan jarak. Impedansi saluran per satuan panjang diketahui dari data spesifikasi saluran. Dengan mengukur arus dan tegangan pada titik sumber gangguan saat terjadi gangguan, impedansi yang dilihat dari titik sumber gangguan dapat dihitung menggunakan hukum Ohm. Kemudian, jarak ke lokasi gangguan dapat diestimasi dengan membagi impedansi terukur dengan impedansi persatuan panjang saluran. Jenis-jenis Metode Impedansi antara lain sebagai berikut:

1. Metode Impedansi Dasar

Metode ini menggunakan pengukuran arus dan tegangan pada satu titik sumber gangguan untuk mengestimasi jarak ke lokasi gangguan.

2. Metode Impedansi Reaktansi

Metode ini hanya menggunakan komponen reaktansi (*reaktansi induktif* atau *kapasitif*) dari impedansi terukur untuk mengestimasi jarak ke lokasi gangguan.

3. Metode Impedansi Berbasis Komponen *Simetris*

Metode ini menggunakan komponen *simetris* dari arus dan tegangan terukur untuk menghitung impedansi dan mengestimasi jarak ke lokasi gangguan.

4. Metode Impedansi Dua Terminal

Metode ini menggunakan pengukuran arus dan tegangan dari kedua ujung saluran transmisi atau distribusi untuk meningkatkan akurasi estimasi jarak ke lokasi gangguan.

2.6.2 Prinsip Kerja Metode Impedansi

Metode impedansi (*impedance method*) merupakan metode yang digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik[28]. Prinsip kerja dari metode ini didasarkan pada konsep impedansi, yang merupakan rasio antara tegangan dan arus dalam suatu

rangkaian listrik. Metode impedansi digunakan untuk menghitung arus, tegangan, daya, dan faktor daya dalam suatu jaringan tenaga listrik yang kompleks. Dalam metode impedansi, jaringan tenaga listrik dimodelkan sebagai rangkaian listrik *ekuivalen* yang terdiri dari sumber tegangan, beban, dan elemen-elemen seperti transformator, saluran transmisi, dan generator. Setiap elemen dalam jaringan ini memiliki nilai impedansi yang terkait dengan karakteristik fisik dan elektriknya. Impedansi ini dapat berupa resistansi, induktansi, atau kapasitansi, atau kombinasi dari ketiganya.

Analisis komponen *simetris* dimanfaatkan untuk mempelajari kondisi tidak seimbang dalam sistem tiga fasa, seperti saat terjadi gangguan hubung singkat. Melalui pendekatan ini, sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat dianalisis dengan memisahnya menjadi tiga rangkaian komponen: urutan positif, negatif, dan nol. Berdasarkan Teorema Fortescue, setiap vektor tak seimbang dalam sistem tiga fasa dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan dari tiga himpunan vektor seimbang, yaitu komponen urutan positif, negatif, dan nol. Ketiga komponen ini digunakan untuk menganalisis kondisi tidak seimbang dalam sistem tenaga listrik tiga fasa. Impedansi saluran terdistribusi ini dinyatakan untuk urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol.

1. Komponen Urutan Positif (*positive sequence components*).

Komponen urutan positif terdiri dari tiga vektor listrik yang memiliki amplitudo sama, berbeda sudut fasa sebesar 120° , dan berputar mengikuti urutan sistem tiga fasa normal. Dalam kondisi operasi normal, hanya komponen ini yang aktif, sehingga impedansi sistem mencerminkan impedansi urutan positif. Saat terjadi gangguan, bagian sistem yang terkena dapat dimodelkan ulang dengan perubahan tegangan, sedangkan sumber tegangan lainnya dianggap dalam kondisi hubungan singkat. Akibatnya, arus gangguan mulai mengalir ke dalam sistem. Ketika terjadi gangguan, cabang pada sistem yang terganggu dapat digantikan dengan perubahan tegangan $\Delta V = V - V_1$ dan semua sumber tegangan yang ada pada sistem dishortcircuit, sehingga akan menghasilkan arus gangguan. ΔV mengalir kedalam sistem, yaitu:

$$\Delta V = -\frac{(V - V_1)}{Z_1}$$

$$\Delta I = I - I_1 \quad (2.13)$$

Karena arus awal sebelum gangguan adalah nol ($I = 0$), maka arus gangguan pada titik fault dihitung berdasarkan kondisi ini sehingga di dapat:

$$\begin{aligned} I_1 &= -\Delta I \\ V_1 &= V - I_1 Z_1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan komponen urutan positif arus dan tegangan pada cabang yang mengalami gangguan.

2. Komponen Urutan Negatif (*negative sequence components*)

Komponen Urutan Negatif (*negative sequence components*) merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor. Jika pada kondisi normal hanya terdapat komponen urutan positif, maka komponen urutan negatif hanya ada pada saat terjadinya gangguan. Karena tidak ada komponen urutan negatif sebelum terjadinya gangguan, maka apabila terjadi gangguan akan timbul perubahan tegangan sebesar $-V_2$ dan arus I_2 yang mengalir dari sistem ke gangguan.

$$\begin{aligned} I_2 &= -\frac{V_2}{Z_2} \\ V_2 &= -I_2 Z_2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

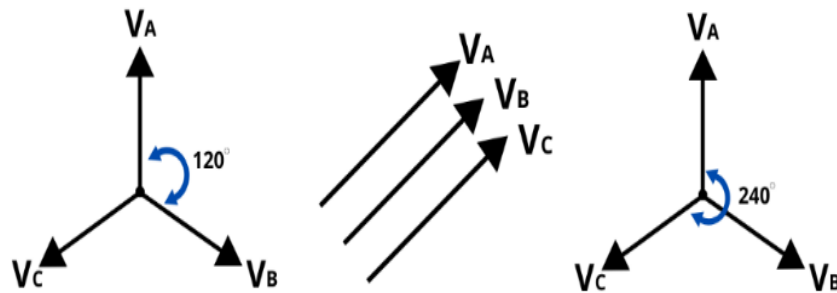
3. Komponen Urutan Nol (*zero sequence components*)

Merupakan komponen yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan tidak ada pergeseran fasa antara fasor yang satu dengan yang lain. Persamaan untuk komponen urutan nol saat terjadi gangguan yaitu:

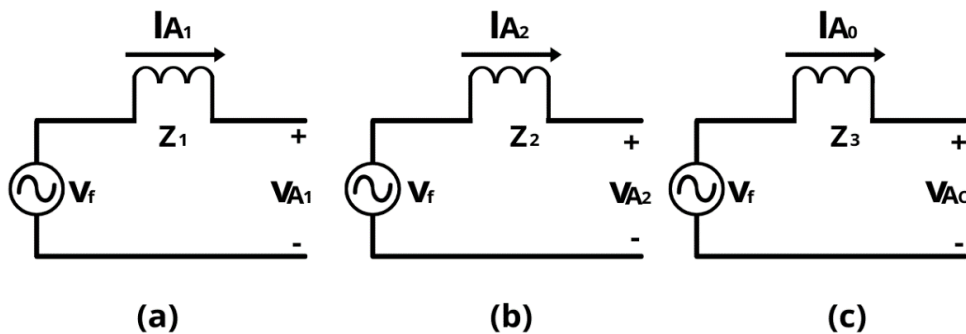
$$\begin{aligned} I_0 &= -\frac{V_0}{Z_0} \\ V_0 &= -I_0 Z_0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Komponen urutan nol memiliki karakteristik khusus dimana arus dan tegangan berada dalam kondisi sefasa. Kondisi ini mengakibatkan aliran arus urutan nol membutuhkan lintasan kembali yang disediakan melalui sistem grounding pada titik netral. Besaran impedansi urutan nol umumnya menunjukkan nilai yang

berbeda dibandingkan dengan impedansi urutan positif. Perbedaan nilai impedansi ini dipengaruhi oleh berbagai parameter, antara lain jenis peralatan yang digunakan, bentuk konfigurasi koneksi (baik dalam bentuk delta maupun wye), serta teknik pentanahan yang diterapkan pada titik netral sistem.



Gambar 2.6. Komponen-komponen simetris



Gambar 2.7 Rangkaian komponen urutan positif (a), negatif (b) dan nol (c)

2.6. 3 Identifikasi Lokasi Gangguan

Dalam menentukan lokasi gangguan hubung singkat menggunakan metode impedansi, dilakukan identifikasi lokasi gangguan berdasarkan pengukuran arus dan tegangan pada gardu induk atau titik sumber gangguan. Peralatan pengukuran seperti *Transformator Arus* (CT) dan *Transformator Potensial* (PT) digunakan untuk mengukur arus dan tegangan pada titik sumber gangguan. Perhitungan Impedansi Terukur Berdasarkan hukum Ohm, dimana impedansi dilihat dari titik sumber gangguan saat terjadi gangguan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.17)$$

Dimana:

Z : Impedansi terukur dari titik sumber gangguan (Ohm)

V : Tegangan terukur pada titik sumber gangguan (Volt)

I : Arus terukur pada titik sumber gangguan (Ampere)

2.6. 4 Impedansi Ekivalen Bus Dengan Matriks Admitansi

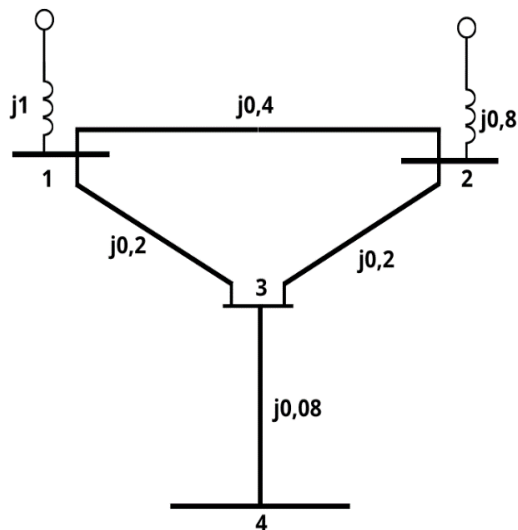
Untuk mendapatkan persamaan titik-tegangan, dapat dilakukan dengan mempertimbangkan sistem tenaga listrik sederhana yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 di mana impedansi dinyatakan dalam per unit pada basis MVA umum dan untuk kesederhanaan resistansi diabaikan. Karena solusi nodal didasarkan pada hukum *Kirchhoff* untuk arus, impedansi diubah menjadi admitansi, yaitu:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.18)$$

Dimana:

z_{ij} : Impedansi antara node

i dan j yang dalam kasus ini murni reaktansi (jx_{ij}) karena resistansi diabaikan.



Gambar 2.8 Diagram impedansi system sederhana

Langkah pertama dalam analisis ini adalah menyusun matriks admitansi nodal sistem, yang dikenal sebagai matriks Y-bus. Matriks ini menyatukan hubungan antara arus dan tegangan di semua node dalam sistem. Setiap elemen dalam matriks Y-bus menggambarkan admitansi antara dua node atau antara satu node dengan ground.

Untuk menyusun persamaan nodal, kita gunakan hukum *Kirchhoff* untuk arus yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk dan keluar dari sebuah *node* harus sama dengan nol. Jika kita asumsikan V adalah vektor tegangan pada tiap *node* dan i adalah vektor arus yang disuntikkan ke tiap *node*, maka hubungan dasar dalam bentuk matriks dapat dinyatakan sebagai:

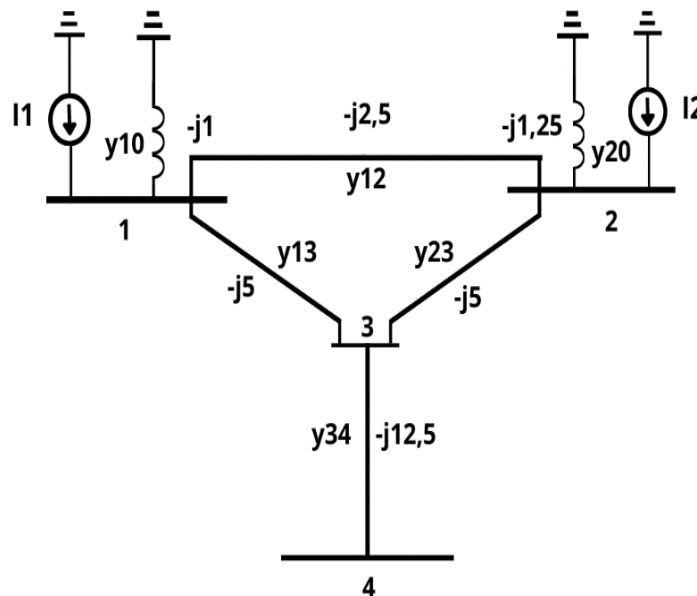
$$I = Y \times V \quad (2.19)$$

Dimana:

I : Vektor arus injeksi (arus yang masuk ke setiap node)

Y : Matriks admitansi (Y-bus)

V : Vektor tegangan pada tiap node



Gambar 2.9 Diagram masuk system

Dari rangkaian yang telah digambar ulang pada gambar 2.9 diatas dalam hal penerimaan dan trasfermasi sumber arus, *node* 0 (yang biasanya *ground*) diambil sebagai sumber refrensi. Dengan menerapkan ke node independent 1 hingga ke 4 menghasilkan:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \\
 I_2 &= y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) \\
 0 &= y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \\
 0 &= y_{34}(V_4 - V_3)
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Kemudian selesiakan persamaan tersebut menjadi:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - (y_{13}V_3) \\
 I_2 &= -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3 \\
 0 &= -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\
 0 &= -y_{34}V_3 + y_{34}V_4
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Setiap elemen Y_{ij} dari matriks Y-bus merepresentasikan total admitansi yang mempengaruhi node i Diagonal elemen Y_{ii} adalah jumlah dari semua admitansi yang terhubung langsung ke node i , sedangkan elemen non-diagonal Y_{ij} adalah negatif dari admitansi antara node i dan j . Dengan cara ini, kita dapat menuliskan matriks Y-bus untuk sistem tenaga listrik sederhana. Misalkan kita memiliki tiga node dalam sistem kita dengan impedansi z_{12} , z_{13} , dan z_{23} , antara node-node tersebut. Maka elemen-elemen matriks Y-bus adalah:

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= y_{10} + y_{12} + y_{13} \\
 Y_{22} &= y_{20} + y_{12} + y_{23} \\
 Y_{33} &= y_{13} + y_{23} + y_{34} \\
 Y_{44} &= y_{34} \\
 Y_{12} &= Y_{21} = -y_{12} \\
 Y_{13} &= Y_{31} = -y_{13} \\
 Y_{23} &= Y_{32} = -y_{23} \\
 Y_{34} &= Y_{43} = -y_{34}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Persamaan diatas Kemudian diubah Menjadi:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\ I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\ I_3 &= Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Dalam struktur jaringan ini, tidak adanya koneksi langsung antara simpul 1 dengan simpul 4 menyebabkan nilai admitansi $Y_{14} = Y_{41} = 0$. Hal yang sama berlaku untuk $Y_{24} = Y_{42} = 0$ karena tidak terdapat hubungan fisik antara simpul 2 dan simpul 4. Berdasarkan hal tersebut, struktur interkoneksi jaringan dapat diperluas menjadi representasi sistem bus secara keseluruhan. Selanjutnya, persamaan tegangan pada tiap simpul dapat diformulasikan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Langkah pertama dalam analisis ini adalah menyusun *matriks admitansi nodal sistem*, yang dikenal sebagai matriks Y-bus. Matriks ini menyatukan hubungan antara arus dan tegangan di semua node dalam sistem. Setiap elemen dalam matriks Y-bus menggambarkan admitansi antara dua *node* atau antara satu *node* dengan *ground*.

Untuk menyusun persamaan nodal, kita gunakan hukum *Kirchhoff* untuk arus yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk dan keluar dari sebuah node harus sama dengan nol. Jika kita asumsikan V_{bus} adalah vektor tegangan pada tiap node dan I_{bus} adalah vektor arus yang disuntikkan (yaitu sumber arus eksternal). Arus ini bernilai positif jika mengalir menuju bus, dan bernilai negatif jika mengalir menjauhi bus. Dengan demikian, hubungan dasar dalam bentuk matriks dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.25)$$

Di mana:

I_{bus} : Vektor Arus Injeksi (Arus Yang Masuk Ke Setiap *Node*)

Y_{bus} : Matriks Admitansi (Y-Bus)

V_{bus} : Vektor Tegangan pada tiap *Node* yang diukur dari *Node* Referensi (Tegangan *Node*).

Matriks Y_{bus} dikenal sebagai matriks admitansi bus. Elemen diagonal dari setiap simpul dalam matriks Y_{bus} adalah jumlah dari semua admitansi yang terhubung langsung ke simpul tersebut. Ini dikenal sebagai admitansi diri atau admitansi titik penggerak, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad (2.26)$$

Di mana Y_{ii} adalah elemen diagonal di baris i dan kolom i dalam matriks Y_{bus} . Y_{ij} adalah admitansi antara node i dan node j . Elemen non-diagonal Y_{ij} adalah negatif dari admitansi antara node i dan j , yaitu:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -Y_{ij} \quad (2.27)$$

Dengan menyusun persamaan ini, kita dapat menuliskan matriks Y_{bus} untuk sistem tenaga listrik yang lebih kompleks, dan menggunakan persamaan $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$ untuk menentukan tegangan di setiap node berdasarkan arus injeksi pada node-node tersebut. Kebalikan dari matriks admitansi bus, dikenal dengan matriks impedansi bus Z . Matriks admitansi yang diperoleh dengan salah satu bus sebagai referensi adalah *nonsingular*. Sebaliknya, jika tidak ada bus yang dijadikan referensi, matriks nodalnya akan menjadi singular.

Pemeriksaan terhadap matriks admitansi bus menunjukkan bahwa matriks tersebut simetris sepanjang diagonal utama, sehingga kita hanya perlu menyimpan elemen-elemen dari segitiga atas matriks tersebut. Dalam jaringan sistem tenaga listrik pada umumnya, sebuah bus hanya terhubung ke beberapa bus terdekat. Akibatnya, banyak elemen di luar diagonal yang bernilai nol. Matriks seperti ini disebut sebagai matriks jarang (*sparse matrix*), dan teknik numerik yang efisien dapat diterapkan untuk menghitung inversnya. Melalui dekomposisi segitiga yang diurutkan dengan

tepat, kebalikan dari matriks jarang dapat dinyatakan sebagai produk dari faktor-faktor matriks jarang, sehingga memberikan keuntungan dalam hal kecepatan komputasi, penyimpanan, dan pengurangan kesalahan pembulatan.

Berdasarkan persamaan (2.25) dan (2.26), matriks admitansi bus untuk jaringan pada Gambar 2.11 dapat diperoleh sebagai berikut:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j8.50 & j2.50 & j5.00 & 000000 \\ j2.50 & -j8.75 & j5.00 & 000000 \\ j5.00 & j5.00 & -j22.50 & j12.50 \\ 0 & 0 & j12.50 & -j12.50 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Fungsi yang disebut $Y_{bus} = Y_{bus}(Z_{data})$ ditulis untuk pembentukan matriks admitansi bus. Z_{Data} adalah data baris masuk yang berisi empat kolom[22]. Dua kolom pertama adalah nomor bus garis dan kolom sisanya berisi resistansi garis dan reaktansi dalam per unit. Fungsi ini mengembalikan matriks admitansi bus. Algoritma untuk program admitansi bus sangat sederhana dan mendasar untuk pemrograman sistem tenaga[26].

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat dilakukanya penelitian ini yaitu di PT PLN (Persero) ULP Liwa, yang beralamat di jalan Sebarus, Kec. Balik Bukit, Kabupaten Lampung Barat, dan PT PLN (Persero) UP2D Lampung, yang beralamat di jalan Rajabasa, Kota Bandar Lampung. Adapun waktu penelitian dimulai dari bulan Januari 2025 – Selesai.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

Alat:

1. Komputer/laptop
2. Perangkat lunak simulasi sistem tenaga listrik.
3. Perangkat lunak pengolah data dan analisis.

Bahan:

1. Data topologi penyulang Robusta
2. Data spesifikasi saluran dan peralatan

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini, peneliti melakukan tinjauan pustaka terkait metode-metode yang digunakan untuk menentukan lokasi gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik, khususnya metode impedansi.

2. Pengumpulan Data

Peneliti mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam penelitian, seperti data topologi penyulang Robusta, spesifikasi saluran dan peralatan. Data-data ini diperoleh dari PT PLN (Persero) ULP Liwa yang mengelola penyulang Robusta serta PLN UP2D Lampung.

3. Pemodelan Sistem

Berdasarkan data-data yang diperoleh, peneliti membuat model *Single Line Diagram* (SLD) dari penyulang Robusta. Pemodelan ini diperlukan untuk melakukan simulasi dan pengujian metode yang akan digunakan.

4. Simulasi dan Pengujian

Peneliti melakukan simulasi dan pengujian terhadap metode impedansi yang akan diterapkan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi dan komputasi matematis. Peneliti ini akan mensimulasikan kondisi gangguan satu fasa ke tanah untuk menguji akurasi metode yang diterapkan.

5. Analisis Hasil

Setelah melakukan simulasi dan pengujian, peneliti menganalisis hasil yang diperoleh. Analisis ini meliputi evaluasi kinerja metode impedansi yang diterapkan, serta identifikasi kelebihan dan kekurangan metode yang diterapkan.

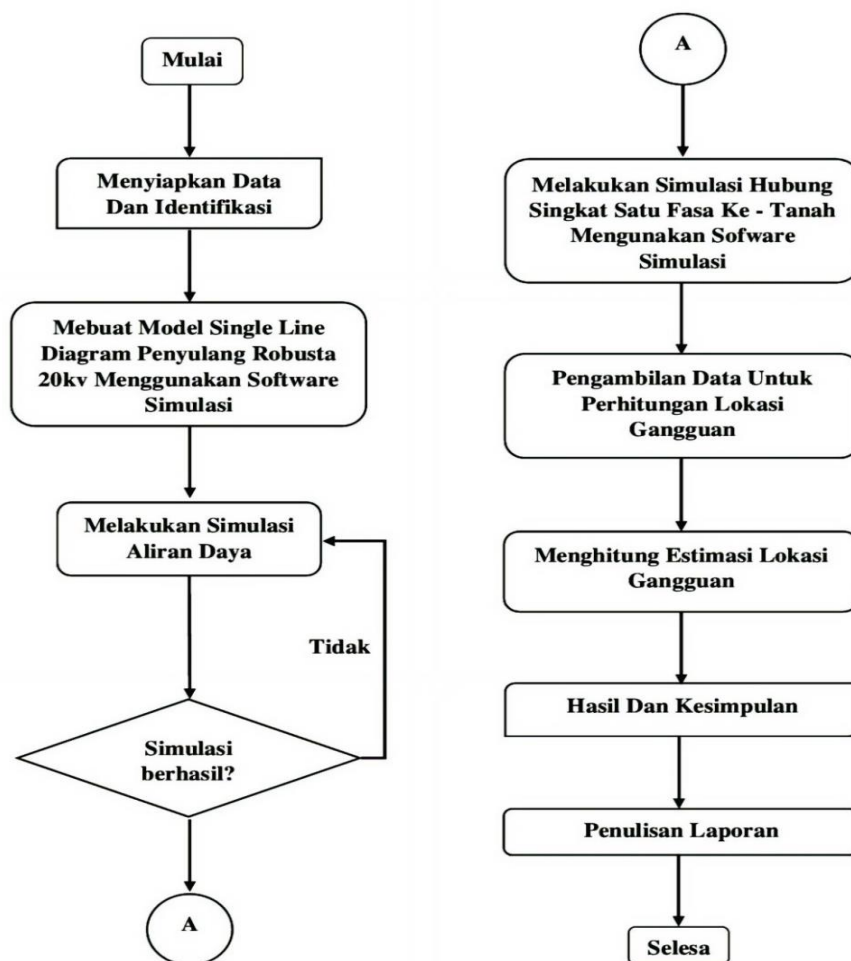
6. Penyusunan Laporan Penelitian

Tahap akhir dalam kegiatan penelitian ini adalah penyusunan dokumentasi hasil. Dokumen disusun secara sistematis dan mencakup uraian masalah, tinjauan

pustaka, metodologi yang digunakan, hasil dan analisis, serta simpulan dan rekomendasi untuk pengembangan riset berikutnya.

3.4 Pemodelan Sistem

Pada Tugas Akhir ini, konfigurasi sistem yang akan digunakan adalah konfigurasi radial. Selain itu, sistem yang digunakan adalah sistem yang tidak seimbang, di mana beban antar fasanya tidak sama. Untuk memperoleh hasil hubung singkat, diperlukan data-data Arus, Tegangan pada saat gangguan terjadi dan impedansi saluran untuk masing-masing segmen kabel. Untuk langkah secara sistematis dari pengambilan data hingga pencarian lokasi gangguan, dapat dijelaskan pada diagram alir gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.5 Data Penghantar dan Panjang Saluran

Perhitungan impedansi pada saluran distribusi tergantung pada Panjang saluran distribusi dan jenis penghantar yang akan di gunakan. Berdasarkan data yang didapat dari PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Liwa. Jenis kabel penghantar yang di gunakan pada saluran distribusinya adalah kabel AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*) dengan luas penampang 70 mm^2 dengan diameter kawat sebesar 19/2,25 mm.

Tabel 3.1 Ukuran dan konstruksi dari Hantaran Aluminium Campuran (AAAC) berdasarkan SPLN 41-8:1981[30].

1	2	3	4	5	6	7	8
Luas Penampang		Jumlah	Diamet	Berat	Perbedaa	Tahanan	Beban
		Kawat	er	Hantar	n Berat	Dc 20 °C	Beban
Nom	Sebenarnya	Dan	Hantar	an	Maksimu	Maksimu	Putus
inal		Diamet	an	Kira-			Perhitung
		er	Kira-	Kira	m	m	an
		Kawat	Kira				
mm2	mm2	n/mm	mm	Kg/Km		Ohm/Kg	Kg
16	16,84	7/1,75	5,25	46	+ 2,9	1,955	480
25	27,83	7/2,25	6,75	76	+ 2,2	1,183	790
35	34,36	7/2,5	7,50	94	+ 2,0	0,958	980
50	49,48	7/3,0	9,0	135	+ 2,0	0,665	1410
	45,70	19/1,75	8,75	126	+ 2,9	0,724	1300
55	58,07	7/3,25	9,75	160	+ 2,0	0,567	1655
70	75,55	19/2,25	11,25	208	+ 2,2	0,438	2150
95	93,27	19/2,5	12,5	256	+ 2,0	0,355	2660
100	99,30	7/4,25	12,75	272	+ 2,0	0,332	2830
120	112,85	19/2,75	13,75	310	+ 2,0	0,293	3220
150	157,6	19/3,25	16,25	434	+ 2,2	0,210	4490

Untuk mengetahui nilai impedansi saluran berdasarkan masing-masing Panjang saluran anatar bus dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan sebagai berikut:

a) Perhitungan resistansi kawat penghantar

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

Dimana:

A : Luas penampang kawat penghantar (mm^2)

ρ : Tahanan jenis kawat penghantar/resistifitas $ohm * mm^2/m$

L : Panjang kawat penghantar (m)

b) Perhitungan reaktansi induktif

$$X_L = 2\pi * f * L \quad (3.2)$$

Dimana sebelum menghitung reaktansi induktif terlebih dahulu harus menghitung nilai induktansi kawat penghantar dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut:

$$L = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ (Henry/m)} \quad (3.3)$$

Adapun persamaan untuk menghitung nilai D_m yaitu jarak rata-rata geometri (G_m) yaitu dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} \quad (3.4)$$

Dimana:

X_L : Reaktansi kawat penghantar (ohm)

f : Frekuensi (Hz)

2π : Sudut arus bolak balik

L : Induktansi kawat penghantar (henry)

D_m : Jarak rata-rata geometris antara pusat konduktor / GMD (*Geometric mean distance*)

D_s : Radius Rata-rata geometris dari konduktor/GMR (*Geometric mean Radius*)

3.6 Algoritma Penentuan Lokasi Gangguan

Secara garis besar, untuk menentukan lokasi gangguan dengan metode impedansi, diperlukan data-data saat terjadi gangguan hubung singkat. Data-data yang diperlukan adalah Arus Gangguan Per Fasa, Tegangan Fasa Saat Di Gardu Induk, Dan Nilai Impedansi Fasa Saluran. Data arus beban juga diperlukan, dengan dihitung sesuai rumus yang ada berdasarkan arus beban sebelum gangguan, tegangan sebelum gangguan, dan tegangan setelah gangguan. Prinsip ini mengacu pada rumus:

$$V = I \times R \quad (3.5)$$

Dimana:

I : Arus hubung singkat yang terjadi (Ampere)

V : Tegangan padagardu induk (Volt)

R : Impedansi saluran (Ω)

Untuk mengidentifikasi titik lokasi terjadinya gangguan, dibutuhkan informasi mengenai besar arus yang mengalir ke arah beban pada fasa-a dalam kondisi normal sebelum kejadian gangguan I_{La} . Besaran arus tersebut berfungsi sebagai nilai acuan arus pada saat gangguan berlangsung. Berdasarkan hal ini, perkiraan awal besaran arus gangguan di fasa-a dapat ditentukan melalui nilai arus dalam kondisi pra-gangguan yang telah diperoleh sebelumnya.

$$I_{Fa} = I_{Sa} - I_{La} \quad (3.6)$$

Dimana :

I_{Fa} : Arus gangguan (*fault current*) setelah terjadi gangguan (Ampere)

I_{Sa} : Arus pada saat keadaan stabil (*steady-state current*) sebelum terjadi Gangguan (Ampere)

I_{La} : Arus beban (*load current*) sebelum gangguan terjadi (Ampere)

Rumus ini menyatakan bahwa arus gangguan I_{Fa} adalah selisih antara arus pada keadaan stabil I_{Sa} dan arus beban I_{La} sebelum gangguan.

$$I_{La} = I_{La_{pre-pault}} * \frac{V_{fault}}{V_{pre-fault}} \quad (3.7)$$

Dimana :

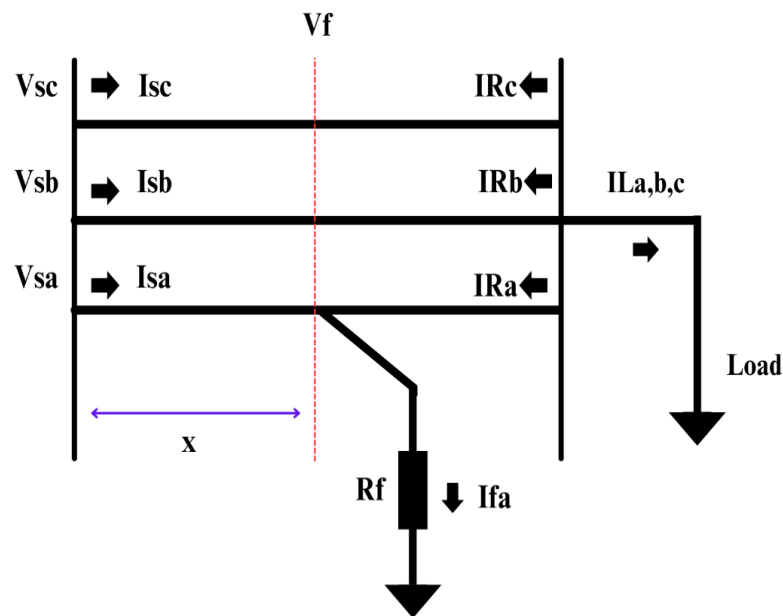
I_{La} : Arus beban (*load current*) sebelum gangguan terjadi (Ampere)

$I_{La_{pre-pault}}$: Arus beban sebelum gangguan terjadi (Ampere)

V_{fault} : Tegangan sistem saat gangguan terjadi (Volt)

$V_{pre-fault}$: Tegangan sistem sebelum gangguan terjadi (Volt)

3.6.1 Gangguan Hubung Singkat 1 Safa Ke Tanah



Gambar 3.2 Gangguan 1 fasa ke tanah.

Langkah awal yaitu harus menghitung nilai M_{1m} dan M_{2m} menggunakan Persamaan berikut:

$$M_{1m} = \sum_k (Z_{m_{k_r}} \times I_{S_{k_i}} - Z_{m_{k_i}} \times I_{S_{k_r}}) \quad (3.8)$$

$$M_{2m} = \sum_k (Z_{m_{k_r}} \times I_{S_{k_r}} + Z_{m_{k_i}} \times I_{S_{k_i}}) \quad (3.9)$$

Setelah nilai M_{1m} dan M_{2m} di dapatkan Langkah selanjutnya hitung nilai x untuk mendapatkan jarak lokasi gangguan dengan menggunakan Persamaan berikut:

$$X = \frac{V_{S_{a_r}} \times I_{F_{a_i}} - V_{S_{a_i}} \times I_{F_{a_r}}}{M1 \times I_{F_{a_i}} - m2 \times I_{F_{a_r}}} \quad (3.10)$$

Keterangan:

- x : Rasio jarak konduktor dari titik sumber menuju lokasi gangguan dengan nilai berkisar antara 0 sampai 1.
- $V_{S_{a_r}}$: Bagian riil dari nilai tegangan sumber yang terdapat pada simpul fasa-a.
- $V_{S_{a_i}}$: Bagian imajiner dari nilai tegangan sumber yang terdapat pada simpul fasa-a.
- $I_{F_{a_r}}$: Bagian riil dari besaran arus gangguan yang terjadi di fasa-a.
- $I_{F_{a_i}}$: Bagian imajiner dari besaran arus gangguan yang terjadi pada fasa-a.
- $Z_{a_{k_r}}$: Bagian riil dari nilai impedansi konduktor pada fasa yang sedang ditinjau.
- $Z_{a_{k_i}}$: Bagian imajiner dari nilai impedansi konduktor pada fasa yang sedang ditinjau.
- $I_{S_{k_r}}$: Bagian riil dari arus gangguan yang berpindah menuju fasa k (dimana k dapat berupa a, b, ataupun c).
- $I_{S_{k_i}}$: Bagian imajiner dari arus gangguan yang berpindah menuju ke fasa k.
- $M1, m2$: Gabungan parameter arus dan impedansi dari masing-masing fasa, yang dimanfaatkan untuk mengestimasi posisi awal terjadinya gangguan.

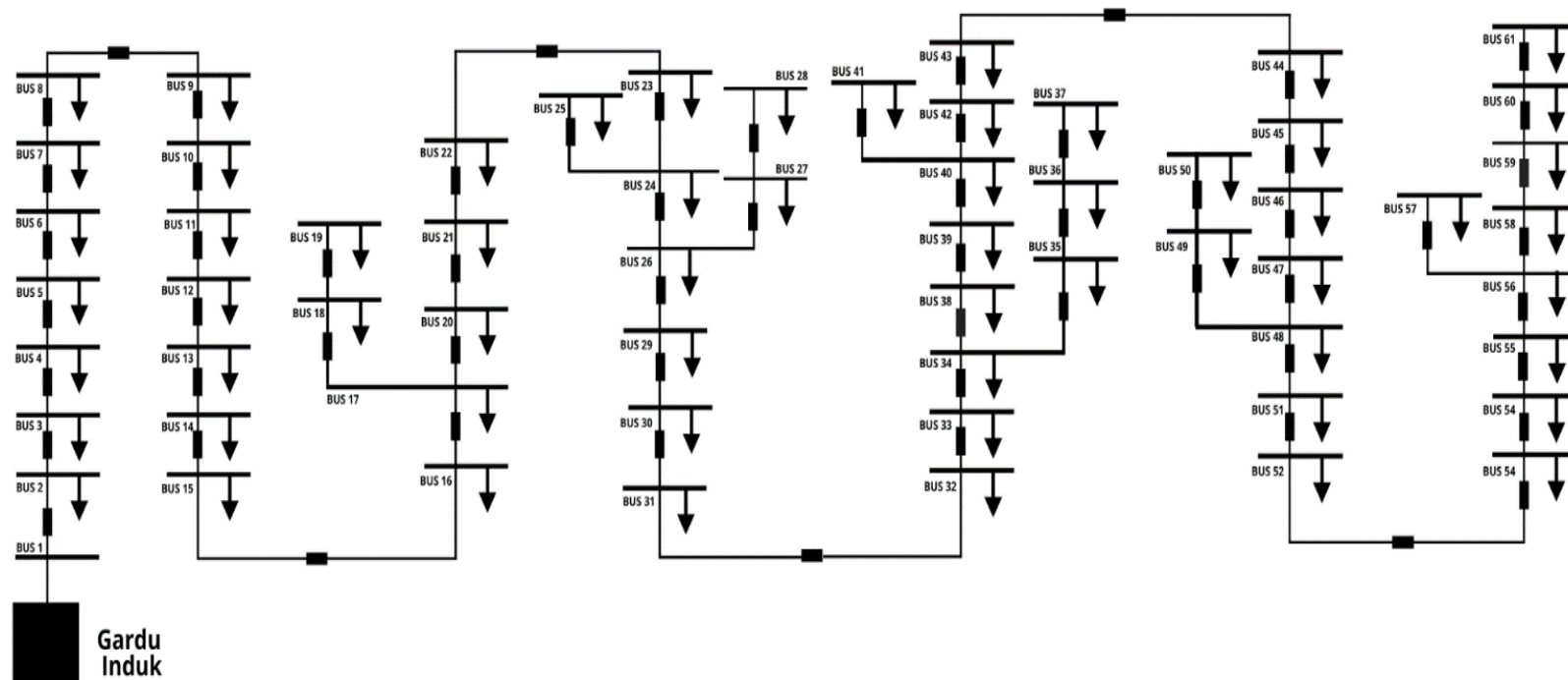
Langkah selanjutnya adalah cek konvergensi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$|X^{(n)} - X^{(n-1)}| < \delta \quad (3.11)$$

Dimana toleransi 0,001 km. Setelah itu akan dilakukan iterasi sejumlah-n hingga didapatkan nilai yang konvergen, setelah nilai konvergen maka iterasi akan di hentikan dan nilai x merupakan lokasi gangguan dari subsitem hingga ke lokasi gangguan dalam (km).

3.7 Sistem Kelistrikan

Pada penyusunan Tugas Akhir ini, sistem kelistrikan yang dianalisis merupakan penyulang jaringan distribusi dengan konfigurasi radial yang terdiri atas 61 titik bus. Jaringan ini beroperasi pada tegangan menengah sebesar 20 kV. Gambar 3.3 menyajikan diagram satu garis (*Single Line Diagram*) dari sistem distribusi yang menjadi objek studi pada penelitian ini.



Gambar 3.3 *Single Line Diagram* Penyulang Robusta

Untuk mendukung proses analisis dan simulasi teknis, data teknis yang digunakan mencakup impedansi fasa, panjang saluran serta data pembebanan tiap gardu pada saluran distribusi yang dirangkum secara rinci pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3. Seluruh pemodelan sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi kelistrikan untuk analisis sistem tenaga listrik.

Dalam pemodelan sistem tersebut, karakteristik kabel pada penyulang dimasukkan dalam bentuk parameter impedansi, sesuai konfigurasi dan data teknis masing-masing segmen jaringan, yang kemudian direpresentasikan dalam perangkat lunak simulasi tersebut.

Tabel 3.2 Data impedansi dan panjang saluran penyulang

Nomor Kabel	Panjang		R	X_L	R	X_L
	M	Km	Urutan Positif dan Negatif		Urutan Nol	
1	1230	1,23	0,00047	0,47625	0,00140	1,42874
2	855	0,855	0,00032	0,33105	0,00097	0,99315
3	1650	1,65	0,00062	0,63887	0,00187	1,91661
4	585	0,585	0,00022	0,22651	0,00066	0,67952
5	334	0,334	0,00013	0,12932	0,00038	0,38797
6	1320	1,32	0,00050	0,51110	0,00150	1,53329
7	625	0,625	0,00024	0,24200	0,00071	0,72599
8	190	0,19	0,00007	0,07357	0,00022	0,22070
9	833	0,833	0,00032	0,32253	0,00095	0,96760
10	1260	1,26	0,00048	0,48786	0,00143	1,46359
11	720	0,72	0,00027	0,27878	0,00082	0,83634
12	762	0,762	0,00029	0,29504	0,00087	0,88512
13	2200	2,2	0,00083	0,85183	0,00250	2,55548
14	833	0,833	0,00032	0,32253	0,00095	0,96760
15	386	0,386	0,00015	0,14946	0,00044	0,44837
16	271	0,271	0,00010	0,10493	0,00031	0,31479
17	912	0,912	0,00035	0,35312	0,00104	1,05936
18	1450	1,45	0,00055	0,56143	0,00165	1,68429
19	1540	1,54	0,00058	0,59628	0,00175	1,78883

20	2270	2,27	0,00086	0,87893	0,00258	2,63679
21	592	0,592	0,00022	0,22922	0,00067	0,68766
22	592	0,592	0,00022	0,22922	0,00067	0,68766
23	362	0,362	0,00014	0,14016	0,00041	0,42049
24	421	0,421	0,00016	0,16301	0,00048	0,48903
25	264	0,264	0,00010	0,10222	0,00030	0,30666
26	551	0,551	0,00021	0,21334	0,00063	0,64003
27	738	0,738	0,00028	0,28575	0,00084	0,85725
28	275	0,275	0,00010	0,10648	0,00031	0,31943
29	720	0,72	0,00027	0,27878	0,00082	0,83634
30	1220	1,22	0,00046	0,47238	0,00139	1,41713
31	973	0,973	0,00037	0,37674	0,00111	1,13022
32	563	0,563	0,00021	0,21799	0,00064	0,65397
33	273	0,273	0,00010	0,10570	0,00031	0,31711
34	488	0,488	0,00018	0,18895	0,00055	0,56685
35	681	0,681	0,00026	0,26368	0,00077	0,79104
36	614	0,614	0,00023	0,23774	0,00070	0,71321
37	735	0,735	0,00028	0,28459	0,00083	0,85376
38	945	0,945	0,00036	0,36590	0,00107	1,09769
39	1480	1,48	0,00056	0,57305	0,00168	1,71914
40	157	0,157	0,00006	0,06079	0,00018	0,18237
41	334	0,334	0,00013	0,12932	0,00038	0,38797
42	652	0,652	0,00025	0,25245	0,00074	0,75735
43	213	0,213	0,00008	0,08247	0,00024	0,24742
44	213	0,213	0,00008	0,08247	0,00024	0,24742
45	2010	2,01	0,00076	0,77826	0,00228	2,33478
46	177	0,177	0,00007	0,06853	0,00020	0,20560
47	1840	1,84	0,00070	0,71244	0,00209	2,13731
48	1770	1,77	0,00067	0,68533	0,00201	2,05600
49	335	0,335	0,00013	0,12971	0,00038	0,38913
50	1130	1,13	0,00043	0,43753	0,00128	1,31259
51	431	0,431	0,00016	0,16688	0,00049	0,50064

52	870	0,87	0,00033	0,33686	0,00099	1,01057
53	1290	1,29	0,00049	0,49948	0,00147	1,49844
54	93	0,093	0,00004	0,03601	0,00011	0,10803
55	1740	1,74	0,00066	0,67372	0,00198	2,02115
56	558	0,558	0,00021	0,21605	0,00063	0,64816
57	970	0,97	0,00037	0,37558	0,00110	1,12673
58	380	0,38	0,00014	0,14713	0,00043	0,44140
59	2220	2,22	0,00084	0,85957	0,00252	2,57871
60	2220	2,22	0,00084	0,85957	0,00252	2,57871

Adapun data beban yang di gunakan pada penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini:

Tabel 3.3 Data beban untuk masing-masing gardu

No Gardu	Daya Fasa ke Fasa					
	P (MW)			Q (MVAR)		
	A-B	B-C	C-A	A-B	B-C	C-A
LB0001	8,071	7,233	9,644	7,751	6,946	9,261
LB0002	11,743	7,299	13,706	-12,549	-7,799	-14,646
LB0003	47,612	54,014	34,993	45,724	52,770	33,605
LB0004	62,943	44,812	61,481	60,449	43,035	59,044
LB0005	11,553	23,504	14,466	11,096	22,572	13,893
LB0006	14,355	24,055	15,658	13,785	23,308	15,038
LB0007	1,992	0,000	4,018	1,912	0,000	3,859
LB0008	5,179	0,000	2,401	4,973	0,000	2,305
LB0009	0,800	0,000	1,195	0,769	0,000	1,148
LB0010	0,790	0,793	0,398	0,759	0,762	0,383
LB0011	26,407	19,122	17,927	25,361	18,363	17,217
LW0007	4,968	5,381	4,496	4,770	5,082	4,318
LW0008	36,969	17,204	28,007	35,504	16,522	26,897
LW0009	6,795	13,257	10,193	1,812	11,710	2,718
LW0010	18,968	20,582	14,246	18,216	20,106	13,681

LW0012	14,721	14,137	14,937	3,925	3,769	3,982
LW0026	34,450	28,977	60,795	33,086	27,829	58,386
LW0032	35,864	19,678	32,691	-38,323	-21,117	-34,932
LW0033	15,174	19,042	18,807	-16,215	-20,348	-20,095
LW0034	18,311	14,085	18,568	-19,567	-15,052	-19,841
LW0035	18,405	23,606	23,102	17,676	22,671	22,186
LW0042	22,996	18,297	21,257	6,131	4,879	5,667
LW0048	20,312	26,457	22,089	-21,704	-28,271	-23,603
LW0049	27,560	27,560	29,325	-29,450	-28,951	-31,336
LW0053	32,019	25,970	35,261	30,749	24,942	33,863
LW0054	14,414	15,200	19,919	3,843	4,053	5,310
LW0056	12,003	16,183	13,664	3,201	14,359	12,071
LW0057	25,331	16,262	18,398	24,327	15,618	17,669
LW0059	27,424	19,039	13,250	26,336	18,284	12,725
LW0060	30,808	36,009	26,635	29,587	34,431	25,579
LW0063	14,341	3,984	8,764	13,773	3,826	8,416
LW0064	17,353	16,759	14,528	16,666	16,094	13,953
LW0074	18,999	20,085	17,643	5,066	5,425	4,704
LW0081	12,971	11,821	19,728	3,459	3,152	5,260
LW0085	8,071	8,293	17,693	7,751	7,964	16,991
LW0086	19,486	10,522	19,266	18,713	10,375	18,502
LW0087	2,421	3,173	7,536	2,326	3,047	7,238
SK0001	5,553	7,668	8,329	5,333	7,365	7,999
SK0002	17,279	22,503	20,535	16,595	21,238	19,721
SK0003	12,977	9,417	22,505	3,461	2,511	6,000
SK0004	12,701	16,901	11,177	3,386	4,507	2,979
SK0005	1,732	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SK0006	13,261	1,593	1,587	12,736	1,531	1,524
SK0007	2,401	7,734	4,382	2,305	7,427	4,209
SK0008	3,513	2,162	2,761	0,937	0,573	0,736
SK0009	20,140	18,886	14,217	19,342	18,138	13,654
SK0010	26,452	21,495	16,063	23,365	18,987	14,189

SK0011	37,911	33,567	30,008	36,408	31,813	28,818
SK0012	13,415	11,367	11,497	3,577	3,031	3,066
SK0013	15,737	25,134	16,538	4,197	6,701	4,410
LW0095	14,307	17,577	18,550	13,740	16,808	17,814
LW0093	16,049	13,822	11,302	15,414	13,274	10,853
LW0094	20,488	18,639	19,208	-21,893	-19,917	-20,525
LB0012	5,442	10,884	8,234	4,806	9,615	7,273
LB0013	6,348	6,348	7,074	5,608	5,608	6,249
SK0014	7,697	1,380	2,227	2,052	0,369	0,594
SK0015	44,751	37,133	22,950	-47,818	-39,851	-24,524
LB0014	14,804	13,545	24,110	14,217	13,008	23,154
LB0015	9,873	12,242	8,002	9,481	11,757	7,685
LW0096	10,051	5,511	7,332	-10,740	-5,790	-7,834

Adapun data total jarak pengukuran lokasi gangguan serta Data gardu induk Penyulang Robusta dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 dibawah ini:

Tabel 3.4 Total jarak pengukuran lokasi gangguan dan impedansi saluran pada gardu terjauh dari gardu induk (GI).

Total Jarak Lokasi Pengukuran (M)	Total Impedansi Lokasi Pengukuran (M)	
	R	X
43232	8,812575	21,17364

Tabel 3.5 Data gardu induk penyulang

Data	Nilai
Tegangan 3 fasa	: 20 kV
Tegangan 1 fasa	: 11,547 kV
MVAsc 3 fasa	: 1169,1
MVAsc 1 fasa	: 1169,1
KAsc 3 fasa	: 32,142
KAsc 1 fasa	: 32,142
X/R	: 10

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal penting sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Metode *Extended Impedance Based Fault Location* efektif untuk mendeteksi lokasi gangguan pada jarak maksimum 12300 meter. Hal ini disebabkan oleh kontribusi variasi impedansi, distribusi beban, dan konfigurasi jaringan terhadap akurasi estimasi.
- 2) Hasil pengujian pada 60 bus di Penyulang Robusta menunjukkan bahwa metode impedansi memiliki tingkat akurasi yang dipengaruhi oleh jarak bus dari gardu induk dan kondisi ketidakseimbangan beban. Pada bus terdekat (bus 2), metode ini menunjukkan akurasi yang cukup baik dengan kesalahan estimasi sebesar 8% (99,49 meter). Namun, seiring bertambahnya jarak, kesalahan estimasi meningkat hingga berkisar antara 30-34%, dengan kasus terburuk mencapai 34% pada bus 28. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi ketidakseimbangan beban pada Penyulang Robusta berpengaruh signifikan terhadap akurasi metode, terutama pada lokasi yang jauh dari gardu induk.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, diberikan saran sebagai berikut:

- 1) Metode impedansi dapat digunakan sebagai alat bantu awal untuk mengestimasi lokasi gangguan, terutama pada jaringan dengan jarak pendek dari gardu induk, namun perlu dikombinasikan dengan metode lain untuk meningkatkan akurasi.
- 2) Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi metode ini, seperti konfigurasi jaringan, beban tidak seimbang, dan resistansi gangguan yang bervariasi.
- 3) Untuk implementasi di lapangan, jaringan distribusi sebaiknya dibagi menjadi beberapa segmen dengan panjang maksimal 5 km per segmen dan dilengkapi dengan sensor atau perangkat pengukuran pada setiap titik penghubung segmen. Hal ini akan memperkecil area pencarian dan meningkatkan akurasi estimasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. R. Syah, S. I. Haryudo, U. T. Kartini, and N. Kholis, "Analisis hubungan singkat pada sistem distribusi 20 kV PT. Pertamina EP Asset 4 Field Cepu Distrik Ledok menggunakan ETAP 12.6.0," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 3, pp. 699-706, 2021.
- [2] M. A. A. Auliq and I. B. Pratama, "Analisa penentuan estimasi jarak gangguan pada sistem distribusi menggunakan metode ETAP 12.6.0," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 3, no. 1, pp. 31-42, 2021.
- [3] y. menchafou, m. zahri, m. habibi, and h. el markhi, "optimal load distribution estimation for fault location in electric power distribution systems," *archives of electrical engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 77-87, mar. 2017, doi: 10.1515/aee-2017-0006.
- [4] F, Faritto., & Yulisman, Y. (2022). "Analisa Penentuan Titik Lokasi Gangguan Pada Rele Jarak Menggunakan Metode Impedansi". *Ensiklopedia Research and Community Service Review*, 1(3), 93-99.
- [5] V. Killi, R. Mandal, R. Pitchaimuthu and S. M P, "Detection of fault location in active distribution network by hybrid state estimation," 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT), Male, Maldives, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087843.
- [6] R. H. Salim, M. Resener, A. D. Filomena, K. R. C. de Oliveira, and A. S. Bretas, "Extended fault-location formulation for power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 508-516, Apr. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002977.

- [7] M. Zahri, Y. Menchafou, H. El Markhi, M. Habibi, and M. Zahri, "Simplified method for single line to ground-fault location in electrical power distribution systems," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 5, no. 2, pp. 246-255, 2015.
- [8] S. J. Lee et al., "An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 524-532, Apr. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820431.
- [9] D. Agustian, "Pemeliharaan jaringan distribusi saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV dengan metode right of way (ROW) di PT PLN (Persero) ULP Serang," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3S1, 2024.
- [10] R. A. Duyo, "Analisis penyebab gangguan jaringan pada distribusi listrik menggunakan metode fault tree analysis di PT. PLN (Persero) rayon daya Makassar," *Vertex Elektro*, vol. 12, no. 2, pp. 1-12, 2020.
- [11] A. Hamdani, "Analisis penentuan lokasi gangguan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah menggunakan metode direct circuit analysis 20 kV di PT Cikarang Listrindo," *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, vol. 7, no. 2, pp. 165-174, 2024.
- [12] R. Vaswani, "Analisa jaringan distribusi tegangan menengah dengan sistem single wire earth return untuk wilayah tertinggal, terdepan dan terluar," *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, 2022.
- [13] N. Pasra, A. Makkulau, and M. H. Adnan, "Gangguan yang terjadi pada sistem jointing pada saluran kabel tegangan menengah 20 kV," *Sutet*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2018.
- [14] C. G. Arsoniadis and V. C. Nikolaidis, "Fault location method for overhead feeders with distributed generation units based on direct load flow approach," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 1135-1146, 2024.
- [15] N. Deyhimi, H. Torkaman, M. Shadaei, M. Shabanirad and M. Kermani, "Comparative Multi-objective Investigation of Radial and Ring

- Distribution System in the Presence of DGs," *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Bari, Italy, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584527.
- [16] Y. N. Bhosale, R. P. Hasabe and A. Kshirsagar, "Real Time Relay Coordination in Radial and Hybrid Distribution System," *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEFET61574.2024.10718025.
- [17] Z. Syaroni and T. Rijanto, "Analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi 20 kV dan solusinya pada jaringan tegangan rendah," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, 2019.
- [18] S. N. Mohtar, N. Jamal and M. Sulaiman, "Analysis of all aluminum conductor (AAC) and all aluminum alloy conductor (AAAC)," *2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004.*, Chiang Mai, Thailand, 2004, pp. 409-412 Vol. 3, doi: 10.1109/TENCON.2004.1414794.
- [19] M. I. Nawawi, S. A. Rahman and K. Kopsidas, "Assessing the Impact of Galvanic Corrosion on the Ampacity of ACSR/TW and ACCC/TW Conductors," *2024 IEEE 4th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, Pulau Pinang, Malaysia, 2024, pp. 305-310, doi: 10.1109/ICPEA60617.2024.10499159.
- [20] H. A. Lastya, "Analisa Pengaruh eksternal dan internal terhadap andongan dan tegangan tarik pada saluran transmisi 150 kV," *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 1, no. 2, 2016.
- [21] "IEEE Guide to the Installation of Overhead Transmission Line Conductors," in *IEEE Std 524-2003 (Revision of IEEE Std 524-1992)*, vol., no., pp.1-152, 11 March 2004, doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94441.
- [22] S. Anisah, Z. Tharo, and S. Suhardi, "Analisis perbaikan tegangan ujung pada jaringan tegangan menengah 20 kV dengan simulasi E-TAP (studi kasus PT PLN (Persero) rayon Kuala," in *Seminar Nasional Teknik (SEMNASTEK) UISU*, 2019, pp. 208-213.

- [23] T. Ofuji *et al.*, "Study on Advanced Maintenance Strategies and Asset Management for Substation Equipment in Japan: Investigation of the Transition of Substation Equipment Quantity, Trend Analysis of Failures," *2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 34-38, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991507.
- [24] O. Penangsang, "Penentuan lokasi gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Tegalsari Surabaya dengan metode impedansi berbasis GIS (Geographic Information System)," Ph.D. dissertation, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2017.
- [25] "Standar perusahaan umum listrik negara (SPLN) 52-3: 1983," 1983.
- [26] C. N. Anshar and B. Budiman, "Studi analisa arus gangguan hubung singkat berdasarkan lokasi titik gangguan pada saluran udara tegangan menengah 20 kV," *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 140-149, 2022.
- [27] M. J. Davi, M. Oleskovicz, and F. V. Lopes, "An impedance-multi-method-based fault location methodology for transmission lines connected to inverter-based resources," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 154, art. 109466, 2023.
- [28] M. Abasi, "Accurate fault location algorithm for untransposed transmission lines based on network phasor equations in positive-, negative-, and zero-sequences domain during fault," *IEEE Access*, 2024.
- [29] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York, NY: McGraw-Hill, 1999, pp. 257-313.
- [30] Hantaran aluminium campuran (AAAC), Standar Perusahaan Umum Listrik Negara J.D.P. dan E., SPLN 41-8:1981, 1981.