

**ANALISIS *SETTING KOORDINASI RELAI JARAK DALAM
SISTEM PROTEKSI SALURAN TRANSMISI 150 KV GARDU
INDUK PLTMG BAUBAU – GARDU INDUK BAUBAU –
GARDU INDUK RAHA***

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



DISUSUN OLEH:

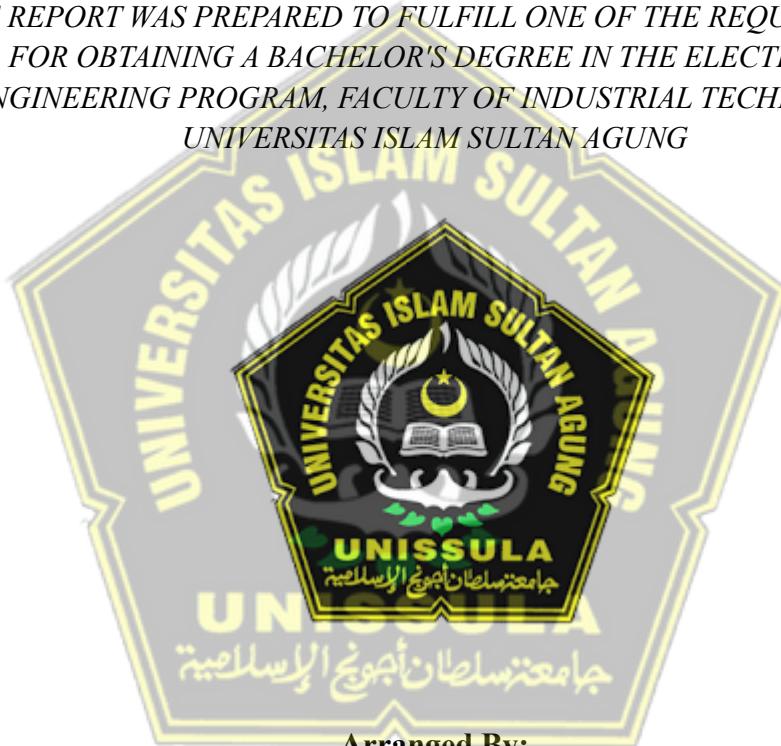
**MUHAMMAD NAILUL ULUM
NIM 30602200202**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

***ANALYSIS OF JARAK RELAY COORDINATION SETTING IN
THE PROTECTION SYSTEM OF 150 KV TRANSMISSION LINE
FROM PLTMG BAUBAU SUBSTATION – BAUBAU
SUBSTATION – RAHA SUBSTATION***

FINAL PROJECT

*THIS REPORT WAS PREPARED TO FULFILL ONE OF THE REQUIREMENTS
FOR OBTAINING A BACHELOR'S DEGREE IN THE ELECTRICAL
ENGINEERING PROGRAM, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG*



**MUHAMMAD NAILUL ULUM
NIM 30602200202**

**MAJORING OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS SETTING KOORDINASI RELAI JARAK DALAM SISTEM PROTEKSI SALURAN TRANSMISI 150 KV GARDU INDUK PLTMG BAUBAU – GARDU INDUK BAUBAU – GARDU INDUK RAHA”** ini disusun oleh:

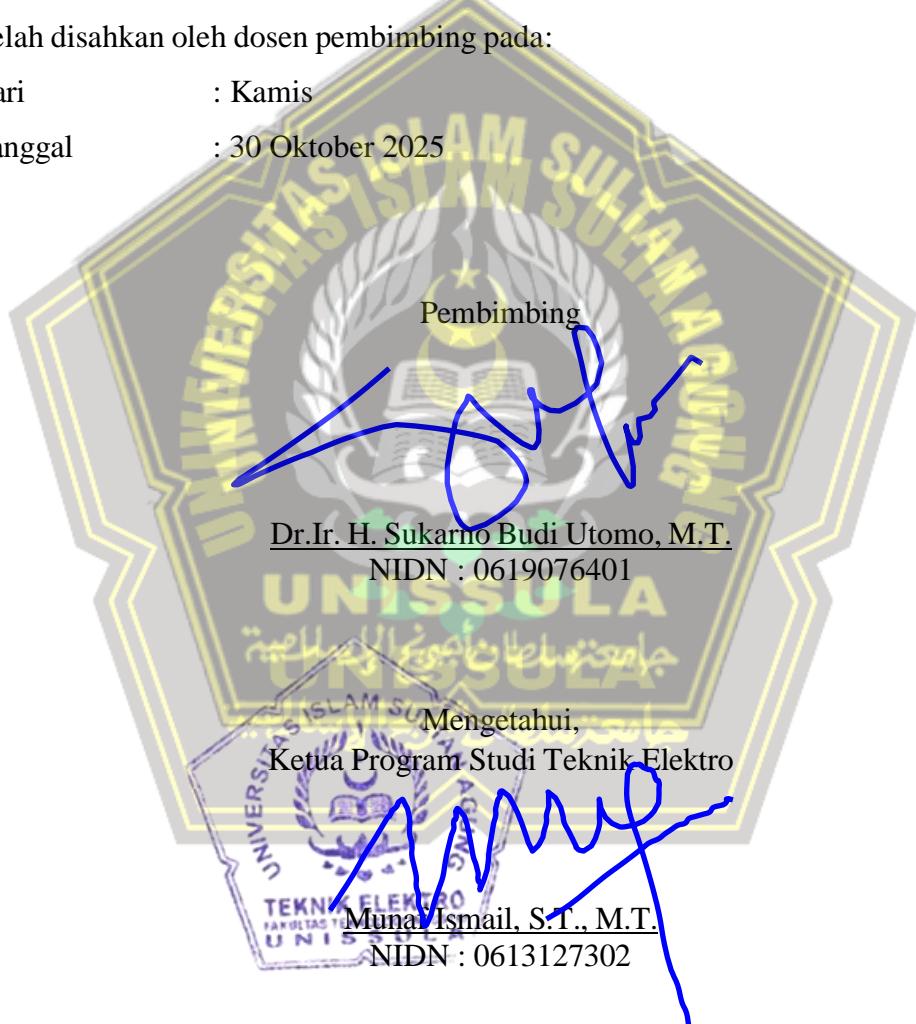
Nama : Muhammad Nailul Ulum
NIM 30602200202

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 30 Oktober 2025



Dr.Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.

NIDN : 0619076401

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro

Munawwir Ismail, S.T., M.T.

NIDN : 0613127302

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS SETTING KOORDINASI RELAI JARAK DALAM SISTEM PROTEKSI SALURAN TRANSMISI 150 KV GARDU INDUK PLTMG BAUBAU – GARDU INDUK BAUBAU – GARDU INDUK RAHA”** ini telah dipertahankan di depan dosen penguji Tugas Akhir pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 21 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Gunawan, S.T., M.T.
NIDN. 0607117101
Ketua/Penguji 1



Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D, IPM.
NIDN. 0628097501
Penguji 2



Dr.Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.
NIDN. 0619076401
Penguji 3



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tanagn di bawah ini:

Nama : Muhammad Nailul Ulum
NIM : 30602200202
Judul Tugas Akhir : ANALISIS *SETTING* KOORDINASI RELAI
JARAK DALAM SISTEM PROTEKSI
SALURAN TRANSMISI 150 KV GARUD
INDUK PLTNG BAUBAU – GARUD INDUK
BAUBAU – GARUD INDUK RAHA

Dengan bahwa ini saya menyatakan bahwa judul da isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apbila dikemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

UNISSULA

جامعة سلطان عبد العزيز الإسلامية

Semarang, 24 Oktober 2025

Yang Menyatakan



Muhammad Nailul Ulum

PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Nailul Ulum
NIM : 30602200202
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir/Skripsi/Tesis/Disertasi* dengan judul :

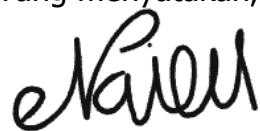
ANALISIS SETTING KOORDINASI RELAI JARAK DALAM SISTEM PROTEKSI SALURAN
TRANSMISI 150 KV GARDU INDUK PLTMG BAUBAU – GARDU INDUK BAUBAU – GARDU
INDUK RAHA

dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-ekslusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 24 Oktober 2025

Yang menyatakan,



Muhammad Nailul Ulum

*Coret yang tidak perlu

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirobbilalamin segala puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wataala, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “ Analisis Setting Koordinasi Relai Jarak Dalam Sistem Proteksi Saluran Transmisi 150 kV Gardu Induk PLTMG BAUBAU – Gardu Induk BAUBAU – Gardu Induk RAHA” dengan lancar. Proses penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang turut membantu dan mendukung agar terselesaikannya laporan ini. Maka dari itu penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Dosen pembimbing saya Bapak Dr.Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.yang telah memberikan bimbingan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
3. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas bantuannya dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua saya yang telah memberikan doa dan dukungan selama saya berkuliahan di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Bapak Alfonsus Andre Dody Setyawan yang telah membantu saya dalam menambah wawasan terkait *setting* proteksi dan relai jarak.
6. Teman seperjuangan saya yang telah banyak membantu selama perkuliahan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna. Penulis meminta maaf dan terbuka terhadap semua kritik maupun saran yang membangun, agar kedepannya tugas akhir dengan judul serupa dapat menjadi lebih baik lagi. Akhir kata penulis berharap semoga penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca maupun penulis juga.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR PERSAMAAN.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	9
2.2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik.....	11
2.2.3 Gardu Induk.....	12
2.2.4 Komponen Gardu Induk	12
2.2.5 Sistem Proteksi Tenaga Listrik	13
2.2.6 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik.....	14
2.2.7 Tujuan Sistem Proteksi	17
2.2.8 Potential Transformer (Trafo iTegangan).....	17

2.2.9 Current Transformer (Trafo Arus).....	18
2.2.10 Circuit Breaker (Pemutus Tenaga).....	19
2.2.11 Relai Proteksi	20
2.2.12 Prinsip Dasar Relai	21
2.2.13 Relai Jarak (Jarak Relay)	22
2.2.14 Prinsip Kerja Relai Jarak	23
2.2.15 Pengaturan Relai Jarak	24
2.2.16 Zona Proteksi Relai Jarak	25
2.2.17 Batas Toleransi Impedansi Zona Relai Jarak	29
2.2.18 Ratio Trafo Arus (CT) dan Trafo Tegangan (VT)	30
2.2.19 Karakteristik Relai Jarak Ditinjau dari Prinsip Kerjanya	30
2.2.20 Pola Pengamanan Teleproteksi Relai Jarak.....	34
2.2.21 Konstruksi Relai Jarak.....	35
2.2.22 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	37
2.2.23 Gangguan Hubung Singkat (Short Circuit ;Fault)	40
2.2.24 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	40
2.2.25 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	41
2.2.26 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa.....	42
2.2.27 Impedansi.....	43
2.2.28 DIGSILENT PowerFactory	44
BAB III METODE PENELITIAN.....	46
3.1 Model Penelitian.....	46
3.2 Lokasi dan Objek Penelitian	47
3.2.1 Gardu Induk 150 kV Baubau	48
3.2.2 Gardu Induk 150 kV Raha	49
3.2.3 Gardu Induk 150 kV Raha	49
3.3 Data Penelitian	50
3.3.1 Studi Literatur	51
3.3.2 Pengumpulan Data Lapangan.....	51
3.4 Setting Impedansi Zona Relai Jarak.....	54
3.5 Arus Hubung Singkat Sistem Baubau.....	55

3.6 Data Material Transmisi Utama (MTU) Pemutus (PMT)	56
3.7 Melakukan Simulasi Menggunakan Software DIgSILENT PowerFactory	
24.0.2.0.....	57
3.7.1 Time Distance Diagram	58
3.7.2 Analisa Hubung Singkat	59
3.7.3 Analisa Hasil	59
3.8 Diagram Alir Penelitian	60
3.9 Langkah Penelitian.....	61
BAB IV DATA DAN ANALISIS	63
4.1 Kebutuhan Data Analisis	63
4.2 Analisis Zona Pengamanan.....	63
4.3 Data Gangguan Sistem Transmisi ULTG Baubau	64
4.4 Analisa Skenario Gangguan Dengan Setting Relai Aktual.....	65
4.5 Analisa Skenario Gangguan Dengan Setting Relai Perhitungan Baru	67
4.5.1 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI Baubau - GI PLTMG.....	67
4.5.2 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI Raha - GI PLTMG	71
4.5.3 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI PLTMG - GI Raha.....	75
4.6 Simulasi Relai Distance Menggunakan Software DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0	80
4.6.1 Langkah–Langkah Simulasi Relai Jarak pada simulasi DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0.....	80
4.6.2 Hasil Time Distance Diagram Pada Simulasi	86
4.7 Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat.....	88
4.8 Analisa Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat Menggunakan Software DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0	97
4.8.1 Analisa Hasil Time Distance Diagram.....	97
4.8.2 Analisa Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat.....	98
4.9 Rugi Daya Akibat Adanya Gangguan	99

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	100
5.1 Kesimpulan	100
5.2 Saran	101
DAFTAR PUSTAKA.....	103



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik	10
Gambar 2. 2 Gardu Induk	12
Gambar 2. 3 Komponen Proteksi SUTT	15
Gambar 2. 4 Elemen-elemen Sistem Proteksi	16
Gambar 2. 5 Trafo Tegangan (Potential Transformer).....	18
Gambar 2. 6 Trafo Arus (Current Transformer)	19
Gambar 2. 7 Pemutus Tenaga (Circit Breaker).....	20
Gambar 2. 8 Elemen Dasar Relai	22
Gambar 2. 9 Diagram Blok Rele Jarak (Jarak Relay)	24
Gambar 2. 10 Pengaturan Zona Proteksi Relai Jarak	26
Gambar 2. 11 Karakteristik Relai Impedansi dengan Diagram R – X	31
Gambar 2. 12 Karakteristik Relai Mho	32
Gambar 2. 13 Karakteristik Relai Jarak Jenis Reaktansi.....	33
Gambar 2. 14 Karakteristik Relai Jarak Jenis Quadrilateral	34
Gambar 2. 15 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	41
Gambar 2. 16 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa.....	42
Gambar 2. 17 Koordinat Kartesius	43
Gambar 3. 1 Lokasi Gardu Induk 150 kV Baubau dalam Peta	48
Gambar 3. 2 Lokasi Gardu Induk 150 kV Baubau	48
Gambar 3. 3 Lokasi Gardu Induk 150 kV Raha dalam Peta	49
Gambar 3. 4 Lokasi Gardu Induk 150 kV Raha	49
Gambar 3. 5 Lokasi Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau Peta	50
Gambar 3. 6 Lokasi Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau	50
Gambar 3. 7 Konfigurasi Gardu Induk 150 kV area Kepulauan Buton	52
Gambar 3. 8 Diagram Alir Penelitian	60
Gambar 4. 1 Zona-zona yang akan dianalisa	64
Gambar 4. 2 Jangkauan perlindungan zona 1	67
Gambar 4. 3 Jangkauan perlindungan zona 2	68
Gambar 4. 4 Jangkauan perlindungan zona 3	69
Gambar 4. 5 Jangkauan perlindungan zona 1 GI Raha – GI PLTMG	71

Gambar 4. 6 Jangkauan perlindungan zona 2 GI Raha – GI PLTMG	72
Gambar 4. 7 Jangkauan perlindungan zona 3 GI Raha – GI PLTMG	73
Gambar 4. 8 Jangkauan perlindungan zona 1 GI PLTMG – GI Raha	75
Gambar 4. 9 Jangkauan perlindungan zona 2 GI PLTMG – GI Raha	76
Gambar 4. 10 Jangkauan perlindungan zona 3 GI PLTMG – GI Raha	77
Gambar 4. 11 Tampilan Layar Awal Software DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0	81
Gambar 4. 12 Tampilan Rangkaian Pengganti Aktual di DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0	81
Gambar 4. 13 Tampilan Rangkaian Pengganti Asumsi Penambahan Jaringan di DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0	82
Gambar 4. 14 Penginputan Tegangan Nominal/Tegangan Kerja	82
Gambar 4. 15 Penginputan Panjang Penghantar/Panjang Saluran	83
Gambar 4. 16 Penginputan Impedansi Saluran	83
Gambar 4. 17 Penginputan Relai Jarak	84
Gambar 4. 18 Pemodelan CT	84
Gambar 4. 19 Pemodelan VT	85
Gambar 4. 20 Penginputan Paramater External Grid	86
Gambar 4. 21 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual	87
Gambar 4. 22 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual	87
Gambar 4. 23 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual dengan penambahan jaringan	88
Gambar 4. 24 Letak Gangguan Skenario 1 (10,843 km dan 103,66 km dari GI Baubau)	90
Gambar 4. 25 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 1 GI Baubau	90
Gambar 4. 26 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 1 GI PLTMG Baubau	91
Gambar 4. 27 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 1 GI Raha	91
Gambar 4. 28 Letak Gangguan Skenario 2	92
Gambar 4. 29 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI Baubau	92

Gambar 4. 30 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI PLTMG Baubau	93
Gambar 4. 31 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI Raha	93
Gambar 4. 32 Letak Gangguan Skenario 3.....	94
Gambar 4. 33 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Baubau	95
Gambar 4. 34 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI PLTMG	95
Gambar 4. 35 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Raha	96
Gambar 4. 36 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Raha	97



DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Konduktor	52
Tabel 3. 2 Data Impedansi Saluran.....	53
Tabel 3. 3 Data Ratio CT dan PT.....	53
Tabel 3. 4 Data iImpedansi Trafo	54
Tabel 3. 5 Data Setting Relay Jarak aktual.....	55
Tabel 3. 6 Data Arus Hubung Singkat (HIS) Sistem Baubau.....	56
Tabel 3. 7 Data Spesifikasi PMT di GI Baubau, GI PLTMG Baubau,dan GI Raha	56
Tabel 4. 1 Pengaturan aktual relai jarak.....	65
Tabel 4. 2 Hasil perhitungan nilai pengaturan relai jarak.....	78
Tabel 4. 3 Hasil Analisa Koordinasi Pengaturan Relai Jarak Setelah Perhitungan Ulang.....	89



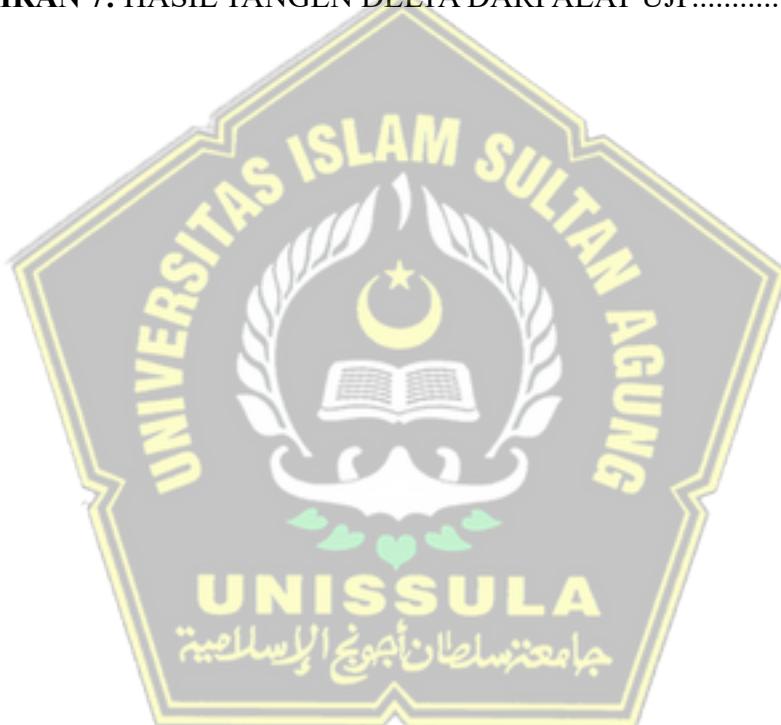
DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2. 1 Clearing Time.....	16
Persamaan 2. 2 Impedansi (Ohm)	23
Persamaan 2. 3 Zone 1	26
Persamaan 2. 4 Zone 2 Min.....	27
Persamaan 2. 5 Zone 2 Max	27
Persamaan 2. 6 Ztr Zone 2.....	28
Persamaan 2. 7 Zone 3 Min.....	28
Persamaan 2. 8 Zone 3 Max	28
Persamaan 2. 9 Ztr Zone 3.....	29
Persamaan 2. 10 Rasio CT dan PT	30
Persamaan 2. 11 Jarak Gangguan.....	39
Persamaan 2. 12 Gangguan satu fasa ke tanah.....	41
Persamaan 2. 13 Gangguan dua fasa.....	42
Persamaan 2. 14 Gangguan hubung singkat tiga fasa	43
Persamaan 2. 15 Impedansi.....	44



DAFTAR LAMPIRAN

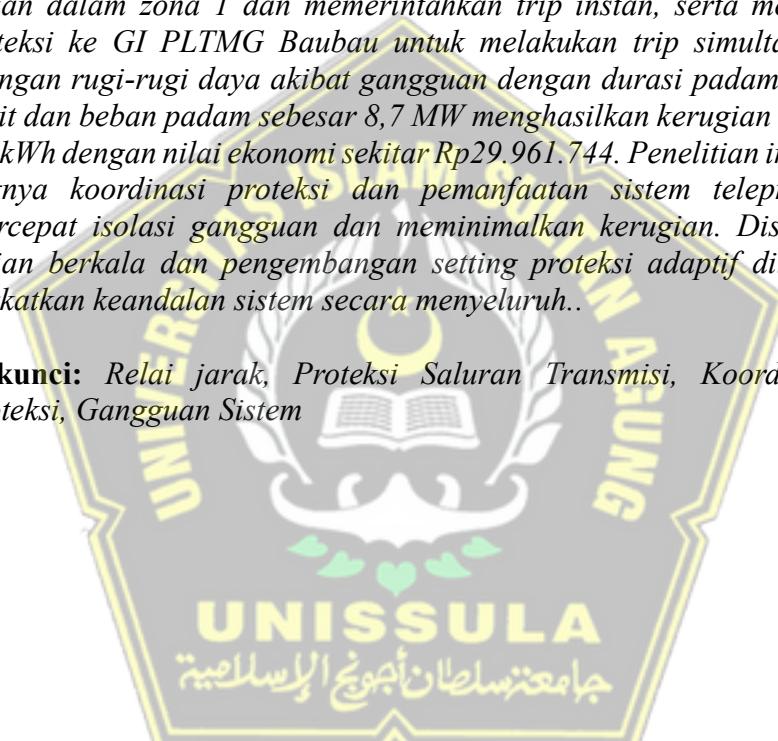
LAMPIRAN 1: HASIL TURNITIN	107
LAMPIRAN 2: MAKALAH TUGAS AKHIR	108
LAMPIRAN 3: NAME PLATE TRANSFORMATOR DAYA	109
LAMPIRAN 4: HASIL PENGUJIAN INDEKS POLARISASI	112
LAMPIRAN 5: HASIL PENGUJIAN TANGEN DELTA	113
LAMPIRAN 6: HASIL PENGUJIAN <i>BREAKDOWN VOLTAGE</i>	114
LAMPIRAN 7: HASIL TANGEN DELTA DARI ALAT UJI	115



ABSTRAK

Keandalan sistem proteksi pada saluran transmisi tegangan tinggi merupakan faktor krusial dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis koordinasi setting relai jarak pada saluran transmisi 150 kV yang menghubungkan Gardu Induk (GI) PLTMG Baubau, GI Baubau, dan GI Raha, dengan fokus pada kinerja relai terhadap gangguan sistem serta pemanfaatan fitur teleproteksi. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data impedansi saluran, setting zona proteksi, perhitungan impedansi gangguan, dan evaluasi arus gangguan berdasarkan posisi gangguan terhadap zona relai. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem proteksi telah bekerja secara selektif dan cepat, di mana relai pada GI Raha mendeteksi gangguan dalam zona 1 dan memerintahkan trip instan, serta mengirim sinyal teleproteksi ke GI PLTMG Baubau untuk melakukan trip simultan. Selain itu, perhitungan rugi-rugi daya akibat gangguan dengan durasi padam selama 2 jam 23 menit dan beban padam sebesar 8,7 MW menghasilkan kerugian energi sebesar 20.751 kWh dengan nilai ekonomi sekitar Rp29.961.744. Penelitian ini menegaskan pentingnya koordinasi proteksi dan pemanfaatan sistem teleproteksi dalam mempercepat isolasi gangguan dan meminimalkan kerugian. Disarankan agar pengujian berkala dan pengembangan setting proteksi adaptif dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem secara menyeluruh..

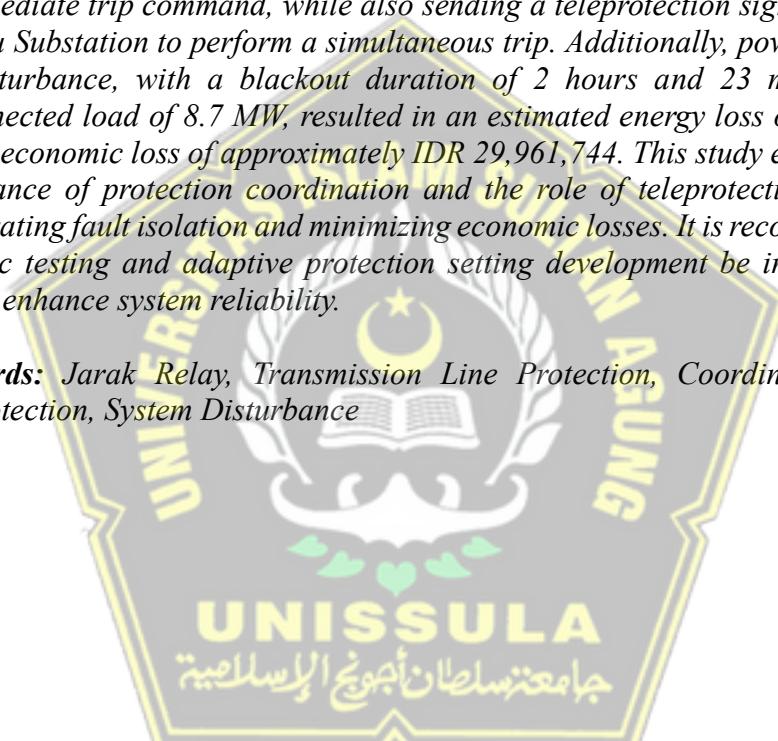
Kata kunci: Relai jarak, Proteksi Saluran Transmisi, Koordinasi Setting, Teleproteksi, Gangguan Sistem



ABSTRACT

The reliability of protection systems in high-voltage transmission lines is a critical factor in maintaining the continuity of electrical energy distribution. This study aims to analyze the coordination setting of jarak relays on a 150 kV transmission line connecting PLTMG Baubau Substation, Baubau Substation, and Raha Substation, with a focus on relay performance during system disturbances and the utilization of teleprotection features. The methodology includes data collection of transmission line impedance, protection zone settings, fault impedance calculations, and fault current analysis based on the fault location relative to the relay zone. The results show that the protection system operated selectively and rapidly, where the relay at Raha Substation detected a fault within zone 1 and issued an immediate trip command, while also sending a teleprotection signal to PLTMG Baubau Substation to perform a simultaneous trip. Additionally, power loss due to the disturbance, with a blackout duration of 2 hours and 23 minutes and a disconnected load of 8.7 MW, resulted in an estimated energy loss of 20,751 kWh and an economic loss of approximately IDR 29,961,744. This study emphasizes the importance of protection coordination and the role of teleprotection systems in accelerating fault isolation and minimizing economic losses. It is recommended that periodic testing and adaptive protection setting development be implemented to further enhance system reliability.

Keywords: Jarak Relay, Transmission Line Protection, Coordination Setting, Teleprotection, System Disturbance



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik menjadi kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari karena sebagian besar aktivitas masyarakat modern mengandalkan ketersediaan daya listrik. Pesatnya perkembangan teknologi di Indonesia membuat permintaan terhadap energi listrik mengalami peningkatan[1]. PT PLN (Persero) sebagai perusahaan penyedia layanan kelistrikan nasional memiliki tanggung jawab untuk mendistribusikan listrik secara merata ke seluruh pelosok negeri. Pada pelaksanaannya, proses penyaluran listrik sangat bergantung pada keberadaan infrastruktur seperti gardu induk dan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) yang berperan penting dalam menjaga kontinuitas dan efisiensi sistem interkoneksi kelistrikan.

Dalam menghadapi kemungkinan terjadinya gangguan, keberadaan sistem proteksi menjadi komponen penting dalam menjamin keandalan jaringan distribusi listrik. Sistem proteksi merupakan suatu sistem berfungsi melindungi peralatan listrik dengan cara mendeteksi adanya gangguan dan memutus bagian sistem yang bermasalah agar tidak memengaruhi bagian lain yang masih beroperasi normal[2]. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan energi listrik maka dibutuhkan kinerja sistem proteksi yang handal, cepat, sensitif, selektif dan ekonomis[3]. Dengan demikian, setiap gangguan yang muncul dapat segera ditangani. Keterlambatan atau kegagalan dalam memisahkan bagian yang terganggu dapat menyebabkan kerugian, baik bagi konsumen maupun penyedia energi listrik[4].

Salah satu alat proteksi yang sering diterapkan pada sistem transmisi adalah relai jarak (Jarak Relay) yang beroperasi berdasarkan prinsip pengukuran impedansi saluran[5]. Ketika terjadi penurunan impedansi secara drastis akibat gangguan, relay ini akan mengirimkan sinyal untuk memutus aliran arus listrik. Dalam sistem proteksi salura udara tegangan tinggi 150 kV relai jarak berfungsi sebagai proteksi utama sekaligus proteksi cadangan. Hal ini mengharuskan

koordinasi antar relai jarak pada masing-masing gardu induk (GI) sangat krusial untuk mencegah terjadinya *overlap* maupun *underreach*, yaitu kondisi dimana relai jarak bekerja diluar zona yang seharusnya[6]. Apabila hal ini terjadi, tingkat keandalan dan selektivitas sistem proteksi akan menurun serta dapat menimbulkan pemadaman yang lebih luas.

Pada sistem transmisi 150 kV yang menghubungkan Gardu Induk (GI) Baubau dan Gardu Induk Raha, penerapan proteksi menggunakan relai jarak sangat penting karena beberapa tantangan teknis yang memengaruhi kestabilan sistem[7]. Pertama, karena masih menggunakan konfigurasi radial, maka penentuan setting proteksi harus dilakukan secara presisi untuk menghindari kesalahan koordinasi yang berpotensi menyebabkan pemadaman luas. Kedua, karena jaringan ini tergolong baru dibangun, maka perlu dilakukan evaluasi ulang untuk memastikan pengaturan proteksi sudah sesuai dengan kondisi teknis dan perangkat yang digunakan. Ketiga, dengan panjang lintasan saluran mencapai 101,856 km, potensi gangguan satu fasa, dua fasa, maupun tiga fasa ke tanah meningkat sehingga diperlukan sistem proteksi yang mampu memberikan perlindungan berlapis yang andal.

Selain ketiga faktor tersebut, terdapat pula aspek eksternal yang tidak kalah penting, yaitu tingginya tingkat kerapatan sambaran petir pada saluran transmisi Baubau–Raha. Berdasarkan data tahun 2024, tercatat sekitar 666 kali sambaran petir mengenai jalur transmisi dengan arus maksimum mencapai 120 kA. Kondisi ini memperbesar risiko terjadinya gangguan isolasi maupun kerusakan peralatan, sehingga sistem proteksi yang diterapkan harus mampu merespons dengan cepat dan efektif untuk meminimalkan dampak yang ditimbulkan.

Pada penelitian mengambil contoh kasus pada saat gangguan yang ditemukan dengan impedansi sebesar $3,235 \Omega$ yang menghasilkan arus hubung singkat mencapai 454 A, sehingga menunjukkan adanya gangguan signifikan pada saluran transmisi. Rele jarak sebagai perangkat proteksi utama mendeteksi impedansi tersebut berada dalam zona 1, sehingga bekerja secara instan tanpa penundaan waktu untuk mengirimkan sinyal trip ke pemutus tenaga. Kejadian ini menegaskan pentingnya evaluasi pengaturan zona proteksi agar sesuai dengan

karakteristik saluran, sehingga relai jarak dapat memastikan pemutusan gangguan berlangsung cepat, selektif, dan andal demi menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik.

Dengan adanya kondisi tersebut serta potensi pertambahan beban yang terdapat di sekitar wilayah Baubau dan Raha dan juga rencana jangka panjang terkait interkoneksi sistem Baubau dengan sistem Sulawesi, maka peran relai jarak sangat penting untuk melindungi sistem transmisi yang berada di wilayah Baubau dan Raha. Kesalahan setting koordinasi dapat menyebabkan relai tidak bekerja sesuai dengan zona yang seharusnya yang dapat mengurangi keandalan dari pasokan energi listrik tersebut. Maka dari itu evaluasi ulang terhadap setting dan kinerja relai jarak menjadi suatu keharusan. Penyesuaian ini bertujuan agar sistem proteksi mampu merespons gangguan dengan tepat tanpa menimbulkan kesalahan koordinasi maupun area kerja relai yang tidak sesuai. Evaluasi yang komprehensif akan menjamin bahwa penyaluran energi listrik tetap handal, kontinuitas pelayanan dapat terjaga, serta risiko pemadaman luas akibat gangguan dapat diminimalkan.

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan tersebut, maka penulis melakukan analisis terhadap *setting relay* jarak pada jaringan transmisi 150 kV Baubau – Raha. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keefektifan Relai jarak dalam mendeteksi dan menangani gangguan, serta menentukan posisi gangguan berdasarkan impedansi gangguan yang telah disetting. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kinerja sistem proteksi dan menjaga keandalan penyaluran energi listrik di wilayah tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibuat, maka peneliti dapat merumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil evaluasi koordinasi setting relai jarak dalam mendeteksi gangguan pada saluran transmisi 150 kV antara GI Baubau – GI PLTMG Baubau - GI Raha setelah terjadinya gangguan akibat sambaran petir yang menyebabkan trip PMT?

2. Bagaimana dampak penambahan jaringan terhadap *setting* pada relai jarak di gardu induk Baubau – PLTMG Baubau - Raha?
3. Bagaimana kinerja relai jarak pada saluran transmisi 150 kV antara GI Baubau – GI PLTMG Baubau - GI Raha saat terjadi gangguan hubung singkat?
4. Berapa daya yang tidak tersalurkan selama masa padam yang diakibatkan karena sambaran petir?

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk menjaga agar pembahasan tidak keluar dari topik permasalahan, peneliti hanya membatasi hal-hal sebagai berikut :

1. Sistem yang ditinjau adalah sistem Baubau dengan saluran SUTT 150 kV Baubau – PLTMG Baubau.
2. Nilai Z_f dari bermacam-macam gangguan pada titik (jarak) yang sama maka dianggap nilainya sama.
3. Tidak membahas koordinasi OCR dan GFR.
4. Penelitian ini menggunakan simulasi gangguan dengan aplikasi ETAP
5. *Setting* impedansi pada relai jarak yang menjadi acuan dalam penelitian ini merujuk pada Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali (2013).

1.4 Tujuan Penelitian

Terdapat beberapa tujuan dalam penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

1. Menganalisa koordinasi *setting relay* jarak dalam mendekripsi dan mengatasi gangguan pada saluran transmisi 150 kV antara GI Baubau – GI PLTMG Baubau - GI Raha.
2. Melakukan perhitungan ulang terhadap besaran impedansi serta waktu kerja proteksi relai jarak pada SUTT 150 kV jalur Baubau – Raha yang dilakukan dengan mengacu pada standar yang tercantum dalam Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa–Bali (2013).

3. Melakukan simulasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi 150 kV Baubau – Raha maupun pada penghantar berikutnya dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0. Tujuannya adalah untuk memverifikasi kinerja relai jarak sehingga dapat dipastikan bahwa proteksi berfungsi secara optimal ketika gangguan terjadi pada zona 1, zona 2, maupun zona 3.
4. Menghitung kerugian daya yang disebabkan oleh adanya gangguan pada sistem transmisi 150 kV agar dapat mengetahui kerugian finansial yang ditanggung oleh PT PLN apabila terjadi pada jaringan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjelaskan prinsip kerja relai jarak sebagai proteksi utama pada saluran transmisi SUTT maupun SUTET..
2. Menguraikan metode perhitungan setting koordinasi relai jarak pada penghantar 150 kV Baubau – PLTMG Baubau.
3. Menyajikan pemahaman mengenai koordinasi parameter setting impedansi zona 1, zona 2, dan zona 3 antara GI Baubau dan GI PLTMG Baubau.
4. Menganalisis dampak penambahan jaringan pada sistem Baubau apabila tidak diikuti dengan penyesuaian setting relai jarak.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan memberikan gambaran secara garis besar, dalam hal ini dijelaskan isi dari masing – masing bab dari laporan ini. Sistematika penulisan dalam pembuatan laporan ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini berisikan tentang jurnal – jurnal dan penelitian yang pernah dilakukan yang memiliki permasalahan ataupun metode yang digunakan pada penelitian yang akan dilakukan. Selain itu pada bab ini juga berisikan mengenai dasar – dasar teori yang digunakan untuk menunjang pembahasan yang akan dilakukan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini mendeskripsikan tentang model penelitian dan pengambilan data, objek penelitian, data penelitian, prosedur dalam penelitian dan diagram alir dalam penelitian.

BAB IV : DATA DAN ANALISA

Bab ini berisikan tentang data indeks polarisasi, data tangen delta, data *breakdown voltage*, perhitungan nilai indeks polarisasi, perhitungan nilai tangen delta, perhitungan nilai *breakdown voltage* dan penentuan kelayakan isolasi pada trafo.

BAB V : PENUTUP

Bab ini mendeskripsikan penyelesaian tugas akhir, dapat dibuat pertimbangan dan rekomendasi berdasarkan temuan data penelitian dan analisis yang dilakukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu dijadikan referensi dalam penulisan tugas akhir ini, antara lain :

1. “Analisis Setting dan Koordinasi Rele Jarak Saluran 150 kV Ungaran–Krapyak–Srondol”. Penelitian ini berfokus pada analisis pengaturan dan koordinasi rele jarak pada saluran transmisi 150 kV Ungaran – Krapyak – Srondol, yang merupakan komponen penting dalam sistem tenaga listrik untuk melindungi dari gangguan. Rele jarak berfungsi untuk mendeteksi dan menetralisir gangguan dengan menghitung impedansi saluran berdasarkan tegangan dan arus yang diukur. Melalui simulasi menggunakan perangkat lunak DiGILENT, penelitian ini menemukan bahwa pengaturan rele jarak pada saluran tersebut tidak memenuhi standar NPAG Alstom, dengan jangkauan zona 1 masing-masing sebesar 80,14% dan 83,25%, di bawah ambang batas minimum 85%. Setelah dilakukan perhitungan ulang, jangkauan zona rele berhasil disesuaikan menjadi 85%, memastikan bahwa rele berfungsi sesuai dengan standar yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan pentingnya simulasi dalam pengaturan rele jarak untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi dalam saluran transmisi listrik[8].
2. “Analisis Setting dan Koordinasi Rele Jarak Pada GI 150 KV Pandean Lamper Arah Srondol”. Penelitian mengenai proteksi saluran transmisi 150 kV menunjukkan bahwa rele jarak merupakan perangkat utama dalam mendeteksi gangguan hubung singkat dengan membagi proteksi menjadi tiga zona sesuai standar IEEE C37.113.2015. Simulasi menggunakan software DiGILENT pada saluran Pandean Lamper–Srondol mengidentifikasi pengaturan zona yang belum sesuai standar, seperti zona 1 yang hanya mencakup 79% dari panjang saluran. Setelah dilakukan penyesuaian, jangkauan zona diperbaiki menjadi 85,1% untuk

zona 1 dan 149,6% untuk zona 2, yang meningkatkan kecepatan respons rele dalam mendeteksi gangguan di lokasi kritis. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya koordinasi dan pengaturan rele jarak untuk memastikan keandalan sistem proteksi saluran transmisi[9].

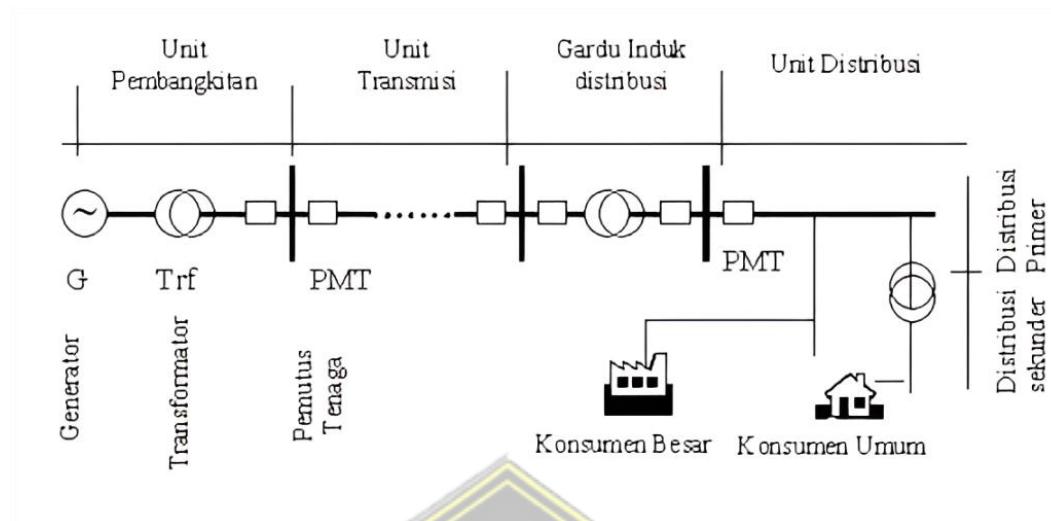
3. “Analisis Penggunaan Rele Jarak Pada Sistem Transmisi Gardu Induk 150 kV Jajar Ke Gardu Induk 150 kV Banyudono”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan rele jarak pada sistem transmisi Gardu Induk 150 kV Jajar ke Gardu Induk 150 kV Banyudono menghasilkan nilai impedansi yang berbeda untuk setiap zona perlindungan. Zona 1 dirancang untuk melindungi area terdekat dengan waktu kerja instan, sedangkan zona 2 dan zona 3 berfungsi sebagai cadangan dengan waktu kerja yang lebih lama. Penelitian ini juga menghitung nilai impedansi gangguan yang terukur dan menentukan letak gangguan berdasarkan data tersebut, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem transmisi dan memastikan respons yang efisien terhadap gangguan. Dengan pengaturan rele yang tepat, diharapkan kontinuitas penyediaan listrik dapat terjaga dengan baik[10].
4. “Analisis Koordinasi Setting Rele Jarak Pada GI 150 Kv Kudus-Jekulo-Pati Secara Dua Arah”. Dalam penelitian ini menjelaskan pentingnya sistem proteksi pada saluran transmisi listrik, terutama penggunaan rele jarak yang berfungsi untuk mendeteksi gangguan berdasarkan perbandingan tegangan dan arus. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa koordinasi dan pengaturan rele jarak dapat dianalisis menggunakan perangkat lunak seperti DIgSILENT PowerFactory, yang memungkinkan simulasi kinerja dan koordinasi rele. Standar yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada IEEE std C37.113.2015 dan panduan dari ALSTOM, memastikan bahwa setting rele memenuhi ketentuan yang berlaku. Hasil studi terdahulu menekankan perlunya pemeliharaan dan pengaturan ulang (resetting) untuk mencapai performa yang optimal dalam proteksi saluran transmisi, sehingga meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan[11].

5. “Evaluasi Setting Rele Jarak Gardu Induk Ungaran Jaringan 150kV Arah Krapyak-2” Rele jarak merupakan proteksi dalam sistem tenaga listrik yang bekerja berdasarkan impedansi terhadap gangguan untuk mendeteksi dan mengisolasi bagian jaringan guna mencegah kerusakan lebih luas. Prinsip kerjanya mengukur impedansi antara titik pemasangan dan lokasi gangguan dengan zona proteksi yang mencakup zona 1 (cepat), zona 2 (waktu tunda), dan zona 3 (proteksi cadangan). Setting rele jarak melibatkan penyesuaian nilai impedansi berdasarkan panjang jaringan dan karakteristik sistem tenaga listrik, di mana zona 1 melindungi sekitar 80% saluran transmisi tanpa waktu tunda, zona 2 melindungi seluruh panjang saluran dengan waktu tunda tertentu, dan zona 3 bertindak sebagai proteksi cadangan. Evaluasi kinerja rele dilakukan melalui simulasi dan perhitungan analitis untuk memastikan setting yang optimal tanpa mengganggu kestabilan sistem. Studi kasus pada Gardu Induk Ungaran menunjukkan pentingnya evaluasi dalam memastikan proteksi sistem tenaga listrik berjalan optimal dengan membandingkan hasil perhitungan dan kondisi aktual guna meningkatkan keandalan proteksi jaringan[12].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari empat komponen utama, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi, dan penggunaan tenaga listrik atau beban.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pembangkit listrik mencakup berbagai jenis pembangkit tenaga, seperti Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA), dan Pusat Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit kemudian disalurkan atau ditransmisikan ke berbagai pusat pengguna melalui saluran listrik.

Pada sistem berkapasitas besar, tegangan keluaran dari generator biasanya dinaikkan terlebih dahulu. Umumnya, generator menghasilkan tegangan antara 6 kV hingga 24 kV. Nilai tegangan tersebut selanjutnya ditingkatkan menjadi tegangan tinggi sebesar 70 kV hingga 150 kV atau ke tegangan ekstra tinggi di atas 150 kV. Peningkatan tegangan ini diterapkan dalam penyaluran energi listrik jarak jauh untuk meminimalkan kerugian daya yang terjadi, seperti rugi daya [13].

Energi listrik kemudian dialirkan melalui saluran transmisi menuju Gardu Induk. Di Gardu Induk, tegangan diturunkan menggunakan transformator menjadi tegangan menengah atau distribusi primer sebesar 20 kV yang merupakan standar distribusi PLN. Tegangan menengah ini dapat langsung digunakan oleh konsumen dengan kebutuhan daya besar seperti industri berskala besar. Setelah itu, energi dialirkan melalui jaringan distribusi primer

dan diturunkan lagi pada gardu distribusi menjadi tegangan rendah sebesar 380/220 V. Tegangan rendah tersebut akan disalurkan ke rumah-rumah pelanggan melalui jaringan distribusi tegangan rendah[13].

2.2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik berperan penting sebagai penghubung antara pusat pembangkit energi dengan jaringan distribusi yang tersebar di lokasi-lokasi terpencil. Melalui pengaliran energi listrik pada tegangan tinggi atau ekstra tinggi sistem ini dapat mengurangi rugi-rugi daya yang disebabkan oleh aliran arus besar sehingga efisiensi dan keandalan penyaluran dapat terjaga. Selain itu, transmisi pada tegangan tinggi memungkinkan pengiriman energi dalam jumlah besar dengan infrastruktur yang lebih hemat dan stabil terhadap fluktuasi beban.

Komponen utama dari sistem transmisi mencakup saluran transmisi. Komponen tersebut berbentuk jaringan udara (saluran atas) maupun kabel bawah tanah serta gardu induk yang dilengkapi transformator untuk menaikkan (step-up) atau menurunkan (step-down) tingkat tegangan. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan perangkat proteksi dan pengendali, seperti pemutus arus, saklar, dan relay proteksi yang berfungsi menjaga kestabilan dan keandalan sistem kelistrikan.

Setelah dihasilkan oleh generator, energi listrik mengalami peningkatan tegangan melalui transformator step-up untuk mengurangi arus pada saluran transmisi dan meminimalkan rugi daya. Ketika mencapai gardu induk yang berdekatan dengan pusat beban, tegangan diturunkan kembali oleh transformator step down sebelum dialirkan kepada konsumen. Saluran transmisi memiliki karakteristik listrik berupa resistansi, induktansi, dan kapasitansi yang tersebar di sepanjang lintasannya yang berpengaruh terhadap efisiensi serta keandalan proses penyaluran energi. Umumnya, sistem transmisi dirancang dalam bentuk jaringan interkoneksi untuk meningkatkan fleksibilitas pengiriman daya serta memperkuat keandalan sistem kelistrikan[14].

2.2.3 Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu bagian yang sangat vital dalam proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke konsumen, yang mana perannya sebagai penyambung antara jaringan tegangan tinggi dan jaringan tegangan menengah secara bersamaan disambungkan melalui busbar dan trafo tenaga[15], seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Gardu Induk

Gardu induk mempunyai beberapa fungsi, yaitu diantaranya adalah:

1. Menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah untuk disalurkan kepada konsumen
2. Tempat *monitoring*, manuver serta pengaturan beban sistem tenaga listrik untuk disalurkan ke distribusi.
3. Sebagai pemasok tegangan dan penerima tegangan untuk gardu induk lainnya yang berdekatan yang mana untuk mendukung sistem interkoneksi antar gardu induk satu dengan lainnya.

2.2.4 Komponen Gardu Induk

Gardu induk terdiri dari komponen – komponen sebagai berikut :

1. Transformator tenaga adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan dengan frekuensi dan daya yang sama.
2. Peralatan tegangan tinggi lainnya yaitu:

- a. *Lightning Arrester* (LA)
 - b. Pemutus Tenaga (PMT)
 - c. *Disconnecting Switch* (DS)
 - d. *Current Transformer* (CT)
 - e. *Potensial Transformer* (PT)
 - f. Busbar
3. Peralatan sekunder gardu induk, yang berfungsi untuk mengoperasikan dan *monitoring* gardu induk dari pusat kontrol yaitu terdiri dari : *relay* pengukuran, *relay* proteksi, panel kontrol, peralatan telekomunikasi, *scada*, *rectifier*, radio dan lainnya[16].

2.2.5 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi pada jaringan tenaga listrik memiliki peranan penting dalam menjaga keselamatan peralatan, instalasi, serta pengguna dari berbagai gangguan, seperti arus lebih, hubungan singkat, gangguan tanah, maupun lonjakan tegangan. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi secara cepat bagian yang mengalami gangguan dan segera mengisolasi secara selektif sehingga potensi kerusakan dapat diminimalkan dan penyebaran gangguan ke area lain dalam jaringan dapat dicegah.

Relai proteksi merupakan elemen utama dalam sistem proteksi tenaga listrik yang berperan dalam mendeteksi serta mengidentifikasi adanya gangguan. Agar dapat berfungsi secara optimal, relai ini harus memenuhi sejumlah kriteria keandalan (*reliability*) tertentu.

1. *Sensitivity* (sensivitas)

Kemampuan sistem proteksi untuk mengenali adanya ketidakwajaran atau gangguan yang terjadi di waktu yang berbeda dalam wilayah proteksi yang telah ditetapkan.

2. *Selectivity* (selektivitas)

Kapasitas sistem proteksi untuk memberikan respons secara cepat terhadap gangguan sesuai dengan waktu kerja yang telah dirancang berdasarkan koordinasi antar proteksi.

3. *Speed* (kecepatan)

Ketika terjadi gangguan, perangkat dalam sistem proteksi mampu merespons dengan cepat sesuai waktu yang telah ditentukan berdasarkan koordinasi proteksi yang ada.

4. *Security* (keamanan)

Kemampuan sistem proteksi dalam memastikan bahwa perangkat hanya aktif ketika gangguan benar-benar terjadi dan tetap tidak beroperasi saat sistem dalam keadaan normal.

Agar sistem proteksi dapat berfungsi dengan baik dalam mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan, terdapat beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain:

1. Perlengkapan sistem proteksi perlu mencakup jumlah pemutus tenaga listrik (PMT) yang mencukupi untuk menjamin proses isolasi gangguan dapat dilaksanakan secara optimal.
2. Setiap unit PMT harus didukung oleh perangkat pengendali yang memiliki kemampuan mendeteksi kondisi abnormal dan secara otomatis mengaktifkan pembukaan PMT untuk memisahkan segmen jaringan yang mengalami gangguan.

Sistem tenaga listrik harus dirancang dengan keberadaan beberapa pemutus tenaga (PMT) yang dikonfigurasi secara terkoordinasi guna memastikan prinsip selektivitas dapat diterapkan secara maksimal. Melalui pengaturan tersebut, apabila terjadi gangguan pada sistem, hanya PMT yang berada pada lokasi gangguan yang akan beroperasi atau terbuka. Mekanisme ini dikenal sebagai pemutusan gangguan selektif (selective fault clearance). Relai proteksi memanfaatkan parameter sistem seperti arus, tegangan, dan sudut fasa untuk membedakan antara kondisi operasi normal dan adanya gangguan di dalam wilayah proteksi yang menjadi tanggung jawabnya.

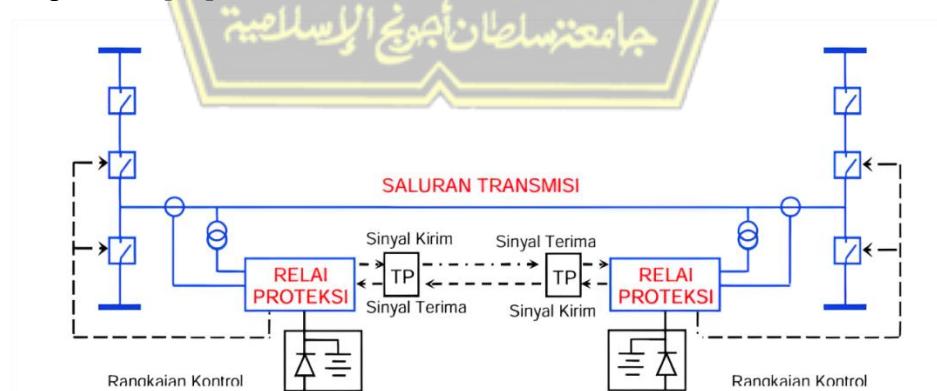
2.2.6 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Komponen utama sistem proteksi meliputi rele proteksi, pemutus sirkuit (*circuit breaker*), sekering (*fuse*), dan alat pengaman lainnya yang bekerja

secara otomatis maupun manual. Pemilihan dan penempatan peralatan proteksi dilakukan berdasarkan analisis sistem, tingkat keandalan yang diinginkan, serta kebutuhan operasional untuk menjaga stabilitas dan kontinuitas pasokan listrik[12].

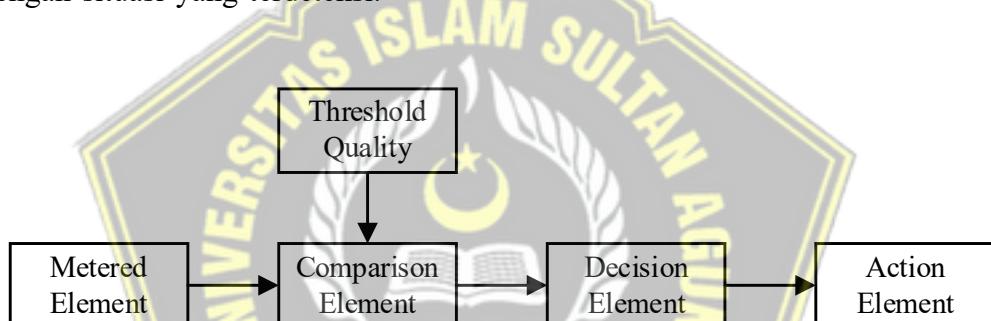
Perangkat proteksi sistem tenaga listrik secara umum adalah sebagai berikut:

1. Sistem proteksi merupakan suatu kesatuan dari berbagai perangkat proteksi yang tersusun secara lengkap, meliputi komponen utama dan komponen pendukung lainnya yang secara bersama-sama menjalankan fungsi pengamanan berdasarkan prinsip-prinsip kerja sistem proteksi.
2. Perangkat proteksi merupakan pada serangkaian alat yang digunakan untuk menunjang sistem proteksi, seperti fuse, relai, dan perangkat lainnya, dengan pengecualian perangkat seperti transformator arus, pemutus tenaga listrik (PMT), serta kontaktor.
3. Skema proteksi merupakan susunan dari berbagai perangkat proteksi yang bekerja secara terpadu untuk melindungi sistem kelistrikan, di mana keseluruhan komponen seperti relai, transformator arus dan tegangan, pemutus tenaga, sumber daya baterai, serta perangkat pendukung lainnya berfungsi secara bersama dalam satu sistem proteksi.[17].



Gambar 2. 3 Komponen Proteksi SUTT

Sistem proteksi dalam instalasi tenaga listrik terdiri dari beberapa komponen yang difungsikan untuk mengidentifikasi kondisi operasional sistem. Mekanisme kerja sistem ini didasarkan pada analisis parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, dan sudut fasa antara keduanya[18]. Parameter-parameter tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya dalam perangkat proteksi. Apabila nilai parameter yang terukur melebihi batas yang telah ditetapkan, maka sistem proteksi akan secara otomatis merespons dalam menjaga kestabilan dan keamanan sistem. Komponen-komponen proteksi ini dirancang secara khusus untuk memantau kondisi sistem secara terus-menerus dan menjalankan tindakan korektif sesuai dengan situasi yang terdeteksi.



Gambar 2.4 Elemen-elemen Sistem Proteksi

Waktu pemutus gangguan, atau juga dikenal sebagai *Fault Clearing Time*, adalah jumlah waktu yang dibutuhkan peralatan perlindungan sampai pemutus tenaga terbuka.

Persamaan 2. 1 Clearing Time

Keterangan:

T_c = clearing time

T_p = comparison time

T_d = decision time

T_a = action time, including circuit breaker operating time

Waktu pemutusan gangguan merupakan faktor krusial dalam merancang skema sistem proteksi. Hal ini disebabkan oleh perlunya koordinasi waktu antar perangkat proteksi sehingga hanya perangkat yang paling dekat dengan sumber gangguan yang akan bekerja dengan cepat sesuai prinsip selektivitas.

2.2.7 Tujuan Sistem Proteksi

Sistem proteksi memiliki tujuan untuk mendekripsi gangguan, memisahkan bagian instalasi yang terganggu dari bagian lain yang masih beroperasi normal, serta melindungi instalasi agar terhindar dari kerusakan maupun kerugian yang lebih besar. Selain itu, sistem ini menyampaikan informasi atau sinyal terjadinya gangguan yang umumnya diikuti oleh tindakan pembukaan pemutus tenaga (PMT).

2.2.8 Potential Transformer (Trafo Tegangan)

Sistem tenaga listrik memiliki berbagai jenis tipe dan konstruksi trafo yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasinya. Dalam penerapan peralatan sistem proteksi, khususnya untuk relai, trafo yang digunakan untuk mengukur parameter sistem (seperti tegangan dan arus) dapat menurunkan besaran tersebut ke level yang lebih rendah sebagai *input* bagi pengukur relai. Trafo tegangan ini dikenal dengan nama *instrument transformer*, yang terdiri dari trafo arus (*current transformer*) dan trafo tegangan (*voltage atau potential transformer*).

Transformator tegangan merupakan salah satu komponen penting dalam sistem proteksi. Transformator tegangan berperan sebagai masukan (input) bagi relai dengan prinsip kerja yang menyerupai transformator daya. Penggunaan transformator ini telah meluas dalam sistem kelistrikan. Perbedaan utamanya terletak pada besarnya daya yang sangat rendah dengan tegangan tinggi di sisi primer dan tegangan rendah di sisi sekunder, biasanya berkisar antara 100 hingga 120 V rms. Transformator tegangan ini berfungsi untuk menyediakan sinyal tegangan sebagai representasi dari sistem yang akan dianalisis oleh perangkat proteksi. Selain itu, untuk memastikan hasil pengukuran mendekati

tegangan sistem yang sebenarnya, trafo tegangan harus memiliki tingkat akurasi yang tinggi. *Potential transformer* memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Menurunkan tegangan sistem tenaga listrik supaya digunakan dalam pengukuran dan sistem proteksi
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer



Gambar 2. 5 Trafo Tegangan (Potential Transformer)

2.2.9 Current Transformer (Trafo Arus)

Sistem menggunakan trafo arus untuk memperoleh nilai arus besar yang optimal bagi perangkat kontrol, relai proteksi, dan komponen instrumen lainnya. Trafo arus mengambil sampel arus dari sistem tenaga listrik kemudian mengubahnya ke tingkat arus yang lebih rendah agar sesuai digunakan oleh alat proteksi, instrumen pengukuran, atau sistem kendali. Fungsi utama trafo arus meliputi:

1. Menurunkan arus listrik besar dari sistem tenaga menjadi arus yang sesuai untuk sistem pengukuran dan proteksi.
2. Memberikan isolasi antara rangkaian primer dan sekunder, sehingga instalasi pengukuran dan proteksi terpisah dari sistem tegangan tinggi.

Penentuan rating pada trafo arus dilakukan berdasarkan perbandingan antara arus sisi primer dan sisi sekunder. Beberapa rasio yang umum digunakan dalam aplikasi kelistrikan meliputi 600:5, 800:5, 1000:5, serta 1600:1 ampere. Nilai arus sekunder sebesar 5 ampere atau 1 ampere biasanya dijadikan sebagai standar dalam menentukan spesifikasi trafo arus. Arus sekunder yang dihasilkan oleh current transformer ini kemudian digunakan sebagai input oleh perangkat proteksi seperti relai arus lebih, relai diferensial, relai jarak, dan jenis relai proteksi lainnya.

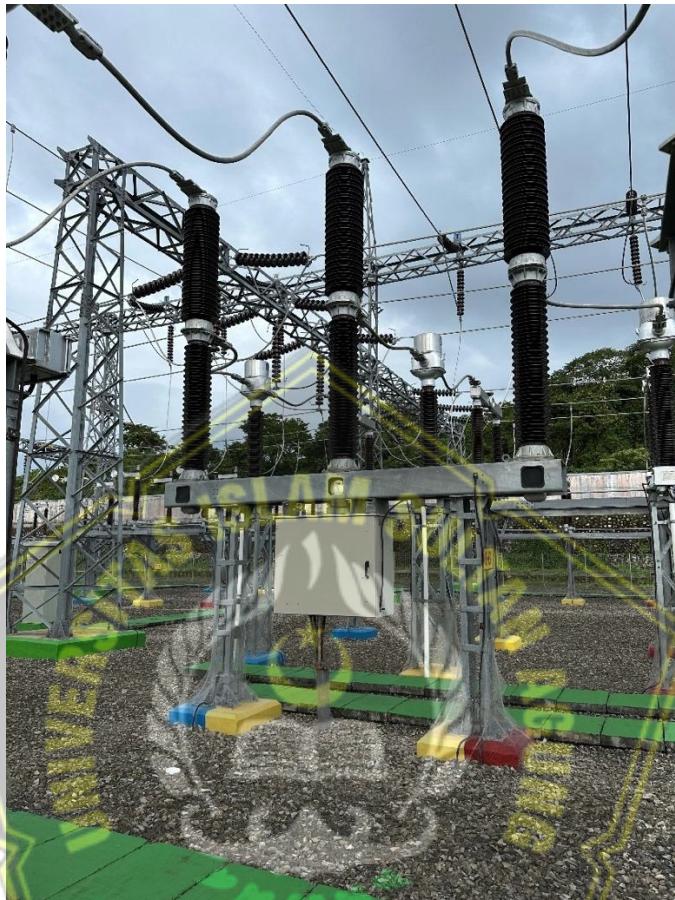


Gambar 2. 6 Trafo Arus (Current Transformer)

2.2.10 Circuit Breaker (Pemutus Tenaga)

Pemutus tenaga (PMT) adalah alat yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan aliran listrik sesuai dengan kapasitas dayanya. Alat ini memiliki kemampuan untuk menghentikan aliran listrik yang terganggu, seperti akibat hubungan singkat atau kelebihan beban pada tegangan tinggi, dalam waktu yang sangat cepat. Dalam membuka sambungan utama, dibutuhkan energi mekanis yang umumnya dihasilkan dari tekanan pegas, tekanan udara, atau kombinasi dari keduanya. Ketika PMT melakukan proses penyambungan atau pemutusan arus kemudian akan muncul busur listrik. Untuk menghilangkan

busur tersebut, digunakan media pemadam seperti gas, udara tekan, atau cairan isolasi seperti minyak, tergantung pada jenis circuit breaker yang digunakan.



Gambar 2.7 Pemutus Tenaga (Circuit Breaker)

جامعة السلطان قابوسي الإسلامية

2.2.11 Relai Proteksi

Relai berfungsi sebagai perangkat pendeteksi yang merespons parameter sistem tenaga listrik saat terjadi kondisi abnormal. Perangkat ini akan menutup kontaknya apabila mendeteksi gangguan sehingga rangkaian mengaktifkan pemutus tenaga (PMT) untuk membuka kontak pemutus dan mengisolasi bagian sistem yang terganggu. Pengelompokan relai proteksi dapat dilakukan berdasarkan fungsi atau tujuannya dalam sistem proteksi. Berikut adalah klasifikasi relai berdasarkan fungsi atau kegunaan:

1. Relai Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Jenis relai ini akan aktif apabila arus listrik yang mengalir melebihi ambang batas yang telah ditetapkan sebelumnya.

2. Relai Diferensial

Relai ini dirancang untuk membandingkan arus yang masuk dan keluar dari suatu area proteksi.

3. Relai Arah (*Directional Relay*)

Fungsi utama relai ini adalah untuk menentukan arah aliran gangguan dengan membandingkan antara fase arus dan fase tegangan.

4. Relai Jarak (*Jarak Relay*)

Relai ini bekerja berdasarkan pengukuran impedansi dari titik gangguan yang digunakan untuk proteksi pada saluran transmisi tegangan tinggi.

5. *Gorund Fault Relay*

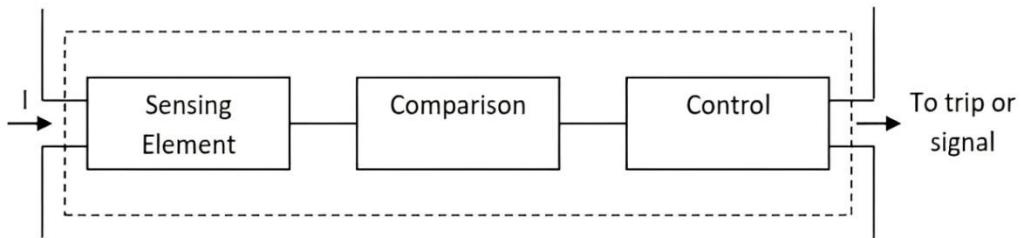
Relai ini digunakan untuk mengidentifikasi gangguan hubung singkat ke tanah dengan cara mengukur arus sisa atau arus netral yang mengalir ke tanah.

2.2.12 Prinsip Dasar Relai

Relai umumnya dapat dibagi menjadi tiga elemen dasar seperti yang dijelaskan dalam gambar 2.8 [19].

1. Elemen perasa: Elemen ini berfungsi untuk mendeteksi adanya perubahan dalam besaran listrik, seperti perubahan arus atau tegangan pada sistem.
2. Elemen pembanding: Tugas dari elemen ini adalah membandingkan besaran yang terukur dengan besaran yang sudah diatur sebelumnya sebagai referensi.
3. Elemen pengontrol: Elemen ini bertugas untuk mengirimkan sinyal atau mengontrol rangkaian lainnya, misalnya dengan menutup sakelar suatu rangkaian.

Berikut ini ditunjukkan bentuk paling sederhana dari sebuah relai arus elektromagnetik yang dirancang untuk merespons besaran arus yang mengalir dalam rangkaian yang dikendalikan.



Gambar 2. 8 Elemen Dasar Relai

Suatu rangkaian listrik umumnya terdiri atas tiga komponen utama. Arus I mengalir ke relai, sementara sumber arus searah (DC) menyediakan energi bagi rangkaian pen-trip. Nilai arus ini dijaga agar tidak melebihi ambang batas tertentu. Apabila batas tersebut terlampaui, circuit breaker (CB) akan secara otomatis memutus sambungan jaringan, mengaktifkan alarm melalui sinyal impuls, atau memberikan indikasi bahwa terjadi arus berlebih dalam sistem. Keberadaan relai dalam rangkaian menjadi hal yang penting dalam menjamin proses kerja sistem berlangsung dengan tepat.

2.2.13 Relai Jarak (Jarak Relay)

Sistem proteksi pada saluran udara tegangan tinggi sering memanfaatkan relai jarak sebagai proteksi utama maupun cadangan untuk saluran transmisi yang berdekatan. Pemilihan ini didasari oleh hubungan linier antara impedansi saluran dan panjang saluran transmisi yang memungkinkan penentuan lokasi gangguan melalui pengukuran impedansi[20]. Prinsip kerja relai jarak didasarkan pada perbandingan antara tegangan dan arus gangguan yang terukur di titik pemasangan, menghasilkan nilai impedansi semu (*apparent impedance*). Berdasarkan nilai ini, relai menentukan apakah gangguan terjadi di dalam atau di luar zona proteksi. Relai akan aktif ketika gangguan berada dalam batas jangkauan (reach setting) yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain mendeteksi gangguan antar fasa (*phase fault*), relai ini juga mampu mengidentifikasi gangguan ke tanah (*ground fault*).

2.2.14 Prinsip Kerja Relai Jarak

Relai jarak bekerja dengan cara mengukur tegangan dan arus gangguan yang terdeteksi di titik pemasangan relai. Dengan membagi nilai tegangan terhadap arus tersebut, maka dapat diperoleh nilai impedansi sampai ke titik terjadinya gangguan. Nilai impedansi ini menjadi acuan untuk menentukan apakah gangguan berada dalam area proteksi relai[21]. Perhitungan impedansi dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

Persamaan 2. 2 Impedansi (Ohm)

Keterangan :

Zf = Impedansi (Ohm)

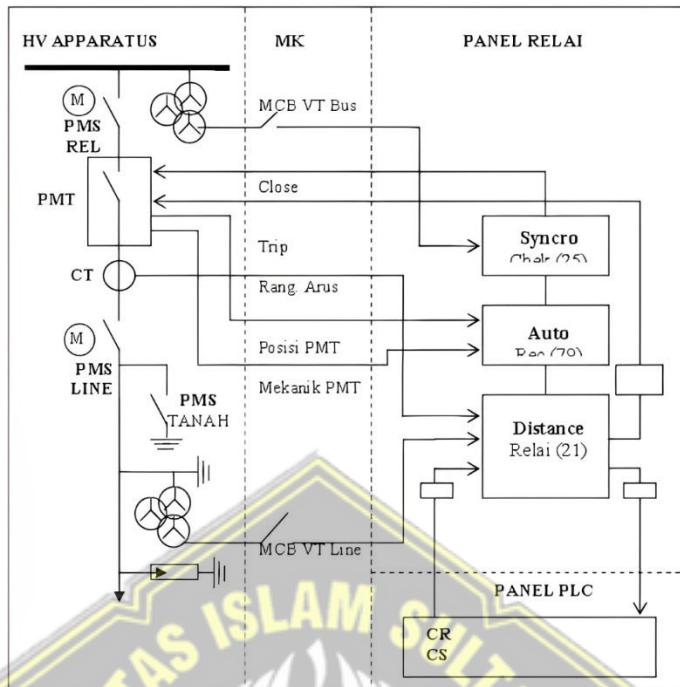
Vf = Tegangan (Volt)

If = Arus Tegangan (Ampere)

Relai jarak beroperasi dengan membandingkan impedansi gangguan yang terukur dengan nilai impedansi *setting* yang telah ditentukan sebelumnya. Prinsip kerjanya sebagai berikut:

1. Jika impedansi gangguan (Z_f) lebih kecil dari impedansi *setting* relai (Z_R), yaitu $Z_f < Z_R$, maka relai akan bekerja, karena gangguan dianggap berada dalam zona proteksi.
 2. Sebaliknya, jika $Z_f > Z_R$, artinya impedansi gangguan lebih besar dari *setting* relai, maka relai tidak akan bekerja, karena gangguan dianggap berada di luar zona proteksi.

Dengan prinsip ini, relay jarak dapat mendekripsi gangguan secara selektif dan hanya merespons gangguan yang berada dalam jangkauan proteksi yang telah ditetapkan.



Gambar 2. 9 Diagram Blok Rele Jarak (Jarak Relay)

Relai jarak memperoleh input dari transformator arus (CT) dan transformator tegangan (VT) yang berfungsi menyediakan data arus serta tegangan dari penghantar. Nilai arus dan tegangan tersebut diolah oleh relai menjadi nilai impedansi. Ketika terjadi gangguan dalam sistem, impedansi yang terukur oleh relai akan mengalami perubahan. Apabila nilai impedansi yang terdeteksi lebih rendah dari batas pengaturan yang telah ditentukan, maka relai akan diaktifkan untuk mengirimkan perintah trip kepada pemutus tenaga (PMT) kemudian memutus aliran listrik dan menjaga keamanan sistem[22].

2.2.15 Pengaturan Relai Jarak

Dalam pengaturan relai jarak, terdapat beberapa aspek penting yang harus dikoordinasikan untuk memastikan sistem proteksi bekerja secara efektif dan selektif. Berikut adalah hal-hal yang perlu diperhatikan dalam koordinasi relai jarak:

1. Koordinasi antar relai pada satu saluran.

Relai-relai yang berada dalam satu saluran transmisi harus dikonfigurasi sedemikian rupa agar dapat bekerja secara sinkron. Jika terjadi gangguan di salah satu titik saluran, maka relai pada lokasi tersebut harus dapat merespons secara langsung (*instantaneous*), dan relai lain dalam sistem yang sama akan merespons sesuai dengan zona dan waktu tunda yang telah disesuaikan, guna mencegah pemutusan yang tidak perlu di bagian lain sistem.

2. Koordinasi relai dengan relai pada seksi saluran berikutnya.

Pengaturan juga harus memperhatikan relai pada seksi saluran yang terhubung di hilir atau zona selanjutnya. Koordinasi ini bertujuan untuk menghindari tumpang tindih proteksi (*overlapping*) antara zona yang diproteksi oleh masing-masing relai. Dengan demikian, hanya relai yang berada dalam zona gangguan yang akan bekerja, sementara relai lainnya akan menunggu sesuai waktu tunda atau tidak bekerja sama sekali bila gangguan berada di luar zonanya.

2.2.16 Zona Proteksi Relai Jarak

Relai jarak dapat berfungsi sebagai pengaman utama maupun pengaman cadangan (*remote back-up protection*) untuk saluran udara tegangan tinggi, terutama yang memiliki jarak relatif berdekatan. Pembagian kerja relai ini umumnya disusun dalam tiga zona yang saling terkoordinasi, guna menghindari terjadinya *overlapping* antara zona proteksi satu dengan lainnya, khususnya dengan seksi saluran udara tegangan tinggi di bagian berikutnya.

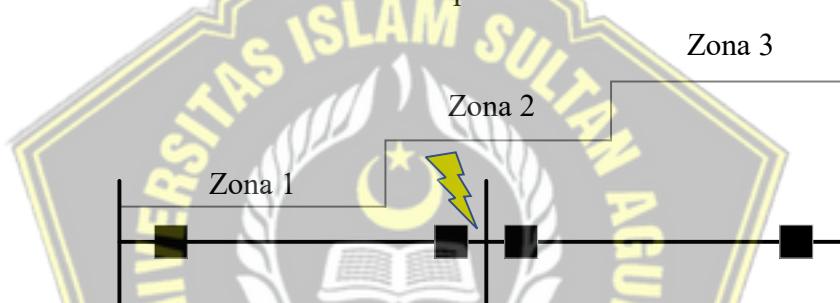
Atas dasar tersebut, pemilihan zona pengaman pada relai jarak diaplikasikan dengan mempertimbangkan hal-hal berikut:

1. Zona 1

Zona satu pada relai jarak dirancang untuk menjangkau sejauh mungkin bagian dari saluran udara tegangan tinggi (SUTT) yang ingin diproteksi, namun tidak boleh melebihi batas jaringan transmisi berikutnya. Umumnya, jangkauan zona satu diatur sebesar 80% dari total

impedansi saluran yang diproteksi. Sisanya, yaitu 20% dari panjang saluran, disisakan sebagai margin pengaman untuk memastikan bahwa zona satu tidak secara tidak sengaja melindungi bagian dari saluran transmisi yang berada di luar tanggung jawab proteksinya.

Pentingnya batas ini adalah untuk menghindari terjadinya *over-reaching*, yaitu kondisi di mana relai mendeteksi gangguan di luar zona proteksi yang seharusnya. *Over-reaching* bisa terjadi akibat kesalahan pengukuran pada trafo arus (CT), trafo tegangan (VT), atau karena data parameter saluran yang tidak akurat. Maka dari itu, pengaturan jangkauan zona satu harus dilakukan secara cermat untuk menjamin keandalan dan selektivitas sistem proteksi.



Gambar 2. 10 Pengaturan Zona Proteksi Relai Jarak

Persamaan 2, 3 Zone 1

مِنْ أَنْوَافِ الْإِسْلَامِ : كَرْتُون

Z_{LI} = Impedansi jaringan transmisi yang telah diamankan

2. Zona 2

Zona 2 pada sistem proteksi relai jarak berfungsi untuk melindungi bagian saluran udara tegangan tinggi (SUTT) yang tidak terjangkau oleh zona 1. Jangkauan zona ini harus dirancang sedemikian rupa agar tidak terjadi tumpang tindih (*overlapping*) dengan zona 2 pada seksi saluran berikutnya. Pengaturan waktu tunda (*time delay*) menjadi komponen penting dalam koordinasi antar relai, khususnya untuk menjamin selektivitas proteksi. Penundaan ini dimaksudkan agar relai tidak segera melakukan trip saat gangguan terjadi di luar zona proteksi

yang telah ditentukan. Dengan mempertimbangkan potensi kesalahan pada pengukuran, seperti kesalahan pada trafo arus (CT) atau trafo tegangan (PT) sebagaimana dapat terjadi pada zona 1, maka pengaturan zona 2 harus mencakup batas minimal dan maksimal impedansi secara presisi untuk menjamin keandalan sistem proteksi secara keseluruhan.

Persamaan 2. 4 Zone 2 Min

Persamaan 2. 5 Zone 2 Max

Keterangan :

Z_{LI} = Impedansi jaringan transmisi yang telah diamankan

Z_{L2} = Impedansi jaringan transmisi seksi selanjutnya dengan jarak terdekat

K = Faktor *Infeed*

Dalam sistem proteksi saluran udara tegangan tinggi (SUTT), apabila pada seksi saluran berikutnya terdapat percabangan, maka diperlukan pengaturan zona 2 yang presisi guna menjaga selektivitas proteksi secara optimal. Untuk mencapai hal tersebut, jangkauan maksimum zona 2 sebaiknya ditentukan berdasarkan impedansi saluran terpendek pada seksi selanjutnya (Z_{L2}). Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa jangkauan zona 2 tidak melebihi jangkauan minimum zona 2 dari saluran yang berada di depan, sehingga tidak terjadi *overlap* dalam area proteksi.

Selain itu, apabila pada gardu induk (GI) yang terletak di depan terdapat trafo daya, maka batas jangkauan zona 2 idealnya tidak melebihi impedansi dari trafo tersebut. Hal ini penting, karena apabila terjadi gangguan pada sisi tegangan menengah atau rendah dari transformator, relai pada sisi tegangan tinggi tidak akan merespons gangguan tersebut. Dengan kata lain, relai harus dibatasi agar hanya mendeteksi gangguan yang benar-benar berada dalam area tanggung

jawab proteksinya, guna menjaga keandalan dan selektivitas sistem secara menyeluruh.

Persamaan 2. 6 Ztr Zone 2

Keterangan:

K = trafo proteksi, nilai K direkomendasi sebesar 0.5

3. Zona 3

Zona 3 pada sistem relai jarak berperan sebagai proteksi cadangan untuk saluran udara tegangan tinggi (SUTT) pada seksi berikutnya. Oleh karena itu, zona ini dikonfigurasi sedemikian rupa agar mampu mencakup seluruh panjang saluran SUTT pada seksi selanjutnya yang memiliki jarak terpanjang (Z_{L3}). Dengan pengaturan ini, zona 3 dapat memberikan perlindungan yang andal apabila proteksi utama dan zona 2 gagal berfungsi. Pengaturan jangkauan pada zona 3 umumnya dilakukan dengan mempertimbangkan impedansi total dari saluran cadangan yang dimaksud, disertai penyesuaian waktu tunda (*time delay*) yang sesuai, agar koordinasi antar proteksi tetap terjaga dan tidak mengganggu selektivitas sistem secara keseluruhan.

Persamaan 2. 7 Zone 3 Min

Persamaan 2.8 Zone 3 Max

$$Zone - 3_{\max} = 0.8(Z_{I1} + k_z Z_{I3}) \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

Z_{ll} = Impedansi jaringan transmisi yang telah diamankan

Z_{L3} = Impedansi jaringan transmisi seksi selanjutnya yang paling panjang

$K = Factor\ Infeed[12]$

Penentuan jangkauan zona 3 dilakukan dengan memilih nilai tertinggi antara batas minimum dan maksimum impedansi yang telah

ditentukan untuk zona ini. Dalam konteks gardu induk (GI) yang memiliki trafo daya di sisi hilir, penting untuk memastikan bahwa jangkauan zona 3 tidak melebihi impedansi dari trafo tersebut. Hal ini bertujuan agar relai tidak merespons gangguan yang terjadi di sisi tegangan rendah yang berada di luar cakupan proteksinya.

Apabila dalam penerapannya terjadi kondisi di mana jangkauan zona 3 tumpang tindih (overlapping) dengan zona 3 dari seksi saluran berikutnya, maka hal ini masih dapat ditoleransi, asalkan pengaturan waktu tunda (*time delay*) pada zona 3 diatur secara terkoordinasi. Sinkronisasi waktu ini memungkinkan sistem tetap mempertahankan selektivitas proteksi, dengan memberi prioritas kepada relai yang berada paling dekat dengan lokasi gangguan untuk merespons terlebih dahulu.

Persamaan 2.9 Ztr Zone 3

Keterangan:

$K = \text{bagian trafo yang proteksi, nilai } K \text{ direkomendasi sebesar } 0.8$

2.2.17 Batas Toleransi Impedansi Zona Relai Jarak

Margin keamanan pada impedansi zona relai jarak merupakan toleransi yang diberikan dalam pengaturan relai untuk mencegah terjadinya trip atau pemutusan yang tidak semestinya (*misoperation*). Tujuan utamanya adalah menghindari kesalahan deteksi maupun gangguan palsu yang dapat menimbulkan kerusakan pada sistem, sekaligus tetap menjamin perlindungan efektif terhadap gangguan yang benar-benar terjadi [23].

Berdasarkan Modul Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa–Bali (2013), margin keamanan relai jarak ditetapkan sebesar 20% dengan mempertimbangkan potensi kesalahan pada data konstanta saluran, CT, PT, maupun peralatan lain. Oleh karena itu, pengaturan zona 1 ditetapkan sebesar 80% dari panjang saluran yang dilindungi, sedangkan pada zona 2 dan zona 3 nilai impedansi disesuaikan dengan faktor koreksi sebesar 0,8 [24].

2.2.18 Ratio Trafo Arus (CT) dan Trafo Tegangan (VT)

Dalam perhitungan setting relai jarak, rasio CT dan PT digunakan untuk mengkonversi impedansi saluran aktual (dalam satuan ohm primer) menjadi impedansi yang terbaca di sisi relai (satuan ohm sekunder). Dengan demikian, kombinasi rasio CT dan PT akan memengaruhi akurasi pengaturan zona proteksi relai jarak agar sesuai dengan panjang saluran yang diamankan. Rasio CT dan PT dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

Persamaan 2. 10 Rasio CT dan PT

Keterangan :

n : Rasio CT dan VT

CT_P : Ratio CT Primer

CTs : Rasio CT Sekunder

VT_P : Rasio VT Primer

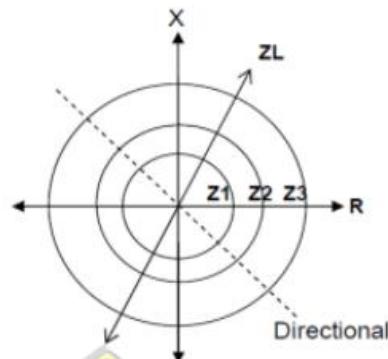
2.2.19 Karakteristik Relai Jarak Ditinjau dari Prinsip Kerjanya

1. Impedansi

Relai jarak jenis impedansi merupakan tipe relai jarak yang karakteristik kerjanya ditunjukkan dalam bentuk lingkaran impedansi pada bidang koordinat (R-X diagram)[17]. Lingkaran tersebut memiliki pusat di titik nol (origin) dengan jari-jari tertentu yang mewakili besar impedansi setting relai. Karena lingkaran tersebut tidak memperhitungkan arah aliran daya, maka relai ini disebut non-directional. Artinya, relai akan memberikan respon terhadap gangguan baik yang terjadi di depan maupun di belakang lokasi relai, selama nilai impedansi gangguan berada di dalam lingkaran kerjanya.

Kelemahan utama dari relai jenis impedansi adalah kurang selektifnya proteksi karena tidak dapat membedakan arah gangguan. Oleh sebab itu, dalam sistem transmisi modern relai impedansi biasanya

dikombinasikan dengan elemen arah (*directional element*) agar dapat bekerja lebih selektif sesuai arah gangguan yang diinginkan.

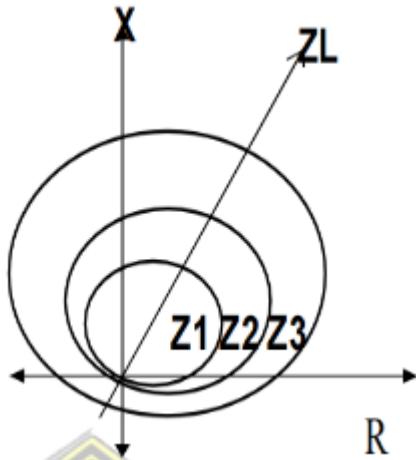


Gambar 2. 11 Karakteristik Relai Impedansi dengan Diagram R – X

2. *Mho*

Relai jarak jenis *Mho* adalah salah satu jenis relai jarak yang memiliki karakteristik kerja berbentuk lingkaran pada diagram R–X yang melalui titik pusat (*origin*). Berbeda dengan relai impedansi murni yang bersifat non-directional, relai *Mho* secara alami sudah memiliki sifat berarah (*directional*). Hal ini berarti relai hanya akan bekerja apabila gangguan terjadi pada arah yang sesuai dengan pengaturan, sehingga tidak diperlukan tambahan elemen arah (*directional relay*).

Keunggulan utama relai *Mho* adalah sensitivitasnya yang baik terhadap gangguan dengan faktor daya rendah, sehingga banyak digunakan pada sistem transmisi jarak jauh. Namun, bentuk karakternya yang melingkar kadang kurang optimal untuk mengakomodasi variasi impedansi saluran, sehingga dalam praktiknya sering dikombinasikan dengan jenis karakteristik lain untuk meningkatkan keandalan proteksi.



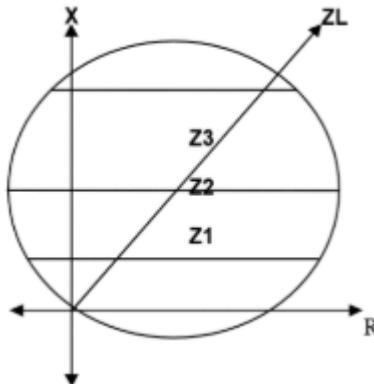
Gambar 2. 12 Karakteristik Relai Mho

3. Reaktansi

Relai jarak jenis reaktansi adalah relai yang karakteristik kerjanya ditunjukkan dalam bentuk garis lurus sejajar dengan sumbu resistansi (R) pada diagram R-X. Relai ini hanya mempertimbangkan komponen reaktansi (X) dari impedansi saluran dan mengabaikan pengaruh resistansi.

Karena bekerja tanpa memperhatikan arah aliran daya, relai reaktansi bersifat non-directional. Oleh karena itu, dalam aplikasi pada SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi), relai ini perlu dilengkapi dengan elemen arah (*directional relay*) agar dapat membedakan lokasi gangguan yang terjadi di depan atau di belakang titik pemasangan relai.

Keunggulan relai reaktansi adalah kemampuannya dalam mendeteksi gangguan hubung singkat dengan resistansi busur api (*arc resistance*) yang tinggi, sehingga lebih andal pada saluran udara terbuka. Namun, kelemahannya adalah sensitivitas yang rendah terhadap gangguan resistif murni dan sifatnya yang tidak selektif tanpa bantuan relai arah.



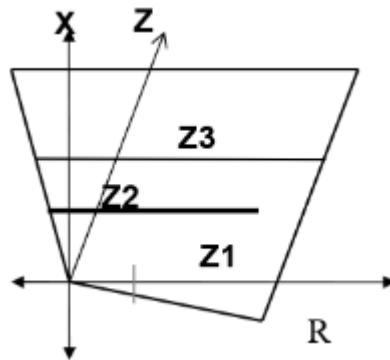
Gambar 2. 13 Karakteristik Relai Jarak Jenis Reaktansi

4. Quadrilateral

Relai jarak jenis quadrilateral merupakan relai dengan karakteristik kerja berbentuk empat sisi (quadrilateral) pada bidang impedansi ($R-X$). Karakteristik ini merupakan kombinasi dari tiga elemen penting, yaitu reaktansi (X), resistansi (R), dan arah (directional).

Keunggulan utama relai quadrilateral adalah fleksibilitasnya dalam mengantisipasi gangguan tanah dengan tahanan tinggi (high resistance ground fault). Hal ini dimungkinkan karena setting jangkauan resistif dapat dibuat cukup besar, sehingga relai tetap mampu mendeteksi gangguan meskipun nilai tahanannya tinggi.

Dalam praktiknya, relai quadrilateral banyak digunakan pada saluran transmisi untuk menghadapi gangguan dengan nilai resistansi besar yang umumnya tidak dapat ditangani secara efektif oleh relai impedansi atau relai Mho. Dengan kata lain, relai ini memberikan tingkat keandalan proteksi yang lebih tinggi, khususnya pada kondisi sistem dengan kemungkinan gangguan tanah resistif yang signifikan.



Gambar 2. 14 Karakteristik Relai Jarak Jenis Quadrilateral

2.2.20 Pola Pengamanan Teleproteksi Relai Jarak

Dalam upaya meningkatkan koordinasi waktu dalam sistem proteksi saluran transmisi, diperlukan perangkat yang mampu mengirim dan menerima sinyal antar relai di berbagai gardu induk (GI). Perangkat ini dikenal sebagai *teleproteksi*, yang berfungsi untuk mengirimkan dan menerima sinyal data atau status logika dari satu relai ke relai lainnya. Mengingat jarak antara satu GI dengan GI lainnya cukup jauh, maka dibutuhkan media komunikasi yang andal untuk mengirimkan sinyal tersebut. Saluran komunikasi yang umum digunakan meliputi kabel serat optik (*fiber optic*), gelombang mikro (*microwave*), dan komunikasi melalui saluran listrik (*Power Line Communication/PLC*)[25].

Dasar pemilihan pola pengamanan dengan menggunakan teleproteksi adalah untuk meningkatkan keandalan sistem. Jika terjadi gangguan di luar zona 1 relai, tetapi masih berada pada bagian saluran yang telah diamankan (ujung jaringan transmisi), relai jarak yang dilengkapi dengan teleproteksi akan berfungsi lebih cepat dibandingkan relai jarak yang tidak dilengkapi teleproteksi. Penggunaan teleproteksi pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT) memberikan beberapa keuntungan, di antaranya:

- Meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik secara keseluruhan.
- Memungkinkan penerapan fungsi s yang dapat mempercepat pemulihan saluran transmisi, sehingga mengurangi risiko terjadinya pemadaman listrik.

- c. Mengurangi potensi kerusakan pada material konduktor akibat gangguan yang berlangsung terlalu lama.

1. *Permissive Underreach Transfer Trip Scheme (PUTT)*

Pada skema proteksi ini, peralatan teleproteksi akan mengirimkan sinyal (*carrier send*) ke perangkat teleproteksi pada gardu induk di hulu begitu relai jarak mendeteksi gangguan di zona 1. Pada gardu induk penerima (*carrier receive*), saat relai jarak mendeteksi gangguan di zona 2 dan sinyal teleproteksi tiba, relai tersebut segera mengeluarkan perintah trip untuk isolasi pada zona 1.

2. *Permissive Overreach Transfer Trip Scheme (POTT)*

Pada skema ini, begitu teleproteksi mendeteksi gangguan di zona 2, perangkat akan mengirimkan sinyal (*carrier send*) ke teleproteksi di gardu induk hulu. Setelah gardu induk penerima menerima sinyal (*carrier receive*) dan relai jarak juga mendeteksi gangguan di zona 2, relai secara otomatis mengeluarkan perintah trip pada zona 1.

3. *Blocking Scheme*

Pada skema ini, perangkat teleproteksi akan mengirimkan sinyal ke perangkat teleproteksi di gardu induk hulu setiap kali relai jarak mendeteksi gangguan di (*reverse-zone*). Setelah gardu induk hulu menerima sinyal tersebut, apabila relai jarak pada sisi hilir kemudian mendeteksi gangguan di (*forward-zone*) (zona 2), relai akan mengeluarkan perintah blok (*blocking*). Sebaliknya, jika relai mendeteksi gangguan di *forward-zone* tanpa terlebih dahulu menerima sinyal teleproteksi, maka relai akan segera melakukan trip secara instan.

2.2.21 Konstruksi Relai Jarak

Prinsip kerja dasar relai jarak adalah sebagai alat ukur impedansi atau pembanding antara arus dan tegangan. Namun, praktiknya, perancangan relai jenis ini memerlukan perhatian terhadap berbagai parameter pengukuran serta kondisi gangguan yang mungkin terjadi. Oleh sebab itu, proses perancangan relai jarak menjadi kompleks dan tidak dapat dilakukan secara sederhana.

Berikut adalah sejumlah faktor penting yang harus diperhatikan dalam merancang konstruksi relai jarak:

1. Gangguan yang menyebabkan tegangan sangat rendah, sehingga relai kesulitan dalam menentukan lokasi gangguan.
2. Variasi impedansi gangguan atau *loop fault impedance* yang harus diukur secara akurat.
3. Beragam jenis gangguan yang dapat terjadi pada sistem tenaga.
4. Nilai tahanan gangguan yang tidak konstan dan dapat bervariasi secara signifikan.
5. Ketidaksimetri impiedansi pada saluran transmisi akibat perbedaan jenis dan ukuran kawat konduktor.
6. Konfigurasi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) yang bervariasi, seperti sistem satu sirkuit, dua sirkuit, maupun sistem dengan banyak terminal.

Secara umum, relai jarak dirancang dengan dilengkapi berbagai elemen pengukuran impedansi dan sistem logika yang kompleks, termasuk algoritma perhitungan dan unit inisiasi (*unit starting*), untuk menjamin tingkat akurasi serta keandalan yang tinggi dalam pengoperasiannya. Dalam praktiknya, tersedia berbagai jenis relai jarak dengan waktu respons yang bervariasi. Pemilihannya tidak hanya didasarkan pada biaya, namun juga mempertimbangkan perangkat lunak, perangkat keras, dan kapasitas relai sesuai kebutuhan sistem proteksi.

Beberapa jenis relai jarak yang umum digunakan antara lain:

1. Relai dengan elemen pengukuran tunggal per fase

Tipe ini dilengkapi elemen pengukuran individual pada masing-masing fasa, sehingga mampu mendeteksi gangguan pada seluruh fasa secara menyeluruh.

2. *Switched Jarak Relay*

Sistem ini biasanya dilengkapi dengan perangkat kontrol yang dapat mengaktifkan elemen pengasutan (*starter*), untuk mendeteksi fasa yang terganggu. Elemen starter akan memicu aktivasi elemen pengukuran tunggal maupun modul algoritma impedansi gangguan yang paling

sesuai. Sistem ini disebut *switched jarak relay* karena pengukuran dilakukan secara selektif berdasarkan jenis gangguan.

3. *Reach-Stepped Jarak Relay*

Jenis ini memiliki elemen pengukuran impedansi yang tersusun secara bertingkat untuk masing-masing zona, di mana pengaturannya dapat meningkat secara progresif dari satu zona ke zona lainnya. Zona-zona ini dilengkapi *timer* yang dikendalikan secara otomatis oleh elemen starter.

4. *Full Jarak Scheme*

Setiap zona gangguan memiliki elemen pengukuran independen yang dapat digunakan untuk setiap sirkuit lingkar impedansi gangguan. Skema ini menawarkan performa tinggi dan fleksibilitas maksimal, terutama dalam hal kecepatan operasi dan kemampuan mendeteksi gangguan secara presisi.

Penggunaan masing-masing jenis relai jarak disesuaikan dengan konfigurasi sistem tenaga listrik dan kebutuhan proteksi yang spesifik, untuk memastikan bahwa sistem dapat tetap stabil dan andal dalam berbagai kondisi gangguan.

Jenis gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik sangat beragam, sehingga memerlukan karakteristik dan pengaturan proteksi yang berbeda-beda. Dalam praktiknya, setiap tipe gangguan harus ditangani secara khusus dan dipisahkan penanganannya dari jenis gangguan lainnya. Secara prinsip, relai jarak konvensional umumnya dirancang memiliki tiga zona proteksi, yang masing-masing dapat merespons terhadap berbagai bentuk gangguan. Untuk dapat melaksanakan fungsi tersebut secara efektif, relai jarak memerlukan lebih dari satu unit pendekripsi serta sejumlah elemen pengukur impedansi guna menjangkau seluruh kemungkinan gangguan yang dapat terjadi.

2.2.22 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan merupakan kondisi yang menyimpang dari keadaan normal dalam suatu sistem. Dalam konteks sistem tenaga listrik, gangguan adalah peristiwa yang menyebabkan relai dan pemutus tenaga bekerja secara otomatis

tanpa intervensi langsung dari operator, sehingga memutus aliran daya yang melewati pemutus tersebut. Pada bagian sistem yang dilindungi oleh sekering, gangguan ditandai dengan terputusnya sekering itu sendiri.

Kondisi gangguan dapat menyebabkan kerusakan serius pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, banyak penelitian, pengembangan perangkat, serta rancangan sistem proteksi telah dilakukan guna mencegah kerusakan pada jaringan transmisi dan peralatan lainnya. Proses pemutusan arus saat terjadi gangguan pun terus mengalami penyempurnaan. Secara umum, gangguan pada sistem tenaga listrik dikategorikan sebagai kondisi abnormal yang berpotensi menimbulkan kerusakan atau mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan.

1. Gangguan dapat terjadi ketika kondisi sistem menyimpang dari batas normal yang diizinkan, menyebabkan arus listrik yang sangat besar mengalir melalui saluran transmisi.
2. Gangguan juga bisa memengaruhi tegangan sistem secara signifikan, baik dengan menaikkan, menurunkan, maupun menghilangkan tegangan dari nilai standar yang seharusnya dipertahankan.
3. Ketidakseimbangan dalam sistem tenaga listrik tiga fasa dapat muncul akibat gangguan, sehingga simetri sistem terganggu dan distribusi daya menjadi tidak seimbang.
4. Gangguan dapat menghambat aliran daya listrik, menyebabkan gangguan distribusi energi ke beban yang memerlukan pasokan stabil.
5. Stabilitas sistem tenaga listrik dapat menurun akibat gangguan, bahkan hingga menyebabkan terhentinya aliran daya dalam jaringan secara keseluruhan.
6. Salah satu dampak paling serius adalah terjadinya hubung singkat yang mengakibatkan lonjakan arus besar, berisiko menimbulkan kerusakan pada komponen sistem seperti kabel, transformator, generator, dan motor listrik.

Terdapat dua penyebab utama yang memicu terjadinya gangguan dalam sistem tenaga listrik, yaitu faktor internal dan eksternal[26]. Gangguan eksternal umumnya berasal dari pengaruh lingkungan sekitar, seperti cuaca ekstrem,

intervensi manusia, aktivitas hewan, atau gangguan dari tumbuhan. Faktor-faktor ini dapat mengganggu kestabilan parameter kelistrikan hingga menimbulkan kerusakan pada perangkat sistem. Sementara itu, gangguan internal berasal dari kerusakan yang terjadi di dalam komponen atau peralatan sistem tenaga listrik itu sendiri.

Jika ditinjau dari sifatnya, gangguan dalam sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yang masing-masing memiliki karakteristik dan penanganan yang berbeda sesuai dengan sumber dan tingkat keparahannya.

1. Gangguan Temporer

Gangguan temporer adalah gangguan yang bisa hilang dengan sendirinya, biasanya setelah bagian yang terganggu diputus untuk sementara waktu dan kemudian dipulihkan kembali, baik secara otomatis menggunakan *autorecloser* atau oleh operator secara manual. Namun, jika gangguan sementara terjadi berulang kali, hal ini dapat berkembang menjadi gangguan permanen yang berpotensi merusak peralatan.

2. Gangguan Permanen

Gangguan yang bersifat permanen memerlukan tindakan perbaikan atau penghilangan penyebab gangguan untuk mengatasinya. Untuk mengatasi gangguan-gangguan tersebut, peralatan harus dilengkapi dengan sistem proteksi relai yang dirancang untuk mendeteksi adanya gangguan sesuai dengan fungsi dan wilayah proteksinya.

Letak gangguan pada sistem transmisi dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

Persamaan 2. 11 Jarak Gangguan

Keterangan:

Jarak Gangguan = Jarak antara relai dengan titik terjadinya gangguan (Km)

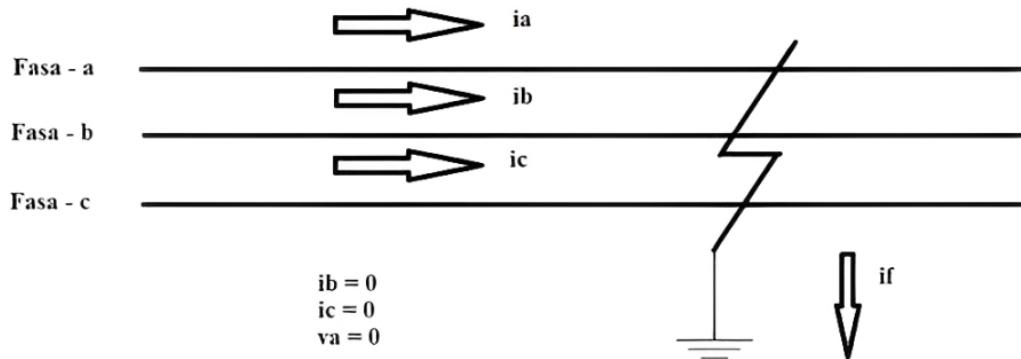
Z_{relai}	= Impedansi yang dibaca relai/impedansi gangguan (ohm)
PT	= Rasio Trafo Ukur Tegangan
CT	= Rasio Trafo Ukur Arus
L_1	= Panjang Saluran Transmisi (Km)
Z_{L1}	= Impedansi saluran transmisi (ohm)

2.2.23 Gangguan Hubung Singkat (Short Circuit Fault)

Hubung singkat terjadi ketika penghantar yang memiliki tegangan atau tidak bertegangan terhubung langsung melalui media yang seharusnya tidak mengalirkan arus, menyebabkan terjadinya aliran arus yang sangat besar dan abnormal. Jenis gangguan ini sering terjadi dalam sistem tenaga listrik, terutama pada saluran 3 fasa. Arus hubung singkat yang tinggi dapat sangat membahayakan peralatan. Oleh karena itu, untuk melindungi peralatan dari kerusakan akibat arus hubung singkat, perlu dilakukan pemutusan hubungan kelistrikan di area yang terganggu menggunakan peralatan pemutus tenaga atau *Circuit Breaker* (CB). Perhitungan arus hubung singkat sangat penting untuk menentukan kapasitas *Circuit Breaker* dan juga untuk mengkoordinasikan pemasangan relai proteksi [27].

2.2.24 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan satu fasa ke tanah merupakan salah satu jenis gangguan yang paling sering dijumpai dalam sistem tenaga listrik. Jenis gangguan ini menyumbang sekitar 85% dari total gangguan yang terjadi pada saluran transmisi. Contoh nyata dari gangguan ini adalah ketika sebuah pohon tumbang dan mengenai salah satu konduktor fasa pada saluran transmisi udara, sehingga menyebabkan terhubungnya fasa tersebut dengan tanah dan mengganggu kestabilan sistem.



Gambar 2. 15 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Persamaan 2. 12 Gangguan satu fasa ke tanah

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.12)$$

Keterangan :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

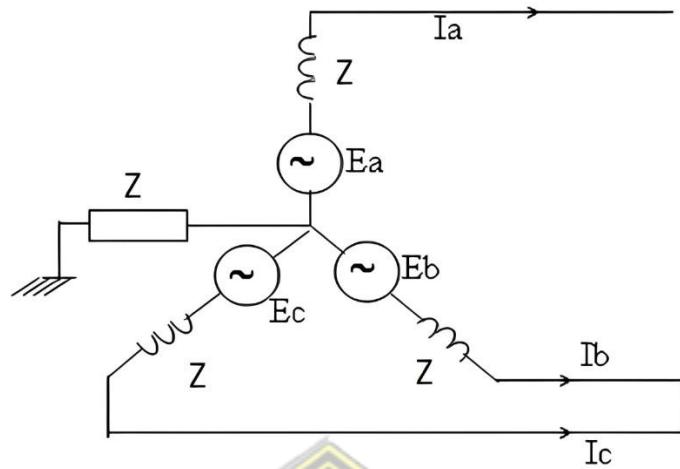
Z_0 = impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan

Z_1 = impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

Z_2 = impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

2.2.25 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan dua fasa biasanya terjadi akibat salah satu kawat penghantar putus dan jatuh hingga bersentuhan dengan fasa lainnya. Dalam kasus ini, misalnya yang terganggu adalah fasa b dan fasa c. Namun, karena tidak ada sambungan langsung antara kedua fasa tersebut dengan tanah, maka arus gangguan yang mengalir cenderung sangat kecil bahkan bisa mendekati nol. Gangguan jenis ini tetap perlu penanganan serius agar tidak berkembang menjadi gangguan yang lebih besar.



Gambar 2. 16 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Persamaan 2. 13 Gangguan dua fasa

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

Keterangan:

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

Z1 = impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

Z2 = impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

2.2.26 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa merupakan jenis gangguan yang bersifat simetris, karena saat gangguan terjadi, baik arus maupun tegangan masih menunjukkan keseimbangan antara ketiga fasanya. Gangguan ini bisa muncul akibat kegagalan isolasi peralatan, adanya loncatan listrik (*flashover*) pada saluran transmisi akibat sambaran petir, atau kesalahan operasional dari petugas. Meskipun jarang terjadi, gangguan jenis ini tetap harus diperhitungkan dalam proses perencanaan sistem proteksi, karena arus yang ditimbulkan sangat besar dan dapat membahayakan peralatan. Arus gangguan pada kasus ini memiliki sifat transien, yaitu berubah-ubah pada awal kejadian sebelum akhirnya mencapai kondisi stabil, meskipun tetap dalam keadaan terganggu.

Karena sifatnya yang simetris, secara teori tidak akan timbul arus netral, sehingga perhitungan arusnya mengikuti prinsip kesetimbangan antar fasa.

Persamaan 2. 14 Gangguan hubung singkat tiga fasa

Keterangan :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

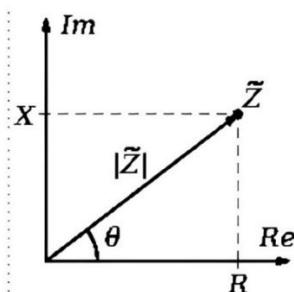
Z_1 = impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

I_A = Arus Pada Fasa A

2.2.27 Impedansi

Impedansi listrik, yang sering disebut sebagai impedansi merupakan suatu besaran yang merepresentasikan sejauh mana suatu rangkaian menghambat aliran arus bolak-balik (AC)[28]. Tidak hanya mencerminkan hambatan sebagaimana pada arus searah (DC), impedansi juga menggambarkan keterkaitan antara amplitudo serta perbedaan fasa antara tegangan dan arus dalam sistem AC. Impedansi adalah besaran kompleks yang disimbolkan dengan huruf Z dan istilah “impedansi kompleks” digunakan secara bergantian. Dalam bentuk polar, impedansi dinyatakan berdasarkan nilai magnitudo dan sudut fasanya.

Nilai magnitudo Z menunjukkan rasio antara amplitudo tegangan terhadap amplitudo arus, sedangkan sudut θ menunjukkan perbedaan fase di antara keduanya. Simbol j mewakili bilangan imajiner dalam representasi matematis impedansi.



Gambar 2. 17 Koordinat Kartesius

Persamaan 2. 15 Impedansi

Keterangan:

Z = Impedansi

R = Hambatan

jX = Bilangan Imajiner

2.2.28 DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT PowerFactory merupakan sebuah *engineering tool* yang digunakan untuk melakukan analisis pada sistem transmisi, distribusi, hingga kelistrikan industri. Perangkat lunak ini dirancang secara terintegrasi dan interaktif dengan teknologi yang canggih. Aplikasi ini khusus ditujukan untuk analisis sistem tenaga listrik serta pengendaliannya, dengan tujuan utama mendukung proses perencanaan dan mengoptimalkan kinerja operasi sistem tenaga listrik[30].

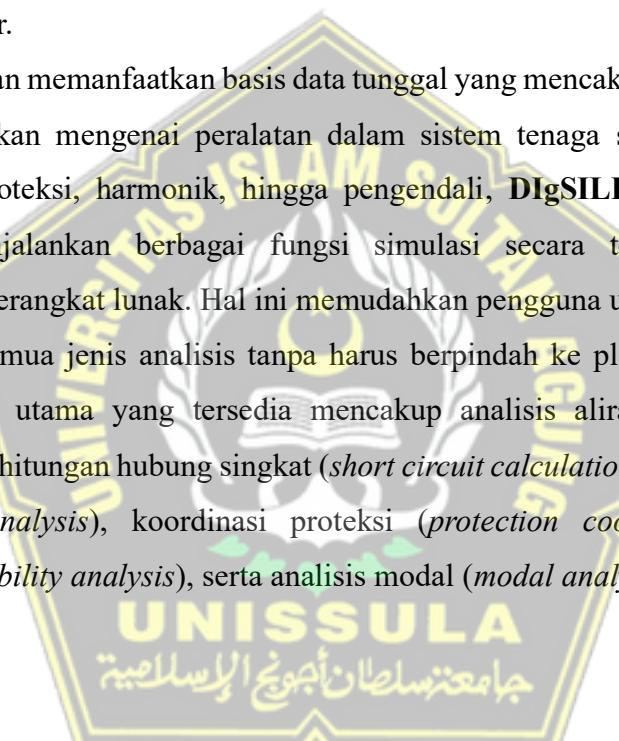
DIGSILENT merupakan singkatan dari “*Digital SImuLation of Electrical Networks*”. Perangkat lunak **PowerFactory** dikembangkan oleh para insinyur dan programmer berpengalaman yang telah lama berkecimpung dalam bidang analisis sistem tenaga listrik serta pemrograman komputer. Tingkat akurasi dan keandalan hasil yang dihasilkan oleh PowerFactory telah terbukti melalui berbagai penerapan nyata oleh institusi maupun organisasi di seluruh dunia yang bergerak dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik [30].

Untuk mendukung kebutuhan dalam analisis sistem tenaga listrik, PowerFactory dikembangkan sebagai *engineering tool* yang terintegrasi, dimana seluruh fungsi analisis sistem daya telah tersedia dalam satu paket perangkat lunak yang dapat dijalankan secara langsung. Adapun fitur-fitur utama yang dimiliki oleh *DIGSILENT PowerFactory* meliputi[30]

1. Menyediakan fungsi inti seperti definisi, modifikasi, serta pengorganisasian kasus studi, dilengkapi dengan rutinitas numerik inti, fungsi keluaran, dan dokumentasi.
 2. Mendukung tampilan grafik *single line diagram* yang interaktif, sekaligus terintegrasi dengan manajemen data kasus.

3. Menggunakan elemen sistem tenaga berbasis data dari kasus-kasus dasar yang sudah tersedia.
4. Memiliki fungsi perhitungan terintegrasi, misalnya kalkulasi parameter saluran maupun mesin yang dapat dilakukan berdasarkan data geometri atau informasi papan nama (*nameplate*).
5. Mampu mengkonfigurasi jaringan sistem tenaga yang terhubung dengan SCADA secara interaktif maupun *on-line*.
6. Dilengkapi *interface* umum yang kompatibel dengan sistem pemetaan berbasis komputer.

Dengan memanfaatkan basis data tunggal yang mencakup seluruh informasi yang diperlukan mengenai peralatan dalam sistem tenaga seperti data saluran, generator, proteksi, harmonik, hingga pengendali, **DIgSILENT PowerFactory** mampu menjalankan berbagai fungsi simulasi secara terpadu dalam satu lingkungan perangkat lunak. Hal ini memudahkan pengguna untuk mengakses dan mengelola semua jenis analisis tanpa harus berpindah ke platform lain. Adapun fungsi-fungsi utama yang tersedia mencakup analisis aliran daya (*load flow analysis*), perhitungan hubung singkat (*short circuit calculation*), analisis harmonik (*harmonic analysis*), koordinasi proteksi (*protection coordination*), analisis stabilitas (*stability analysis*), serta analisis modal (*modal analysis*)[30].



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Penelitian tindakan (action research) adalah jenis penelitian yang berfokus pada upaya pemecahan masalah atau peningkatan praktik melalui penerapan metode penelitian tindakan kelas (*classroom action research*). Karakteristiknya bersifat reflektif serta kolaboratif, sehingga peneliti dan partisipan bekerja sama dalam proses perbaikan. Menurut Kemmis dan Taggart, pelaksanaan penelitian tindakan dilakukan melalui siklus berulang yang berbentuk spiral (*spiral of steps*). Setiap siklus terdiri dari empat tahapan utama, yaitu perencanaan, pelaksanaan tindakan, observasi, dan refleksi.

a. Identifikasi Masalah

Masalah yang ditemukan pada penelitian ini yaitu Pertama, sistem tenaga yang masih berkapasitas kecil dengan konfigurasi radial berpotensi menimbulkan pemadaman menyeluruh apabila terjadi gangguan pada salah satu saluran karena tidak adanya jalur cadangan. Kedua, jaringan transmisi yang masih tergolong baru dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara setting proteksi relai dengan kondisi aktual di lapangan, sehingga rawan terjadi malfungsi. Ketiga, panjang lintasan saluran yang mencapai 101,856 km meningkatkan kemungkinan terjadinya **gangguan hubung** singkat baik satu fasa, dua fasa, maupun tiga fasa ke tanah yang memengaruhi keandalan proteksi. Keempat, kerapatan sambaran petir yang sangat tinggi, yaitu sekitar 666 kali dalam satu tahun terakhir dengan arus maksimum mencapai 120 kA, menambah risiko terjadinya gangguan eksternal yang berpotensi mengurangi keandalan dari sistem transmisi tersebut.

b. Solusi

Evaluasi terhadap setting relai jarak dilakukan berdasarkan standar yang tercantum dalam *Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali* (2013). Parameter hasil

perhitungan tersebut selanjutnya diuji melalui simulasi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory untuk memperoleh karakteristik berupa grafik impedansi dan waktu kerja. Selain itu, dilakukan pula simulasi gangguan hubung singkat dengan berbagai skenario guna melihat kinerja relai dalam kondisi yang berbeda.

c. Hasil

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory menghasilkan peta setting relai jarak yang ditampilkan dalam bentuk grafik impedansi dan kurva waktu kerja (*Time Jarak Diagram*). Selain itu, dilakukan pula analisis gangguan hubung singkat (*short circuit analysis*) yang divisualisasikan melalui diagram R-X dengan karakteristik relai tipe Mho.

d. Umpan Balik

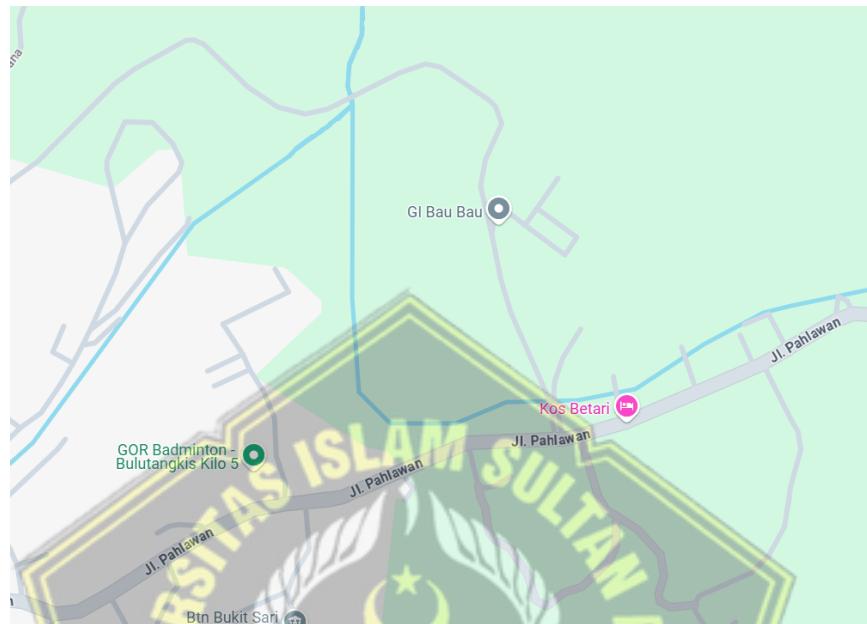
Setelah melaksanakan tindakan dan pengamatan, peneliti memberikan *feedback* yang mencakup analisis serta penilaian terhadap hasil simulasi. Analisis dilakukan untuk memastikan bahwa koordinasi relai jarak pada SUTT 150 kV Baubau–Raha dengan relai jarak pada penghantar berikutnya telah sesuai, tidak menimbulkan overlap, serta mampu bekerja optimal pada saat terjadi gangguan di zona 1, zona 2, maupun zona 3. Dari proses umpan balik ini, dimungkinkan muncul permasalahan baru yang memerlukan perhatian lebih lanjut, sehingga perlu dilakukan perencanaan ulang, tindakan ulang, pengamatan ulang, dan refleksi ulang. Tahapan ini berlangsung secara berulang dan berkesinambungan hingga permasalahan dapat diatasi sepenuhnya melalui siklus perencanaan, tindakan, observasi, dan refleksi.

3.2 Lokasi dan Objek Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini, penulis memilih lokasi studi di tiga gardu induk yang berada di wilayah Provinsi Sulawesi Tenggara, yaitu Gardu Induk Baubau, Gardu Induk Raha, dan Gardu Induk PLTNG Baubau. Ketiga lokasi ini dijadikan sebagai objek utama penelitian.

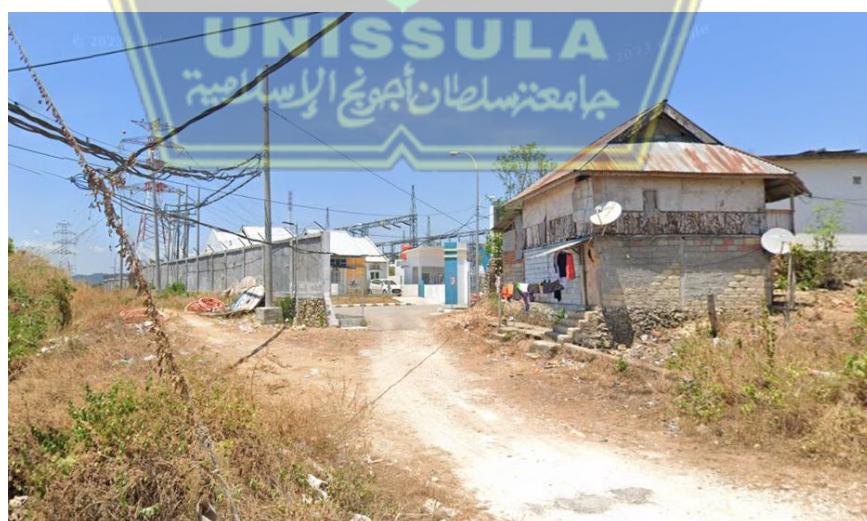
3.2.1 Gardu Induk 150 kV Baubau

Lokasi Gardu Induk Baubau berada di JL. Pahlawan Km 5 Kelurahan Kadolo Katapi, Kec. Wolio, Kota Baubau, Sulawesi Tenggara 93659.



Gambar 3. 1 Lokasi Gardu Induk 150 kV Baubau dalam Peta

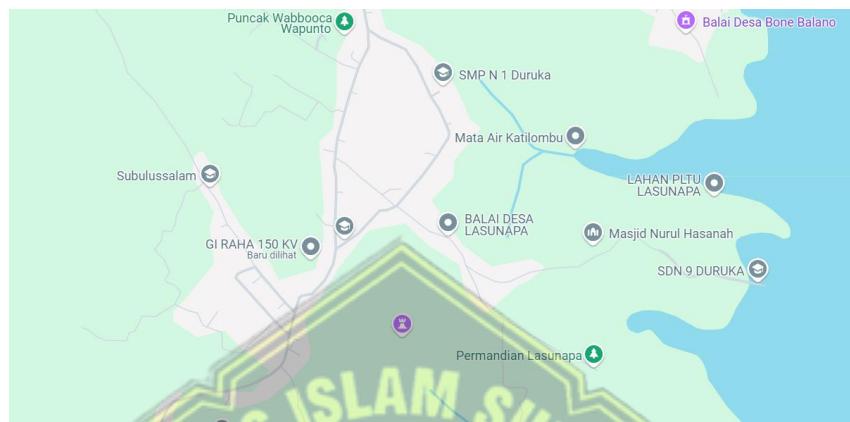
Di bawah ini adalah gambar lokasi aktual dari Gardu Induk 150 kV Baubau.



Gambar 3. 2 Lokasi Gardu Induk 150 kV Baubau

3.2.2 Gardu Induk 150 kV Raha

Lokasi Gardu Induk Raha berada di Ghonsume, Duruka, Kabupaten Muna, Sulawesi Tenggara 93659.



Gambar 3. 3 Lokasi Gardu Induk 150 kV Raha dalam Peta

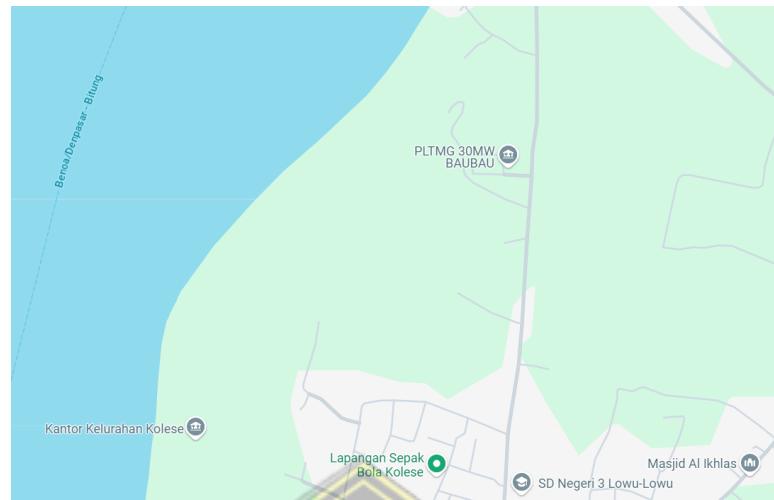
Di Bawah ini adalah gambar lokasi aktual dari Gardu Induk 150 kV Raha.



Gambar 3. 4 Lokasi Gardu Induk 150 kV Raha

3.2.3 Gardu Induk 150 kV Raha

Lokasi Gardu Induk PLTMG Baubau berada di Kolese, Lea-Lea, Kota Baubau, Sulawesi Tenggara 93758.



Gambar 3. 5 Lokasi Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau Peta

Di bawah ini adalah gambar lokasi aktual dari Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau.



Gambar 3. 6 Lokasi Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau

3.3 Data Penelitian

Dalam penyusunan penelitian tugas akhir ini, diperlukan berbagai jenis data yang mendukung analisis penelitian. Data tersebut dapat diperoleh melalui berbagai metode penelitian. Adapun sumber data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dengan beberapa metode berikut:

3.3.1 Studi Literatur

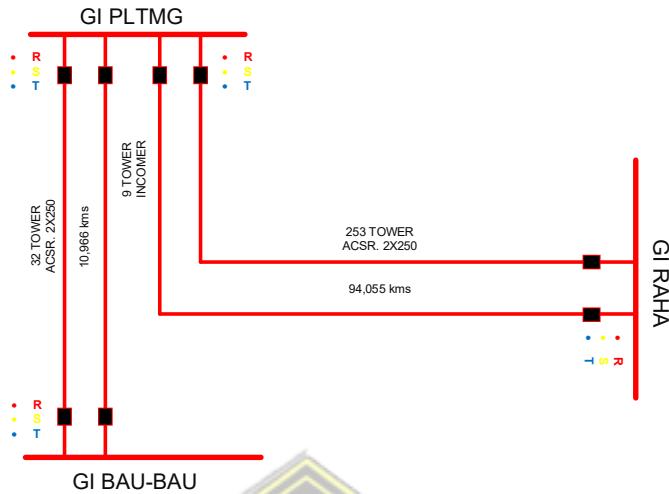
Dalam studi literatur, dilakukan pengumpulan berbagai sumber referensi yang meliputi jurnal penelitian terdahulu, laporan penelitian sebelumnya, serta buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali (2013). Jurnal-jurnal yang dikaji dianalisis untuk mengetahui teori yang digunakan serta metode yang diterapkan, sedangkan dari buku pedoman diambil teori pendukung serta nilai acuan standar yang relevan untuk mendukung penelitian ini.

3.3.2 Pengumpulan Data Lapangan

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data nyata yang diperoleh dari PT PLN (Persero). Pengambilan data dilakukan dengan cara meminta secara langsung berkas-berkas yang diperlukan untuk mendukung pengujian atau simulasi dalam penelitian ini. Adapun data yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi single line diagram, data impedansi saluran, data spesifikasi penghantar, rasio CT dan PT, serta data setting relai jarak. Secara rinci, data yang telah diperoleh dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. *Single Line Diagram (SLD)*

Single Line Diagram (SLD) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan milik PT PLN (Persero) UPT Kendari ULTG Baubau. Gambar SLD tersebut menampilkan rangkaian serta konfigurasi jaringan pada ULTG Baubau. Data ini berfungsi sebagai acuan utama dalam membangun rangkaian sistem dan konfigurasi jaringan pada perangkat lunak DiGILENT PowerFactory, sehingga simulasi yang dilakukan dapat merepresentasikan kondisi aktual di lapangan dengan lebih akurat.



Gambar 3. 7 Konfigurasi Gardu Induk 150 kV area Kepulauan Buton

2. Data Penghantar

Data penghantar yang digunakan dalam penelitian ini meliputi panjang saluran, jenis konduktor, serta kapasitas hantar arus (*Current Carrying Capacity*). Informasi ini sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap perhitungan impedansi saluran, keandalan penghantar dalam menyalurkan daya, serta penentuan setting proteksi relai jarak agar sesuai dengan kondisi teknis sistem transmisi. Berikut data penghantar saluran udara tegangan tinggi 150 kV ULTG Baubau

Tabel 3. 1 Data Konduktor

No.	Penghantar	Tipe Penghantar	Panjang	Irated	Z ₁	Phi Z ₁
			Penghantar			
			km	kA	Ohm	Deg
1.	PLTMG – Baubau	<i>ACSR 2x250 mm</i>	10,966	1,2	3,242	78,32
2.	PLTMG - Raha	<i>ACSR 2x250 mm</i>	94,055	1,2	27,880	78,31

3. Data Impedansi Saluran

Data impedansi saluran yang digunakan dalam penelitian ini mencakup nilai impedansi positif, negatif, dan nol (*positive, negative, and zero sequence impedance*) dari saluran transmisi. Informasi ini sangat krusial karena menjadi

dasar dalam perhitungan setting relai jarak, khususnya untuk menentukan batas zona proteksi pada kondisi gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, maupun tiga fasa. Nilai impedansi saluran diperoleh berdasarkan spesifikasi teknis penghantar, panjang saluran, serta data peralatan yang digunakan. Dengan data ini, dapat dilakukan analisis yang lebih akurat dalam simulasi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory sehingga koordinasi proteksi relai jarak dapat dipastikan sesuai standar dan bekerja optimal terhadap berbagai kemungkinan gangguan. Data impedansi saluran pada penghantar saluran udara tegangan tinggi 150 kV ULTG Baubau dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3. 2 Data Impedansi Saluran

No.	Penghantar	Impedansi Transmisi							
		Impedansi Total (Ohm)				Impedansi (Ohm/km)			
		R1	X1	R0	X0	R1	X1	R0	X0
1.	PLTMG - Baubau	0,656	3,174	3,875	9,443	0,0598	0,2894	0,3534	0,8611
2.	PLTMG - Raha	5,650	27,301	24,218	87,785	0,0584	0,2821	0,2503	0,9072

4. Data CT dan PT

Rasio CT dan PT ini digunakan dalam perhitungan setting relai jarak agar hasil pengukuran arus dan tegangan yang diterima relai sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Dengan kata lain, relai akan menghitung impedansi saluran berdasarkan arus dan tegangan sekunder dari CT dan PT, yang sudah diperkecil namun tetap proporsional dengan kondisi aktual. Berikut data ratio CT dan PT berada di saluran SUTT 150 kV Baubau – Raha.

Tabel 3. 3 Data Ratio CT dan PT

No.	Penghantar	Ratio CT		Ratio PT	
		Primer	Sekunder	Primer	Sekunder
1.	PLTMG - Baubau	1200	1	1500	1

2.	PLTMG - Raha	1200	1	1500	1
----	---------------------	------	---	------	---

5. Data Impedansi Trafo

Impedansi trafo adalah besaran yang menggambarkan hambatan gabungan antara resistansi dan reaktansi pada transformator ketika arus mengalir. Nilai impedansi ini biasanya dinyatakan dalam persen (%Z) terhadap kapasitas trafo, dan berfungsi untuk menentukan seberapa besar jatuh tegangan serta arus hubung singkat yang akan muncul. Dalam sistem proteksi, impedansi trafo juga dipakai sebagai acuan penting untuk menghitung setting relai, agar koordinasi proteksi tetap terjaga dan area proteksi tidak melewati batas yang seharusnya.

Untuk menetapkan zona proteksi, perhitungan impedansi trafo perlu digabungkan dengan impedansi saluran transmisi. Peran impedansi trafo adalah membatasi jangkauan zona proteksi sehingga tidak melewati batas area yang telah ditentukan. Berikut data impedansi dan spesifikasi trafo yang berada di PT PLN (Persero) ULTG Baubau

Tabel 3. 4 Data Impedansi Trafo

No.	Lokasi GI	Nama Bay	Merk	Tegangan Nominal	Impedansi (%)	Daya Trafo
1.	GI Baubau	Trafo 1	Sintra	150/20 kV	12.1	60 MVA
2.	GI PLTMG Baubau	Trafo 1	Unindo	20/150 kV	12.19	30 MVA
3.	GI Raha	Trafo 1	B&D	150/20 kV	12.04	60 MVA

3.4 Setting Impedansi Zona Relai Jarak

Metode perhitungan impedansi zona pada relai jarak dilakukan untuk menetapkan batas perlindungan terhadap gangguan pada saluran transmisi dengan mengacu pada nilai impedansi, baik resistansi maupun reaktansi, dari penghantar antara posisi relai hingga titik gangguan. Rumus perhitungan yang digunakan dalam analisis ini mengacu pada Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali (2013). Adapun parameter-parameter yang dibutuhkan dalam menentukan impedansi zona relai jarak adalah sebagai berikut.

- a. Lokasi Gardu Induk (GI) – sebagai titik referensi awal proteksi.

- b. Panjang Saluran (km) – menentukan besarnya total impedansi saluran yang diamankan.
- c. Tipe Konduktor – berpengaruh pada nilai resistansi, reaktansi, serta kapasitas hantar arus.
- d. Impedansi Saluran (Ω/km) – nilai impedansi per satuan panjang penghantar.
- e. Impedansi Trafo (Ω) – dimasukkan dalam perhitungan untuk membatasi zona proteksi agar tidak melewati batas yang seharusnya.
- f. Rasio CT Saluran – digunakan untuk menyesuaikan arus primer ke arus sekunder relai.
- g. Tegangan Kerja (kV) – tegangan nominal saluran transmisi yang menjadi acuan dalam setting relai.

Sebagai data pembanding berikut ini adalah data *setting* aktual zona relai jarak yang berada di PT PLN (Persero) ULTG Baubau.

Tabel 3. 5 Data Setting Relay Jarak aktual

No.	Lokasi GI	Arah Bay	Merk	Tipe	Z1	Z2	Z3	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}
1.	GI Baubau	PLTMG Baubau	Toshiba	GRL 200	2,030	3,660	29,990	0	0,4	1,2
2.	GI PLTMG Baubau	Baubau	Toshiba	GRL 200	2,030	3,660	17,640	0	0,4	1,2
3.	GI Raha	PLTMG Baubau	MICOM	P545	17,473	24,025	52,418	0	0,4	1,2
4.	GI PLTMG Baubau	GI Raha	MICOM	P545	17,473	31,451	40,750	0	0,4	1,2

3.5 Arus Hubung Singkat Sistem Baubau.

Data arus hubung singkat sistem yang diambil berupa arus hubung singkat tiga fasa yang diambil berdasarkan data milik GI Baubau, GI PLTMG Baubau, dan GI Raha. Nilai arus hubung singkat didapat dari data arus hubung singkat GI/GITET Sistem Baubau semester 2 tahun 2024 yang dikeluarkan oleh UP2B Makassar. Pada simulasi ini arus hubung singkat berfungsi untuk mewakili sumber daya listrik eksternal (external grid) yang terhubung dengan sistem yang sedang dianalisis.

Tabel 3. 6 Data Arus Hubung Singkat (HIS) Sistem Baubau

		IMPEDANSI SUMBER DAN DATA HUBUNG SINGKAT SISTEM BAUBAU									
GARDU INDUK	TEGANGAN (kV)	IMPEDANSI SUMBER (1 PHASE TO GROUND MAX SC)						HUBUNG SINGKAT			
		URUTAN NOL		URUTAN POSITIF		URUTAN NEGATIF		3 FASA		2 FASA	
		R0 (p.u)	X0 (p.u)	R1 (p.u)	X1 (p.u)	R2 (p.u)	X2 (p.u)	MAX	MIN	MAX	MIN
GI BAUBAU	150	0,00351	0,38486	0,06048	0,89448	0,06724	0,87867	0,47	0,43	0,41	0,37
GI PLTMG BAUBAU	150	0,00002	0,37967	0,05694	0,88745	0,06370	0,87163	0,48	0,43	0,42	0,38
GI RAHA	150	0,03275	0,42811	0,08853	0,95021	0,09529	0,93440	0,44	0,40	0,39	0,35
								0,55	0,50		

Pada Tabel 3.6 ditunjukkan bahwa data yang diperlukan meliputi arus hubung singkat, nilai reaktansi (X), serta resistansi (R) pada Gardu Induk Baubau, Gardu Induk PLTMG Baubau, dan Gardu Induk Raha. Untuk mendukung analisis lebih detail, data reaktansi dan resistansi yang digunakan harus mencakup komponen urutan positif serta komponen urutan nol.

3.6 Data Material Transmisi Utama (MTU) Pemutus (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker berperan penting sebagai perangkat proteksi yang melindungi peralatan serta sistem tenaga listrik dari potensi kerusakan akibat gangguan, misalnya hubung singkat. Mekanisme kerjanya adalah dengan memutus aliran listrik secara otomatis saat arus gangguan terdeteksi. Untuk dapat mengatasi arus gangguan tersebut, setiap PMT dilengkapi dengan kapasitas pemutusan arus hubung singkat (*Rated Short Circuit Current*) yang menjadi batas kemampuan maksimalnya dalam memutus arus tanpa merusak peralatan. Berikut ini adalah data spesifikasi PMT di GI Baubau, GI PLTMG Baubau, GI Raha

Tabel 3. 7 Data Spesifikasi PMT di GI Baubau, GI PLTMG Baubau, dan GI Raha

Spesifikasi PMT GI Baubau 150 kV	
<i>Merk / Type</i>	Siemens / 3AP1FI
<i>Rate Voltage</i>	170 kV
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Normal Current</i>	4000 A
<i>Breaking Current</i>	40 kA
<i>Short-time Current</i>	3s 40 kA
Spesifikasi PMT GI PLTMG Baubau 150 kV	
<i>Merk / Type</i>	ABB / LTB170D1/B
<i>Rate Voltage</i>	170 kV

Spesifikasi PMT GI Baubau 150 kV	
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Normal Current</i>	3150 A
<i>Breaking Current</i>	40 kA
<i>Short-time Current</i>	3s 40 kA
Spesifikasi PMT GI Raha 150 kV	
<i>Merk / Type</i>	ABB / LTB170D1/B
<i>Rate Voltage</i>	170 kV
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Normal Current</i>	3150 A
<i>Breaking Current</i>	40 kA
<i>Short-time Current</i>	3s 40 kA

Rated Short Circuit Current pada Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*) merupakan batas maksimum arus hubung singkat yang mampu ditahan dan diputuskan oleh peralatan tanpa menimbulkan kerusakan pada alat itu sendiri. Besaran ini biasanya dinyatakan dalam satuan kiloampere (kA).

3.7 Melakukan Simulasi Menggunakan *Software DIgSILENT PowerFactory*

24.0.2.0

Dalam pembuatan simulasi evaluasi kinerja relai jarak, tahap awal dilakukan dengan membangun single line diagram pada software. Selanjutnya, setiap komponen sistem diberi parameter yang relevan, seperti data MVA short circuit, CT, VT, panjang saluran, tegangan kerja, frekuensi, serta impedansi saluran. Setelah seluruh data dimasukkan, dilakukan pemberian gangguan hubung singkat pada saluran untuk menguji bagaimana relai jarak merespons.

Agar diperoleh setting relai yang akurat, diperlukan analisis yang mengacu pada Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali (2013) sebagai standar acuan. Jika hasil simulasi menunjukkan bahwa relai tidak bekerja sesuai standar, maka harus dilakukan peninjauan ulang pada pengaturan relai tersebut.

Secara umum, langkah-langkah utama dalam membuat simulasi kerja relai jarak meliputi:

1. Membuat single line diagram sistem pada software.
2. Memasukkan data teknis (MVA short circuit, CT, VT, panjang saluran, tegangan kerja, frekuensi, impedansi).
3. Menambahkan gangguan hubung singkat sebagai skenario pengujian.
4. Melakukan analisis kinerja relai dengan mengacu pada standar.
5. Meninjau ulang setting jika ditemukan ketidaksesuaian dengan standar yang berlaku.

3.7.1 Time Distance Diagram

Fitur Time Distance Diagram pada aplikasi DIgSILENT PowerFactory berfungsi untuk menganalisis kinerja relay distance dalam sistem proteksi tenaga listrik. Diagram ini memiliki peran penting karena menampilkan visualisasi hubungan antara waktu kerja relai dan jarak (*distance*) dari titik gangguan ke posisi relai. Dengan demikian, dapat terlihat seberapa cepat relai melakukan tripping ketika gangguan terjadi pada lokasi tertentu dalam jaringan.

Agar fitur ini dapat digunakan dengan tepat, terdapat dua syarat utama yang harus dipenuhi, yaitu:

1. Pemodelan relai – memastikan bahwa relai jarak telah dimodelkan secara akurat dalam skema proteksi.
2. Pengaturan parameter relai – meliputi penentuan nilai impedansi, kurva karakteristik, serta pengaturan waktu tunda (time delay).

Adapun manfaat penggunaan Time Distance Diagram dalam penelitian ini antara lain:

1. Evaluasi Kinerja Proteksi – memastikan relay distance bekerja secara selektif, cepat, dan mampu mengisolasi gangguan pada titik yang tepat.
2. Perencanaan Sistem Proteksi – mendukung proses perancangan dan pengaturan relay dengan mempertimbangkan faktor jarak serta waktu trip.
3. Optimasi Waktu Trip – membantu menentukan setting waktu kerja yang ideal, sehingga gangguan dapat diputus dengan cepat tanpa menimbulkan kerusakan pada bagian lain dari sistem.

3.7.2 Analisa Hubung Singkat

Dalam penelitian ini, simulasi gangguan hubung singkat dilakukan dengan memberikan variasi persentase lokasi gangguan sepanjang saluran transmisi. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menganalisis sejauh mana kontribusi proteksi relai jarak (*distance relay*) dalam merespons besarnya arus hubung singkat yang terjadi. Adapun jenis gangguan yang digunakan pada simulasi ini meliputi:

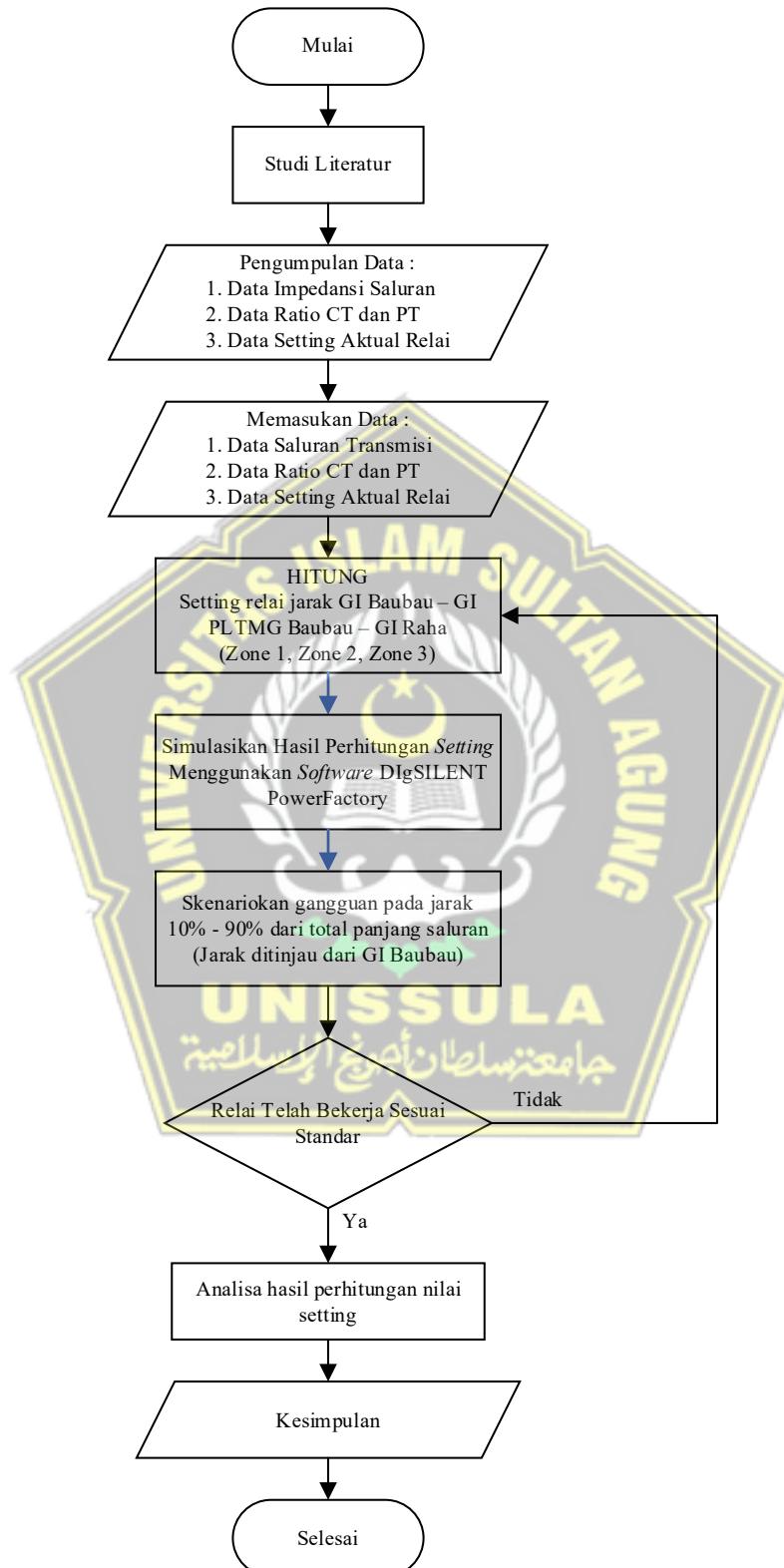
- a. Hubung Singkat Tiga Fasa (*3-Phase Fault*)
- b. Hubung Singkat Dua Fasa (*Line-to-Line Fault*)
- c. Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah (*Double Line-to-Ground Fault*)

3.7.3 Analisa Hasil

Tahap akhir penelitian ini adalah menganalisis koordinasi relai jarak 150 kV di GI Baubau, GI PLTMG Baubau, dan GI Raha berdasarkan hasil simulasi diagram R-X yang menunjukkan jangkauan zona proteksi dan waktu trip. Analisis ini menilai kesesuaian setting impedansi dengan standar serta koordinasi relai berikutnya. Jika ditemukan underreach atau overlap, maka dilakukan resetting agar proteksi bekerja optimal.



3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 8 Diagram Alir Penelitian

3.9 Langkah Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

1. Tujuan penelitian yang pertama dapat dicapai melalui serangkaian langkah analisis sistem yang melibatkan pengumpulan data primer dan sekunder. Data tersebut mencakup parameter saluran transmisi 150 kV seperti panjang, impedansi, dan jenis konduktor; karakteristik relay jarak yang terpasang di GI Baubau, GI PLTMG Baubau, serta GI Raha; dan data historis gangguan yang pernah terjadi. Selanjutnya melakukan analisa terhadap setting nilai impedansi relay jarak aktual ketika gangguan terjadi, apakah ditemukan zona yang *underreach* maupu *overreach*. Dari sini dapat disimpulkan apakah diperlukan perhitungan ulang setting proteksi atau setting sudah memenuhi dan dapat bekerja optimal.
2. Setelah tujuan penelitian yang pertama tercapai, selanjutnya menggunakan data yang di peroleh pada tujuan penelitian pertama dilakukan perhitungan ulang impedansi saluran (*Impedansi Primer dan Sekunder*) menggunakan parameter teknis saluran dan rasio Trafo Arus (CT) dan Trafo Tegangan (PT) yang terpasang, mengacu pada formula dan metodologi yang diamanatkan dalam Buku Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa-Bali (2013). Setelah nilai impedansi yang akurat diperoleh, langkah berikutnya adalah penentuan ulang *setting* waktu kerja dan *reach* (jangkauan) setiap zona proteksi *relay* jarak (Zona 1, Zona 2, dan Zona 3) untuk memastikan tercapainya koordinasi (selektivitas) dan sensitivitas yang optimal antara *relay* di GI Baubau dan GI Raha, sesuai dengan standar waktu *time-grading* proteksi yang berlaku, yang kemudian akan menghasilkan rekomendasi *setting* impedansi dan waktu kerja proteksi yang terbaru dan terstandar.
3. Untuk mengetahui relevansi setting impedansi zona relai jarak yang berada di GI Baubau, GI PLTMG Bauabu dan GI Raha dilakukan simulasi penambahan jaringan guna memvalidasi dari kinerja relai jarak tersebut apakah masih relevan apabila dilakukan penambahan jaringan. Dalam hal ini, penambahan jaringan ditambahkan setelah GI Raha.

4. Kemudian untuk mencapai tujuan penelitian yang berikutnya, data-data setting proteksi yang telah diperoleh disimulasikan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory 24.0.2.0. Selanjutnya, dilakukan simulasi gangguan hubung singkat (tiga fase, fase-ke-fase, dan fase-ke-tanah) secara berulang pada berbagai titik spesifik: di dalam Zona 1 (proteksi utama), di sepanjang Zona 2 (proteksi cadangan lokal), dan di dalam Zona 3 (proteksi cadangan jauh) baik pada saluran Baubau – Raha maupun pada saluran keluarannya. Setiap simulasi akan berfokus pada verifikasi kinerja *relay*, dengan menganalisis parameter seperti nilai arus, tegangan, impedansi terukur (*measured impedance*), dan waktu operasi *relay* (*tripping time*) untuk memastikan *relay* bekerja secara selektif (hanya *relay* yang seharusnya yang beroperasi) dan cepat (dalam batas waktu yang ditentukan standar proteksi), sehingga dapat dipastikan proteksi berfungsi secara optimal di setiap zona gangguan.
5. Melakukan evaluasi koordinasi kerja relai distance yang terpasang pada GI Baubau, GI PLTMG Baubau, dan GI Raha. Evaluasi ini mencakup kemampuan proteksi relai dalam merespons gangguan hubung singkat. Relai distance diharapkan bekerja sesuai dengan zona proteksinya. Jika ditemukan adanya kondisi overlap atau underreach pada zona proteksi, maka perlu dilakukan resetting terhadap impedansi relai distance agar sesuai dengan standar.
6. Setelah dilakukan evaluasi *setting* proteksi selanjutnya untuk mengetahui kerugian finansial yang ditanggung oleh PT PLN dilakukan perhitungan daya yang tidak tersalurkan selama masa padam yang diakibatkan karena adanya gangguan jaringan akibat sambaran petir yang menyebabkan trip PMT.

BAB IV

DATA DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dilakukan perhitungan dan analisa data serta akan dibahas terkait bagaimana cara mengatur relai jarak dan menskenariokannya dengan jarak dan jenis gangguan yang telah ditentukan.

4.1 Kebutuhan Data Analisis

Berikut adalah sejumlah data yang dibutuhkan dalam menetapkan pengaturan impedansi serta waktu kerja relai.

1. Gardu Induk Baubau ke Gardu Induk PLTMG Baubau:

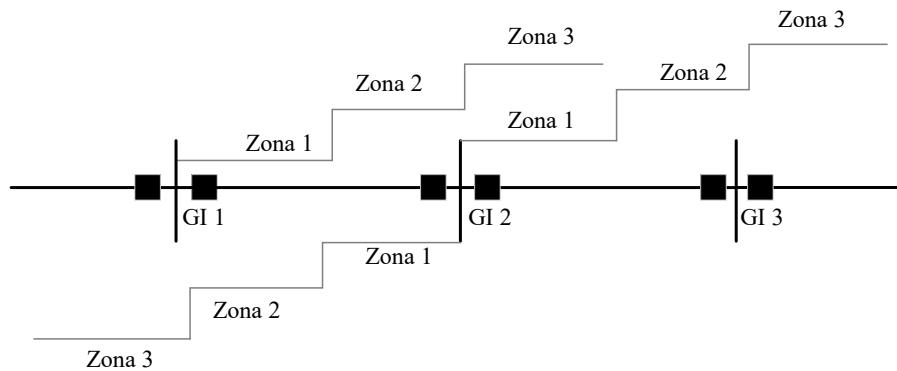
Panjang Saluran	= 10,97 Km
Imp. Ur. Positif (Z_1)	= $0,0598 + j0,2895 \Omega / \text{Km}$
Imp. Ur. Positif (Z_1) Total	= $0,6563 + j3,1744 \Omega (3,24 < 78,03^\circ)$
Imp. Ur. Nol (Z_0)	= $0,3533 + j0,8612 \Omega / \text{Km}$
Imp. Ur. Nol (Z_0) Total	= $3,8747 + j9,4434 \Omega (10,207 < 67,69^\circ)$
Rasio CT	= 1 : 1200
Rasio PT	= 1 : 1500

2. Gardu Induk PLTMG Baubau ke Gardu Induk Raha:

Panjang Saluran	= 94,06 Km
Imp. Ur. Positif (Z_1)	= $0,0601 + j0,2903 \Omega / \text{Km}$
Imp. Ur. Positif (Z_1) Total	= $5,6502 + j27,3013 \Omega (27,881 < 78,31^\circ)$
Imp. Ur. Nol (Z_0)	= $0,2575 + j0,9333 \Omega / \text{Km}$
Imp. Ur. Nol (Z_0) Total	= $24,217 + j87,7845 \Omega (91,064 < 74,58^\circ)$
Rasio CT	= 1 : 1200
Rasio PT	= 1 : 1500

4.2 Analisis Zona Pengamanan

Berikut ini disajikan daerah-daerah / zona yang akan peneliti analisa, yaitu berada diantara GI Baubau, GI PLTMG Baubau, dan GI Raha dengan ilustrasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 1 Zona-zona yang akan dianalisa

Keterangan:

GI 1 = Gardu Induk 150 kV Baubau

GI 2 = Gardu Induk 150 kV PLTMG Baubau

GI 3 = Gardu Induk 150 kV Raha

4.3 Data Gangguan Sistem Transmisi ULTG Baubau

Dalam upaya menjaga kontinuitas dan keandalan sistem kelistrikan, analisis gangguan pada jaringan transmisi menjadi aspek krusial, khususnya pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (ULTG) Baubau. ULTG Baubau sebagai salah satu jalur vital penyaluran energi listrik di kawasan Sulawesi Tenggara sangat rentan terhadap berbagai potensi gangguan, baik yang bersifat internal maupun eksternal. Oleh karena itu, analisa gangguan pada jalur ini perlu dilakukan secara menyeluruh untuk mengidentifikasi penyebab, dampak, dan langkah penanganan yang tepat agar sistem tetap stabil dan perlindungan dapat bekerja secara optimal. Sub bab ini akan membahas karakteristik gangguan yang terjadi pada ULTG Baubau serta evaluasi kinerja sistem proteksi yang diterapkan. Berikut ini adalah data rekaman *relay* salah satu gangguan yang terjadi pada tahun 2024.

1. Kondisi Relai GI PLTMG Baubau

Impedansi Gangguan

Phasa R : 22,247 Ohm

Phasa T : 27,062 Ohm

Kondisi PMT

Phasa R	: Trip Zona 2 + Receive Teleproteksi
Phasa T	: Trip Zona 2 + Receive Teleproteksi
Status Teleproteksi	: <i>Receive</i> PUTT

2. Kondisi Relai GI Raha

Impedansi Gangguan

Phasa R	: 3,2350 Ohm
Phasa T	: 14,103 Ohm

Kondisi PMT

Phasa R	: Trip Zona 1
Phasa T	: Trip Zona 1
Status Teleproteksi	: -

4.4 Analisa Skenario Gangguan Dengan *Setting* Relai Aktual

Pada bagian sub bab ini akan membahas analisa *setting* koordinasi *relay* jarak terhadap skenario gangguan yang sudah dibuat menggunakan pengaturan aktual yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULTG Baubau. Berikut ini adalah data pengaturan aktual relai jarak yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULTG Baubau.

Tabel 4.1 Pengaturan aktual relai jarak

No.	Lokasi GI	Arah Bay	Merk	Tipe	Z1	Z2	Z3	T _{z1}	T _{z2}	T _{z3}
1.	GI Baubau	PLTMG Baubau	Toshiba	GRL 200	2,030	3,660	29,990	0	0,4	1,2
2.	GI PLTMG Baubau	Baubau	Toshiba	GRL 200	2,030	3,660	17,640	0	0,4	1,2
3.	GI Raha	PLTMG Baubau	MICOM	P545	17,473	24,025	52,418	0	0,4	1,2
4.	GI PLTMG Baubau	GI Raha	MICOM	P545	17,473	31,451	40,750	0	0,4	1,2

Berdasarkan hasil analisis data gangguan pada sistem transmisi antara GI PLTMG Baubau dan GI Raha, diketahui bahwa nilai impedansi gangguan yang

terbaca di relai GI Raha berada dalam cakupan zona 1. Hal ini menunjukkan bahwa titik gangguan berada sangat dekat dengan GI Raha, sehingga sistem proteksi bekerja secara tepat dengan memerintahkan trip instan tanpa penundaan waktu. Selanjutnya, relai GI Raha mengirimkan sinyal teleproteksi jenis PUTT (*Permissive Underreaching Transfer Trip*) ke GI PLTMG Baubau sebagai gardu induk seberang. Sinyal ini berfungsi sebagai izin bagi GI PLTMG Baubau untuk melakukan pemutusan (trip) secara cepat meskipun gangguan masih terbaca dalam cakupan zona 2 oleh relai Baubau.

Keberadaan sistem teleproteksi menjadi sangat penting dalam skema proteksi jarak dua arah ini. Fungsi utamanya adalah mengkoordinasikan kerja relai di kedua sisi transmisi agar dapat merespons gangguan secara serempak dan akurat. Dengan adanya sinyal teleproteksi, pemutusan di kedua ujung saluran dapat dilakukan secara bersamaan sehingga mempercepat proses isolasi gangguan, meminimalkan potensi kerusakan peralatan, serta menjaga stabilitas sistem tenaga secara keseluruhan.

Apabila sistem teleproteksi tidak berfungsi atau mengalami kegagalan, maka GI PLTMG Baubau tidak akan menerima sinyal PUTT dari GI Raha, sehingga trip relai di GI PLTMG Baubau akan tertunda dan baru akan bekerja sesuai setting waktu zona 2. Penundaan ini berisiko memperbesar durasi arus gangguan mengalir, yang berpotensi menimbulkan kerusakan termal pada konduktor, pembebatan berlebih pada pemutus tenaga, dan bahkan menyebabkan ketidakseimbangan sistem tenaga secara regional. Dengan demikian maka setting koordinasi relai yang berada di GI Raha dan GI PLTMG Baubau secara teori dan perhitungan sudah sesuai dikarenakan ketika relai jarak yang berada di GI Raha membaca impedansi lebih kecil dari setting impedansi zona 1 relai bekerja secara instan memerintahkan PMT untuk trip.

4.5 Analisa Skenario Gangguan Dengan *Setting* Relai Perhitungan Baru

Berdasarkan data-data yang sudah dikumpulkan yang terdiri dari data penghantar, data impedansi saluran, CT dan PT, dan data impedansi trafo, maka untuk perhitungan nilai pengaturan zona kerja relai jarak dapat dilakukan. Perhitungan dimulai dari saluran transmisi 150 kV GI Baubau – GI PLTMG yang kemudian dilanjutkan perhitungan untuk saluran transmisi 150 kV GI PLTMG – GI Raha.

4.5.1 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI Baubau - GI PLTMG

$$Z_{L1} = 0,6563 + j3,1744 \Omega$$

$$Z_{L2} = 0,6563 + j3,1744 \Omega$$

$$Z_{L3} = 5,6502 + j27,3013 \Omega$$

$$Z_{L4} = 5,6502 + j27,3013 \Omega$$

Keterangan

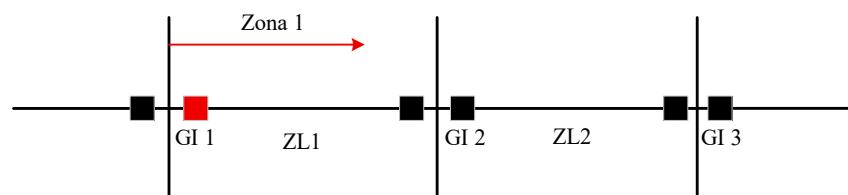
L_1 = Saluran GI Baubau – GI PLTMG

L_2 = Penghantar setelah L_1 yang paling pendek.

L_3 = Penghantar setelah L_1 yang paling panjang

L_4 = Penghantar setelah L_3 yang paling pendek.

a. Zona 1



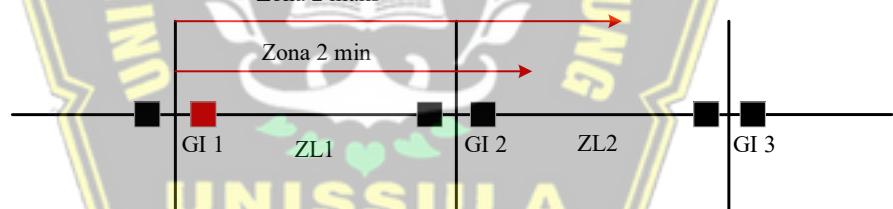
Gambar 4. 2 Jangkauan perlindungan zona 1

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{CT}{PT} \\
 &= \frac{1200}{1500} \\
 &= \frac{1}{1} \\
 &= 0,8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{1 \text{ Primer}} &= 0,8 \times Z_{L1} \\
 &= 0,8 \times (0,6563 + j3,1744) \\
 &= 0,52504 + j 2,540 \\
 &= 2,593227 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{1 \text{ Sekunder}} &= n_1 \times Z_{1p} \\
 &= 0,8 \times (0,52504 + j 2,540) \\
 &= 0,420 + j 2,032 \\
 &= 2,0745 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

b. Zona 2



Gambar 4.3 Jangkauan perlindungan zona 2

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{CT}{PT} \\
 &= \frac{1200}{1500} \\
 &= \frac{1}{1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{2 \text{ min}} &= 1,2 \times Z_{L1} \\
 &= 1,2 \times (0,6563 + j3,1744) \\
 &= 0,78756 + j 3,80928 \\
 &= 3,8898 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{2 \text{ maks}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L2}) \\
 &= 0,8 \times (0,6563 + j3,1744 + (0,8 \times (0,6563 + j3,1744))) \\
 &= 0,945 + j 4,571 \\
 &= 4,6678 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{2 \text{ trf}} &= Z_{L1} + (0,45 X_{\text{trf}}) \\
 &= 0,6563 + j3,1744 + (0,45 \times (j 91,4)) \\
 &= 0,6563 + j 44,2819 \\
 &= 44,2867 < 89,15^\circ
 \end{aligned}$$

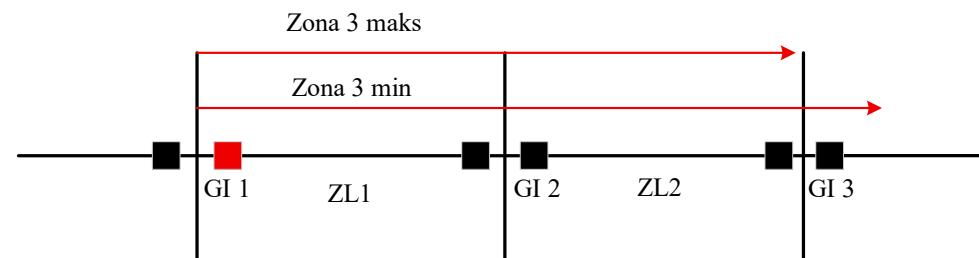
$$\begin{aligned}
 Z_{2 \text{ pembanding}} &= Z_{L1} + 0,8 Z_{L2} \\
 &= (0,6563 + j3,1744) + (0,8 \times (0,6563 + j3,1744)) \\
 &= 1,181 + j 5,71 \\
 &= 5,8347 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

Zona 2 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 2 transformator. Oleh karena itu, nilai $Z_{2 \text{ maks}}$ dipilih sebagai *setting* Zona 2 pada GI Baubau.

$$Z_{2 \text{ Primer}} = Z_{2 \text{ maks}}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{2 \text{ Sekunder}} &= n_2 \times Z_{2p} \\
 &= 0,8 \times (0,945 + j 4,571) \\
 &= 0,7560 + j 3,657 \\
 &= 3,7342 < 78,31^\circ
 \end{aligned}$$

c. Zona 3



Gambar 4. 4 Jangkauan perlindungan zona 3

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{CT}{PT} \\
 &= \frac{\underline{1200}}{\underline{\underline{1500}}} \\
 &= \underline{\underline{1}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{3 \text{ min}} &= 1,2 \times (Z_{L1} + Z_{L3}) \\
 &= 1,2 \times ((0,6563 + j3,1744) + (5,6502 + j27,3013)) \\
 &= 7,5678 + j 36,57084 \\
 &= 37,3456 < 78,30^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{3 \text{ maks1}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 1,2 Z_{L3}) \\
 &= 0,8 \times (0,6563 + j3,1744 + (1,2 \times (5,6502 + j27,3013))) \\
 &= 5,949 + j 28,749 \\
 &= 29,3578 < 78,30^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{3 \text{ maks2}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L3} + 0,8 Z_{L4}) \\
 &= 0,8 \times (0,6563 + j3,1744 + (0,8 \times (5,6502 + j27,3013) + 0,8 \times \\
 &\quad (5,6502 + j27,3013))) \\
 &= 7,7572 + j 37,485184 \\
 &= 38,2794 < 78,30^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{3 \text{ trf}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + (0,8 X_{trf})) \\
 &= 0,8 \times (0,6563 + j3,1744 + (0,8 \times (j 91,4))) \\
 &= 0,52504 + j 61,00352 \\
 &= 61,0057 < 89,50^\circ
 \end{aligned}$$

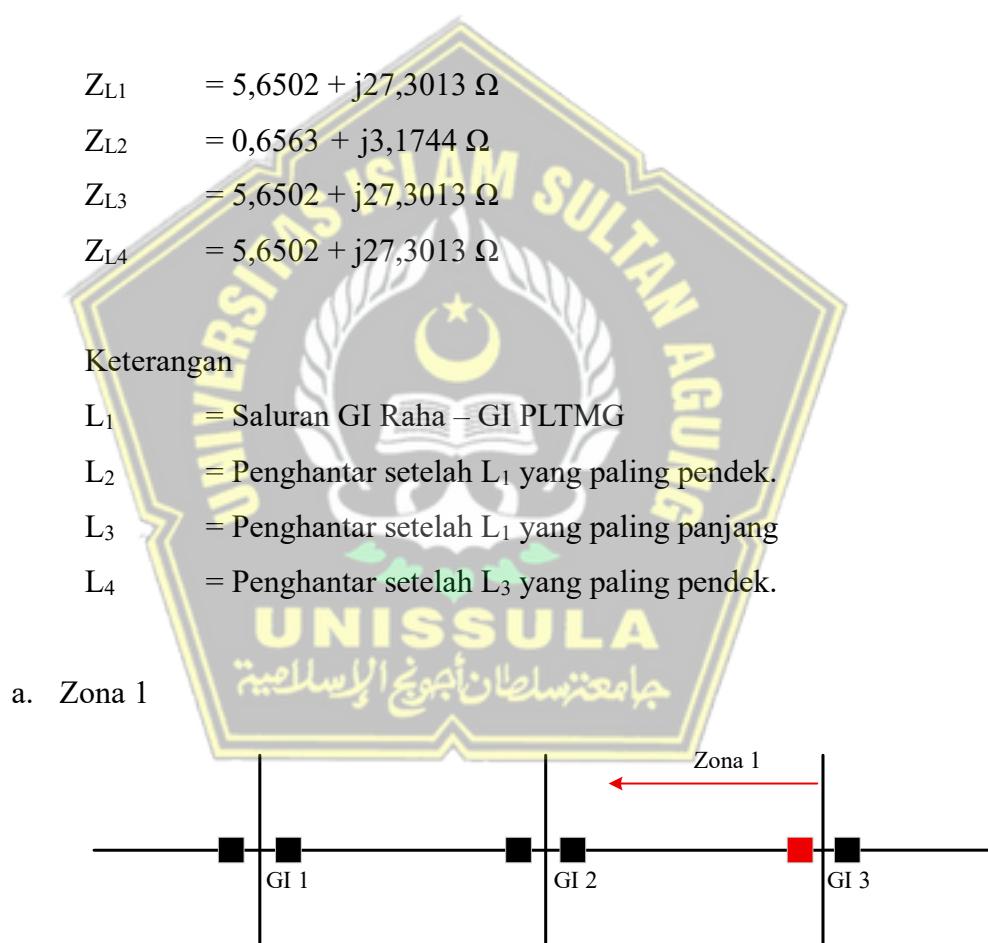
$$\begin{aligned}
 Z_{3 \text{ pembanding}} &= Z_{L1} + 1,2 Z_{L3} \\
 &= (0,6563 + j3,1744) + (0,8 \times (5,6502 + j27,3013)) \\
 &= 7,437 + j 35,94 \\
 &= 36,6973 < 78,30^\circ
 \end{aligned}$$

Zona 3 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 3 transformator. Oleh karena itu, nilai $Z_{3 \text{ maks2}}$ dipilih sebagai *setting* Zona 3 pada GI Baubau.

$$Z_3 \text{ Primer} = Z_3 \text{ maks2}$$

$$\begin{aligned} Z_3 \text{ Sekunder} &= n_3 \times Z_{3p} \\ &= 0,8 \times (7,7572 + j 37,4851) \\ &= 6,2058 + j 29,988 \\ &= \mathbf{30,6235 < 78,30^\circ} \end{aligned}$$

4.5.2 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI Raha - GI PLTMG



Gambar 4. 5 Jangkauan perlindungan zona 1 GI Raha – GI PLTMG

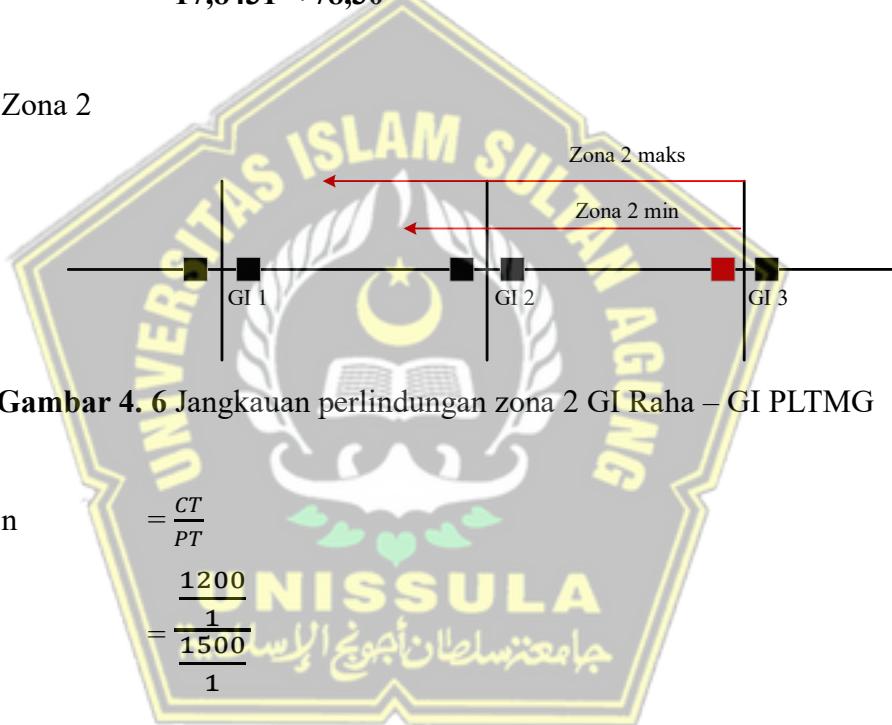
$$\begin{aligned} n &= \frac{CT}{PT} \\ &= \frac{1200}{1500} \\ &= \frac{1}{1} \end{aligned}$$

$$= 0,8$$

$$\begin{aligned} Z_{1 \text{ Primer}} &= 0,8 \times Z_{L1} \\ &= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013) \\ &= 4,52015 + j 21,841 \\ &= 22,30389 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{1 \text{ Sekunder}} &= n_1 \times Z_{1p} \\ &= 0,8 \times (4,52015 + j 21,841) \\ &= 3,616 + j 17,47 \\ &= 17,8431 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

b. Zona 2



Gambar 4. 6 Jangkauan perlindungan zona 2 GI Raha – GI PLTMG

$$n = \frac{CT}{PT}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1200}{1500} \\ &= \frac{1}{1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{2 \text{ min}} &= 1,2 \times Z_{L1} \\ &= 1,2 \times (5,6502 + j27,3013) \\ &= 6,78023 + j 32,76158 \\ &= 33,4558 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{2 \text{ maks}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L2}) \\ &= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (0,8 \times (0,6563 + j3,1744))) \\ &= 4,940 + j 23,873 \\ &= 24,3784 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

$$Z_{2 \text{ trf}} = Z_{L1} + (0,45 X_{\text{trf}})$$

$$= 5,6502 + j27,3013 + (0,45 \times (j 91,4))$$

$$= 5,65019 + j 68,40882$$

$$= 68,64176 < 85,278^\circ$$

$$Z_2 \text{ pembanding} = Z_{L1} + 0,8Z_{L2}$$

$$= (5,6502 + j27,3013) + (0,8 \times (0,6563 + j3,1744))$$

$$= 6,175 + j 29,84$$

$$= 30,4730 < 78,3082^\circ$$

Zona 2 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 2 transformator. Oleh karena itu, nilai $Z_{2 \text{ min}}$ dipilih sebagai *setting* Zona 2 pada GI Baubau.

$$Z_2 \text{ Primer} = Z_{2 \text{ min}}$$

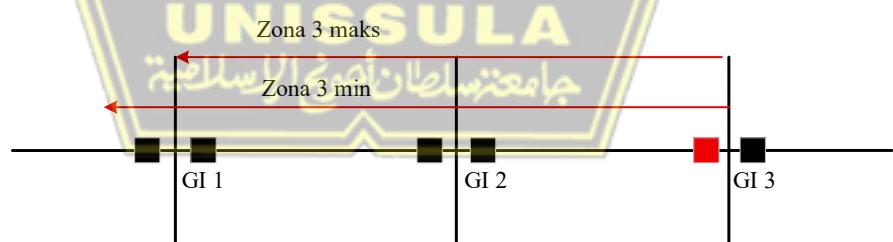
$$Z_2 \text{ Sekunder} = n_2 \times Z_{2p}$$

$$= 0,8 \times (6,78023 + j 32,76158)$$

$$= 5,4241 + j 26,209$$

$$= 26,7646 < 78,30^\circ$$

c. Zona 3



Gambar 4. 7 Jangkauan perlindungan zona 3 GI Raha – GI PLTMG

$$n = \frac{CT}{PT}$$

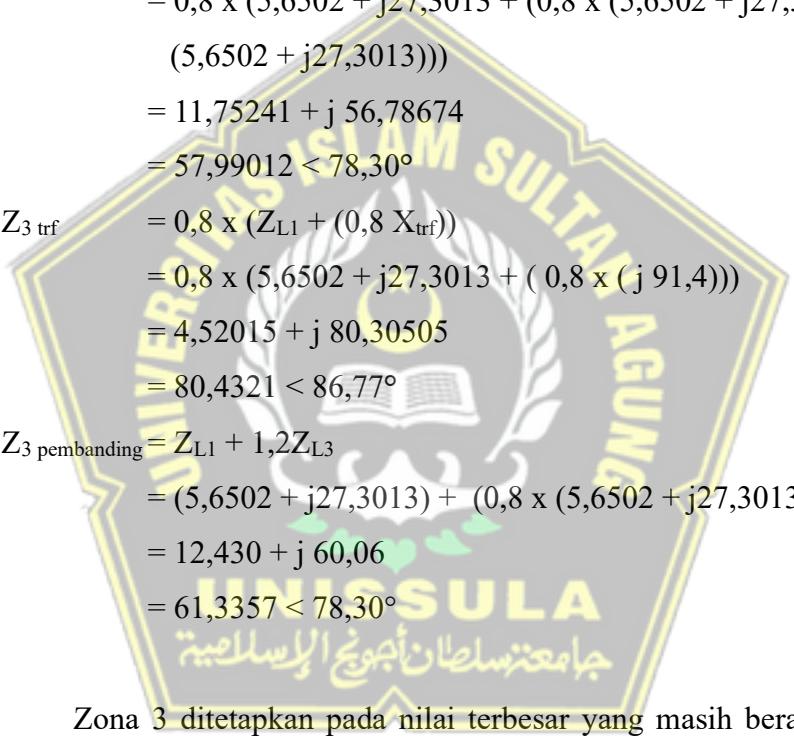
$$= \frac{1200}{\frac{1}{1500}}$$

$$= \frac{1800000}{1}$$

$$= 1800000$$

$$Z_{3 \text{ min}} = 1,2 \times (Z_{L1} + Z_{L3})$$

$$\begin{aligned}
&= 1,2 \times ((5,6502 + j27,3013) + (5,6502 + j27,3013)) \\
&= 13,56047 + j 65,52317 \\
&= 66,9116 < 78,30^\circ \\
Z_3 \text{ maks1} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 1,2 Z_{L3}) \\
&= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (1,2 \times (5,6502 + j27,3013))) \\
&= 9,944 + j 48,050 \\
&= 49,0685 < 78,30^\circ \\
Z_3 \text{ maks2} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L3} + 0,8 Z_{L4}) \\
&= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (0,8 \times (5,6502 + j27,3013)) + 0,8 \times \\
&\quad (5,6502 + j27,3013))) \\
&= 11,75241 + j 56,78674 \\
&= 57,99012 < 78,30^\circ \\
Z_3 \text{ trf} &= 0,8 \times (Z_{L1} + (0,8 X_{trf})) \\
&= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (0,8 \times (j 91,4))) \\
&= 4,52015 + j 80,30505 \\
&= 80,4321 < 86,77^\circ \\
Z_3 \text{ pembanding} &= Z_{L1} + 1,2 Z_{L3} \\
&= (5,6502 + j27,3013) + (0,8 \times (5,6502 + j27,3013)) \\
&= 12,430 + j 60,06 \\
&= 61,3357 < 78,30^\circ
\end{aligned}$$



Zona 3 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 3 transformator. Oleh karena itu, nilai $Z_3 \text{ min}$ dipilih sebagai *setting* Zona 3 pada GI Baubau.

$$Z_3 \text{ Primer} = Z_3 \text{ min}$$

$$\begin{aligned}
Z_3 \text{ Sekunder} &= n_3 \times Z_{3p} \\
&= 0,8 \times (13,56047 + j 65,52317) \\
&= 10,8483 + j 52,419 \\
&= 53,5293 < 78,30^\circ
\end{aligned}$$

4.5.3 Perhitungan Nilai Impedansi Penganturan Relai Jarak GI PLTMG - GI Raha

Keterangan

$$Z_{L1} = 5,6502 + j27,3013 \Omega$$

$$Z_{L2} = 5,6502 + j27,3013 \Omega$$

$$Z_{L3} = 5,6502 + j27,3013 \Omega$$

$$Z_{L4} = 0,6563 + j3,1744 \Omega$$

Keterangan

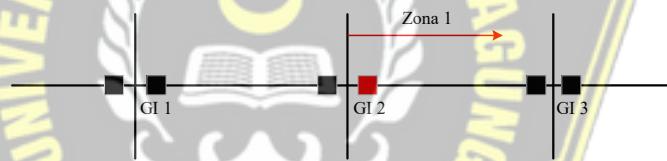
L_1 = Saluran GI PLTMG – GI Raha

L_2 = Penghantar setelah L_1 yang paling pendek.

L_3 = Penghantar setelah L_1 yang paling panjang

L_4 = Penghantar setelah L_3 yang paling pendek.

a. Zona 1



Gambar 4. 8 Jangkauan perlindungan zona 1 GI PLTMG – GI Raha

$$n = \frac{CT}{PT}$$

$$= \frac{1200}{1500}$$

$$= \frac{1}{1}$$

$$= 0,8$$

$$Z_{1 \text{ Primer}} = 0,8 \times Z_{L1}$$

$$= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013)$$

$$= 4,52015 + j 21,841$$

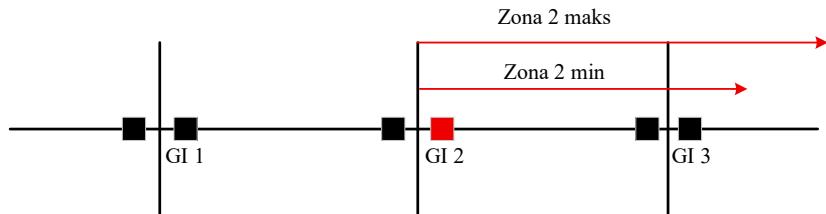
$$= 22,30389 \angle 78,30^\circ$$

$$Z_{1 \text{ Sekunder}} = n_1 \times Z_{1p}$$

$$= 0,8 \times (4,52015 + j 21,841)$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,616 + j 17,47 \\
 &= 17,8431 < 78,30^\circ
 \end{aligned}$$

b. Zona 2



Gambar 4. 9 Jangkauan perlindungan zona 2 GI PLTMG – GI Raha

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{CT}{PT} \\
 &= \frac{1200}{1500} \\
 &= \frac{1}{1} \\
 Z_{2 \text{ min}} &= 1,2 \times Z_{L1} \\
 &= 1,2 \times (5,6502 + j 27,3013) \\
 &= 6,78023 + j 32,76158 \\
 &= 33,4558 < 78,30^\circ \\
 Z_{2 \text{ maks}} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L2}) \\
 &= 0,8 \times (5,6502 + j 27,3013 + (0,8 \times (5,6502 + j 27,3013))) \\
 &= 8,136 + j 39,314 \\
 &= 40,1470 < 78,30^\circ \\
 Z_{2 \text{ trf}} &= Z_{L1} + (0,45 X_{trf}) \\
 &= 5,6502 + j 27,3013 + (0,45 \times (j 45,2)) \\
 &= 5,65019 + j 47,6188 \\
 &= 47,95286 < 83,2332^\circ \\
 Z_{2 \text{ pembanding}} &= Z_{L1} + 0,8 Z_{L2} \\
 &= (5,6502 + j 27,3013) + (0,8 \times (5,6502 + j 27,3013)) \\
 &= 10,170 + j 49,14 \\
 &= 50,1837578 < 78,3082^\circ
 \end{aligned}$$

Zona 2 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 2 transformator. Oleh karena itu, nilai Z_2 maks dipilih sebagai *setting* Zona 2 pada GI Baubau.

$$Z_2 \text{ Primer} = Z_2 \text{ maks}$$

$$\begin{aligned} Z_2 \text{ Sekunder} &= n_2 \times Z_{2p} \\ &= 0,8 \times (8,136 + j 39,314) \\ &= 6,5090 + j 31,451 \\ &= 32,1176 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

c. Zona 3



Gambar 4. 10 Jangkauan perlindungan zona 3 GI PLTMG – GI Raha

$$n$$

$$\begin{aligned} &= \frac{CT}{PT} \\ &= \frac{1200}{1500} \\ &= \frac{1}{1} \end{aligned}$$

$$Z_3 \text{ min}$$

$$\begin{aligned} &= 1,2 \times (Z_{L1} + Z_{L3}) \\ &= 1,2 \times ((5,6502 + j27,3013) + (5,6502 + j27,3013)) \\ &= 13,56047 + j 65,52317 \\ &= 66,9116 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

$$Z_3 \text{ maks1}$$

$$\begin{aligned} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 1,2 Z_{L3}) \\ &= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (1,2 \times (5,6502 + j27,3013))) \\ &= 9,944 + j 48,050 \\ &= 49,0685 < 78,30^\circ \end{aligned}$$

$$Z_3 \text{ maks2}$$

$$\begin{aligned} &= 0,8 \times (Z_{L1} + 0,8 Z_{L3} + 0,8 Z_{L4}) \\ &= 0,8 \times (5,6502 + j27,3013 + (0,8 \times (5,6502 + j27,3013) + 0,8 \times (0,6563 + j3,1744))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 8,5563 + j 41,3455 \\
&= 42,2215 < 78,30^\circ \\
Z_3 \text{ trf} &= 0,8 \times (Z_{L1} + (0,8 X_{trf})) \\
&= 0,8 \times (5,6502 + j 27,3013 + (0,8 \times (j 45,2))) \\
&= 4,5201 + j 50,7370 \\
&= 50,9380 < 84,90^\circ
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_3 \text{ pembanding} &= Z_{L1} + 1,2 Z_{L3} \\
&= (5,6502 + j 27,3013) + (0,8 \times (5,6502 + j 27,3013)) \\
&= 12,430 + j 60,06 \\
&= 61,3357 < 78,30^\circ
\end{aligned}$$

Zona 3 ditetapkan pada nilai terbesar yang masih berada di bawah batas zona 3 transformator. Oleh karena itu, nilai $Z_3 \text{ trf}$ dipilih sebagai *setting* Zona 3 pada GI Baubau.

$$\begin{aligned}
Z_3 \text{ Primer} &= Z_3 \text{ trf} \\
Z_3 \text{ Sekunder} &= n_3 \times Z_{3p} \\
&= 0,8 \times (4,5201 + j 50,7370) \\
&= 3,6161 + j 40,590 \\
&= 40,75040 < 84,908^\circ
\end{aligned}$$

Berikut ini adalah data pengaturan aktual relai jarak yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULTG Baubau.

Tabel 4. 2 Hasil perhitungan nilai pengaturan relai jarak

No.	Lokasi GI	Arah Bay	Merk	Tipe	Z1	Z2	Z3	T_{Z1}	T_{Z2}	T_{Z3}
1.	GI Baubau	PLTMG Baubau	Toshiba	GRL 200	2,075	3,734	30,624	0	0,4	1,6
2.	GI PLTMG Baubau	Baubau	Toshiba	GRL 200	2,075	3,734	18,009	0	0,4	1,6
3.	GI Raha	PLTMG Baubau	MICOM	P545	17,843	26,764	53,529	0	0,4	1,2

No.	Lokasi GI	Arah Bay	Merk	Tipe	Z1	Z2	Z3	T _{Z1}	T _{Z2}	T _{Z3}
4.	GI PLTMG Baubau	GI Raha	MICOM	P545	17,843	32,118	40,750	0	0,4	1,2

Berdasarkan hasil *setting* relai jarak yang termuat pada Tabel 4.8, terlihat adanya diskrepansi signifikan pada nilai impedansi Zona 1 (Z1) antara saluran Baubau – PLTMG Baubau ($2,075 \Omega$) dan saluran Raha – PLTMG Baubau (17,843 Ω). Perbedaan ini secara teknis menunjukkan variasi besar dalam panjang saluran atau jenis konduktor, namun secara prinsip proteksi, *setting* waktu kerja telah dikoordinasikan secara tepat: T_{Z1} instan (0 detik) sebagai proteksi utama, diikuti $T_{Z2}=0,4$ detik dan $T_{Z3}=1,2$ detik hingga 1,6 detik, yang menjamin selektivitas melalui prinsip *time-grading* antara relai-relai yang berdekatan.

Dalam kasus gangguan aktual pada GI Raha (Kondisi 2), hasil pengukuran impedansi terukur menunjukkan nilai $3,2350 \Omega$ (Fasa R) dan $14,103 \Omega$ (Fasa T). Dengan mengacu pada *setting* Z1 relai GI Raha sebesar 17,843 Ω , kedua nilai impedansi gangguan tersebut secara pasti berada dalam jangkauan Zona 1 (*underreach Z1*). Sesuai prinsip proteksi, setiap gangguan yang jatuh dalam Z1 harus diisolasi secara instan oleh Pemutus Tenaga (PMT) tanpa waktu tunda, yang dibuktikan dengan keluaran perintah "Trip Zona 1" pada kedua fasa. Kinerja ini menegaskan bahwa relai beroperasi secara optimal dan cepat (*speed*) dalam mendekksi dan mengisolasi gangguan, terutama Gangguan Fasa R yang terjadi sangat dekat dengan terminal *busbar* (impedansi terukur sangat rendah). Ketiadaan data pada "Status Teleproteksi" semakin memperkuat temuan ini, menunjukkan bahwa fungsi *carrier-aided tripping* tidak teraktivasi karena relai berhasil beroperasi secara mandiri dan instan di Zona 1. Dengan demikian, *setting* relai yang ada terbukti mampu memberikan proteksi utama yang andal pada segmen saluran tersebut.

4.6 Simulasi Relai Distance Menggunakan *Software DIgSILENT PowerFactory*

24.0.2.0

Simulasi relai jarak pada sistem transmisi 150 kV Baubau – PLTMG Baubau – Raha dilakukan dengan menggunakan DIgSILENT PowerFactory versi 24.0.2.0. Perangkat lunak ini dipilih karena memiliki kemampuan analisis proteksi yang komprehensif, termasuk evaluasi koordinasi antar-relai, simulasi gangguan hubung singkat, serta pemodelan karakteristik impedansi. Dalam simulasi dibuat beberapa skenarion simulasi yaitu :

1. Skenario 1 simulasi relai jarak menggunakan setting aktual
2. Skenario 2 simulasi relai jarak menggunakan setting hasil perhitungan baru
3. Skenario 3 simulasi relai jarak setting hasil perhitungan baru dengan menambahkan 1 Gardu Induk yang diletakkan di depan Gardu Induk Raha.

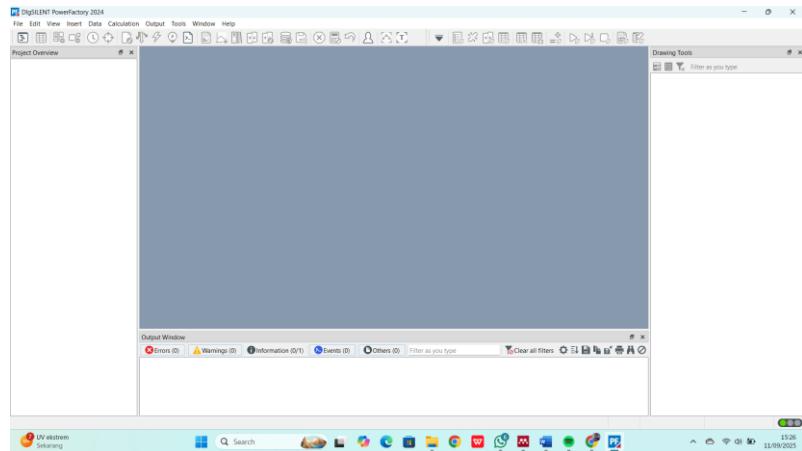
Ketiga skenario diuji terhadap jenis gangguan: 3-phase fault, 2-phase fault, dan 2-phase-to-ground, dengan lokasi gangguan divariasikan dari 10% sampai 90% panjang saluran (secara bertahap) untuk memetakan karakteristik R–X dan time-distance.

4.6.1 Langkah–Langkah Simulasi Relai Jarak pada simulasi *DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0*

Pemodelan sistem proteksi relai jarak dilakukan dengan menggunakan DIgSILENT PowerFactory versi 24.0.2.0 melalui tahapan berikut:

1. Menjalankan Program

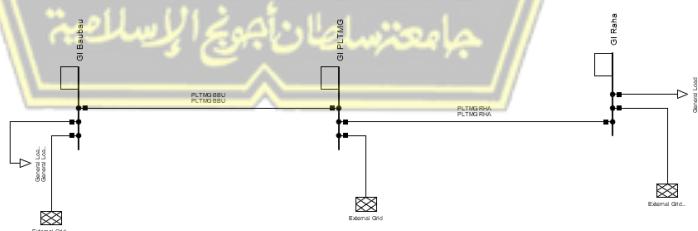
Setelah proses instalasi selesai, langkah pertama adalah membuka aplikasi PowerFactory 24.0.2.0 untuk memulai simulasi.



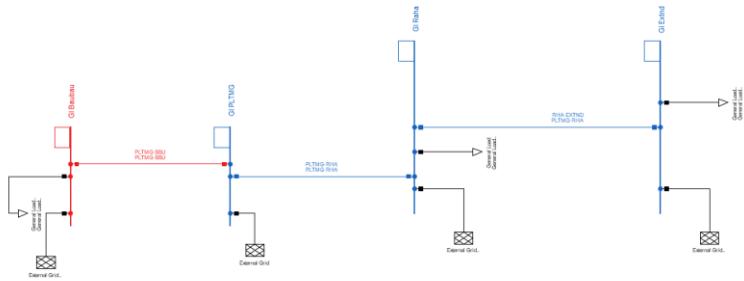
Gambar 4. 11 Tampilan Layar Awal Software DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0

2. Membuat Proyek Baru dan Rangkaian Pengganti

Dibuat sebuah *project* baru yang berisi rangkaian pengganti. Rangkaian ini berfungsi untuk mempermudah analisis dengan merepresentasikan komponen sistem tenaga listrik ke dalam bentuk model matematis. Dalam penelitian ini, rangkaian pengganti relai jarak pada SUTT 150 kV Baubau – PLTNG Baubau dan SUTT 150 kV PLTNG Baubau - Raha yang dibangun berdasarkan konfigurasi sistem 150 kV PLN UP2B Makassar.



Gambar 4. 12 Tampilan Rangkaian Pengganti Aktual di DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0



Gambar 4. 13 Tampilan Rangkaian Pengganti Asumsi Penambahan Jaringan di DIgSILENT PowerFactory 24.0.2.0

3. Menentukan Parameter Komponen

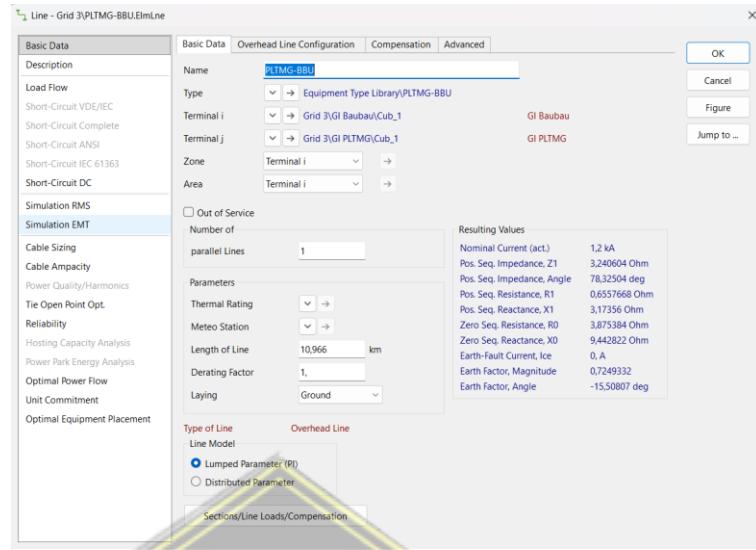
Setiap komponen pada rangkaian pengganti diberikan parameter sesuai data penelitian.

- Tegangan nominal: memasukkan nilai tegangan operasi busbar gardu induk, yaitu 150 kV, sesuai kondisi lapangan.



Gambar 4. 14 Penginputan Tegangan Nominal/Tegangan Kerja

- Panjang penghantar: menginput panjang saluran pada SUTT 150 kV PLTMG Baubau – Baubau, dan SUTT 150 kV PLTMG – Raha (Tabel 3.1).



Gambar 4. 15 Penginputan Panjang Penghantar/Panjang Saluran

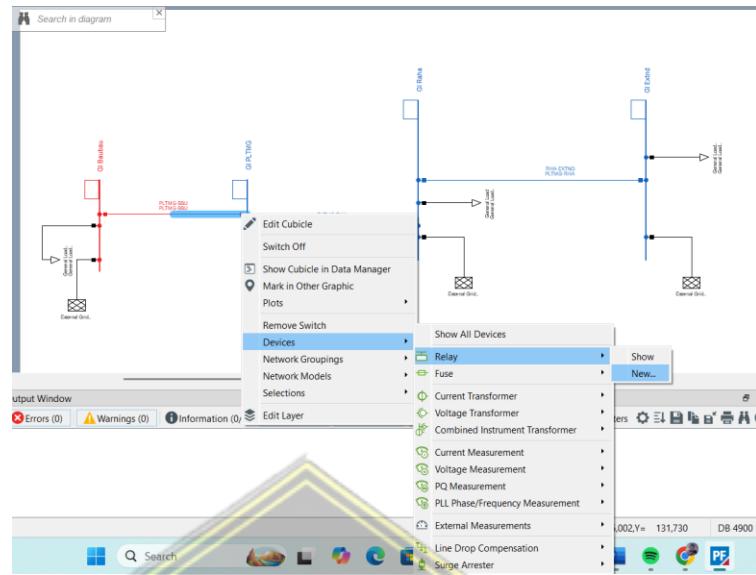
- Impedansi saluran: menambahkan nilai impedansi urutan positif dan nol dari Tabel 3.2.



Gambar 4. 16 Penginputan Impedansi Saluran

4. Menambahkan Relai Jarak

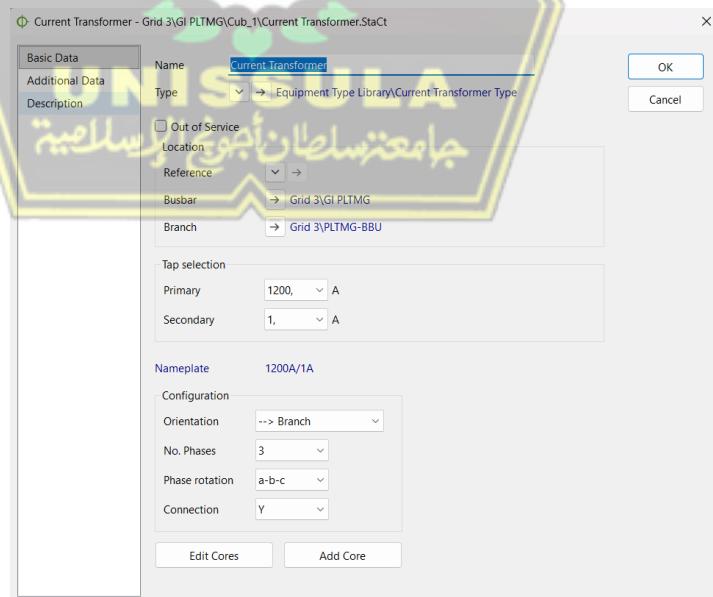
Relai distance dimasukkan ke dalam rangkaian dengan memilih tipe relai dari *library* PowerFactory 24.0.2.0. Pada simulasi ini digunakan relai jarak dengan karakteristik Mho.



Gambar 4. 17 Penginputan Relai Jarak

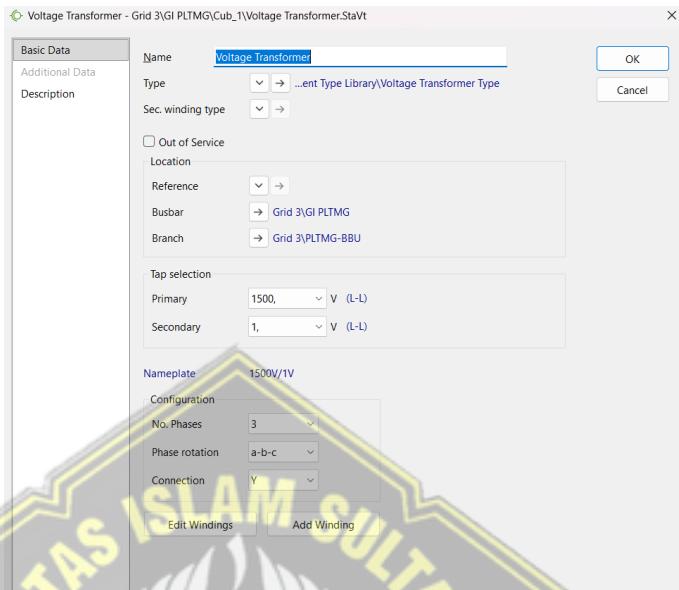
Setelah relai ditambahkan, dilakukan juga pemodelan CT dan VT, serta penentuan setting impedansi dan waktu operasi agar sesuai standar proteksi.

- Pemodelan CT: dibuat model CT sesuai data CT yang terpasang di SUTT 150 kV PLTMG Baubau – Baubau, dan SUTT 150 kV PLTMG – Raha (Tabel 3.3).



Gambar 4. 18 Pemodelan CT

- Pemodelan VT: dibuat model VT sesuai spesifikasi VT pada saluran yang sama (Tabel 3.3).



Gambar 4. 19 Pemodelan VT

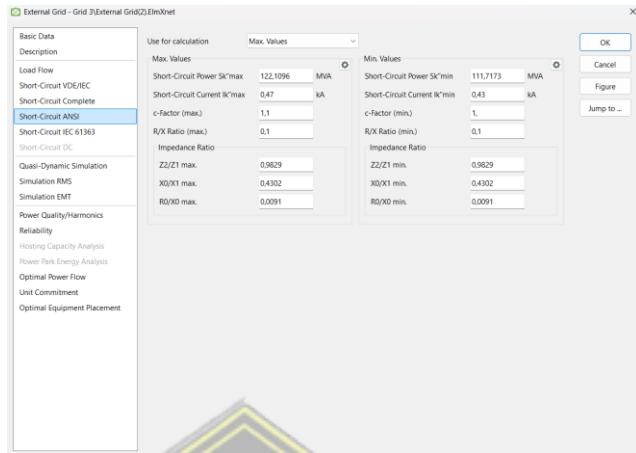
5. Menentukan Setting Relai Distance

- Setting impedansi: memasukkan nilai impedansi untuk zona 1, zona 2, dan zona 3 sesuai pengaturan aktual dan hasil perhitungan. Input dilakukan pada kolom impedansi primer, lalu diverifikasi pada sisi sekunder agar persentase proteksi sudah sesuai. Data lengkap impedansi tiap saluran dapat dilihat pada Tabel 4.6. dan Tabel 4.8.
- Setting waktu kerja: memasukkan waktu operasi pada masing-masing zona proteksi sesuai hasil perhitungan.

6. Menambahkan External Grid

External grid dihubungkan pada bus GI 150 kV Baubau, GI 150 kV PLTMG Baubau dan GI 150 kV Raha. Parameter yang dimasukkan berupa nilai MVAsc hubung singkat tiga fasa dan rasio R/X.

- Berdasarkan Tabel 3.5, arus hubung singkat tiga fasa di GI Baubau adalah 0,43 kA, GI PLTMG Baubau 0,42 kA sedangkan di GI Raha sebesar 0,39 kA.
- Nilai MVAsc kemudian dihitung menggunakan persamaan dasar hubungan antara arus hubung singkat dan tegangan sistem.

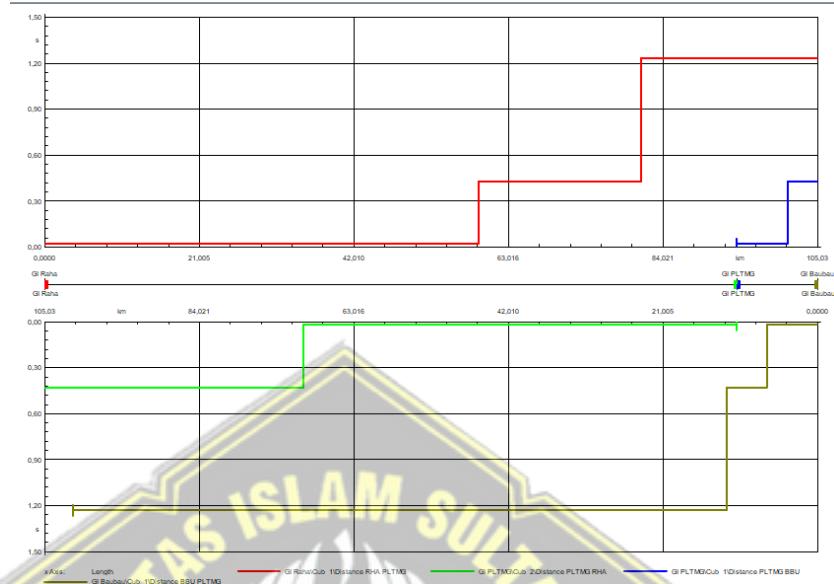


Gambar 4. 20 Penginputan Paramater External Grid

4.6.2 Hasil Time Distance Diagram Pada Simulasi

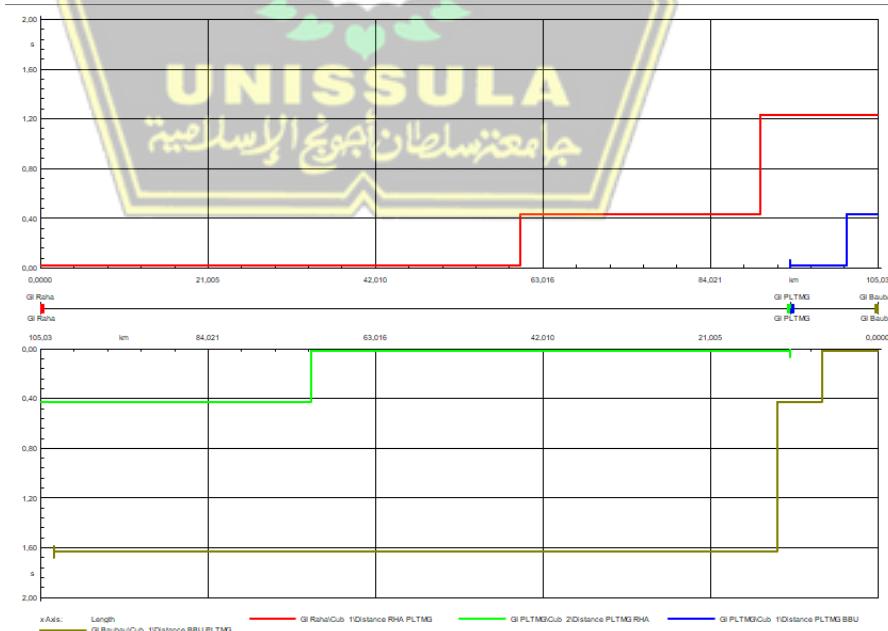
Setelah seluruh parameter dimasukkan, koordinasi antar-relai dapat divisualisasikan melalui fitur time-distance diagram. Fitur ini digunakan untuk memverifikasi bahwa setting impedansi dan waktu kerja relai telah sesuai dengan hasil perhitungan. Pada simulasi diperoleh tiga bentuk time-distance diagram, yaitu untuk kondisi pengaturan aktual, hasil perhitungan baru, serta perhitungan baru dengan penambahan jaringan. Berikut tampilan bentuk time distance diagram yang diperoleh :

- a. Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual



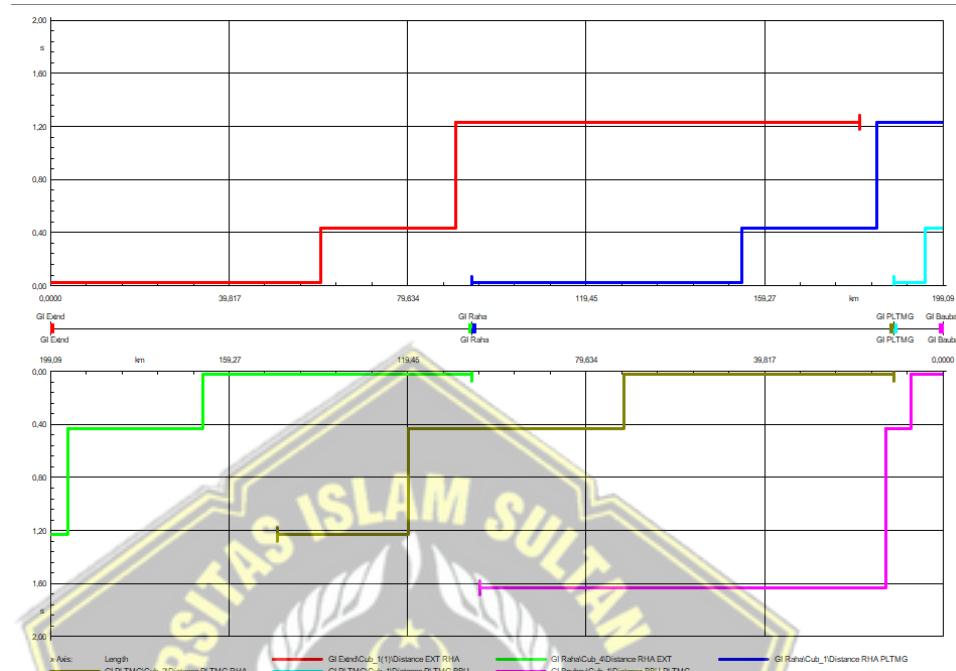
Gambar 4. 21 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual

- b. Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan baru



Gambar 4. 22 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual

c. Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha - Extend pengaturan aktual



Gambar 4. 23 Time Distance Diagram Saluran Baubau – PLTMG Baubau – Raha pengaturan aktual dengan penambahan jaringan

4.7 Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi 150 kV Baubau–Raha dengan tiga kondisi setting relai jarak, yaitu: setting aktual, setting hasil perhitungan baru, serta setting hasil perhitungan baru dengan asumsi penambahan saluran baru. Melalui simulasi ini dapat dianalisis performa sekaligus relevansi pengaturan relai jarak terhadap kondisi sistem eksisting maupun sistem yang telah dimodifikasi. Jenis gangguan yang diuji terdiri dari tiga kategori, yaitu:

- gangguan hubung singkat tiga fasa,
- gangguan hubung singkat dua fasa, dan
- gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Lokasi gangguan diambil dari data total panjang saluran yang ditinjau dari GI Baubau dan juga data gangguan yang terjadi pada tahun 2024. Skenario ini dibuat agar dapat memperlihatkan secara menyeluruh kinerja relai jarak dalam

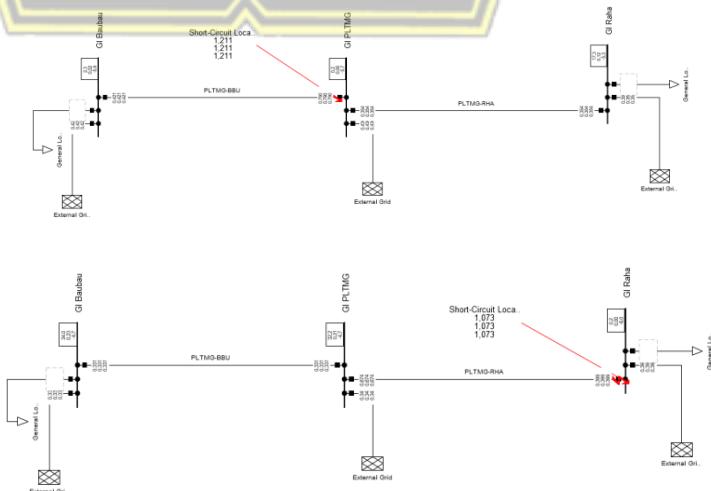
mendeteksi dan mengisolasi gangguan. Rincian skenario gangguan hubung singkat tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Analisa Koordinasi Pengaturan Relai Jarak Setelah Perhitungan Ulang

Skenario	Setting Proteksi	Lokasi Gangguan
Skenario 1	Setting Proteksi Aktual	10% (10,483 km)
		Gangguan 2024
Skenario 2	Setting Proteksi Perhitungan Ulang	10% (10,483 km)
		Gangguan 2024
Skenario 3	Setting Proteksi Perhitungan Ulang dengan asumsi penambahan jaringan	10% (10,483 km)
		Gangguan 2024 (103,66 km)

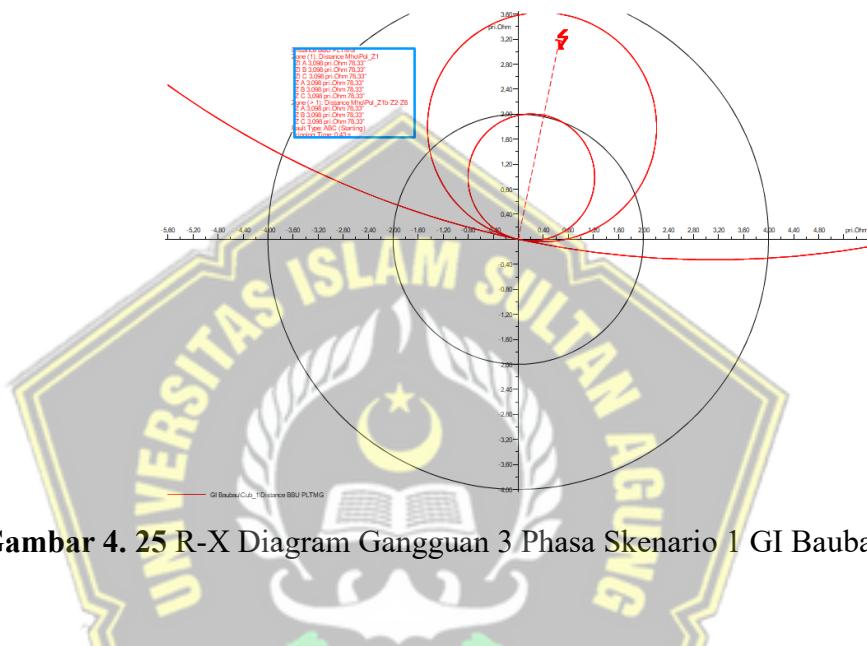
a. Skenario 1 Setting Proteksi Aktual

Skenario 1 merupakan simulasi gangguan menggunakan setting aktual dengan lokasi gangguan yang terjadi pada jarak 10,483 km dari GI Baubau dan titik lokasi pada salah satu gangguan yang pernah terjadi pada tahun 2024.

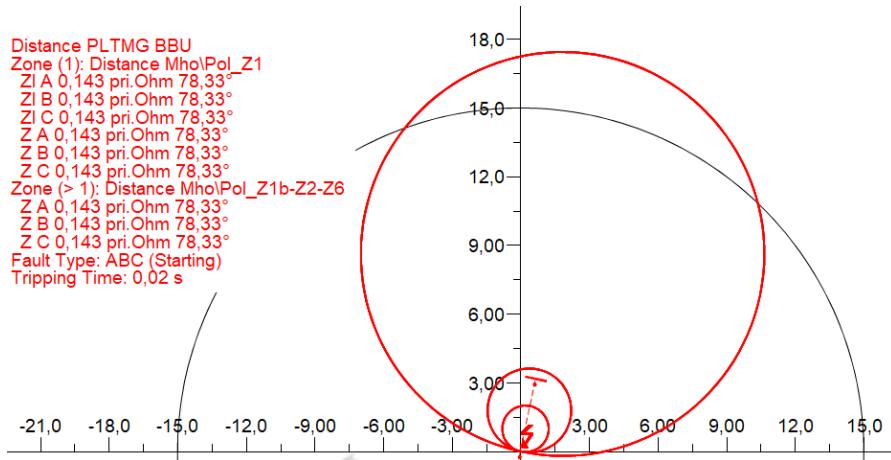


Gambar 4. 24 Letak Gangguan Skenario 1 (10,843 km dan 103,66 km dari GI Baubau)

Dari simulasi gangguan dengan skenario satu dapat dilihat impedansi gangguan yang terbaca relai, sehingga dapat diidentifikasi gangguan tersebut masuk ke dalam zona berapa. Berikut ini adalah tampilan impedansi gangguan yang terjadi :

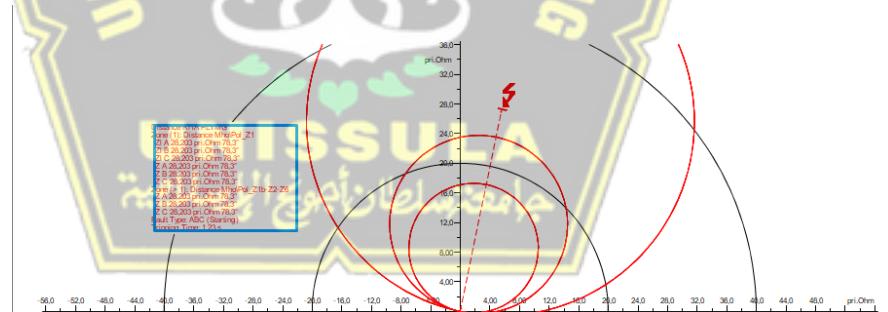


Gambar 4.23 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Baubau dengan pengaturan aktual dalam bentuk diagram R-X. Lingkaran merah menggambarkan daerah kerja relai, sedangkan titik dengan simbol petir menunjukkan posisi impedansi gangguan hubung singkat yang terjadi. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 2, yang berarti GI Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 2.



Gambar 4. 26 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 1 GI PLTMG Baubau

Gambar 4.24 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI PLTMG Baubau dengan pengaturan aktual dalam bentuk diagram R–X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 1, yang berarti GI Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 1.

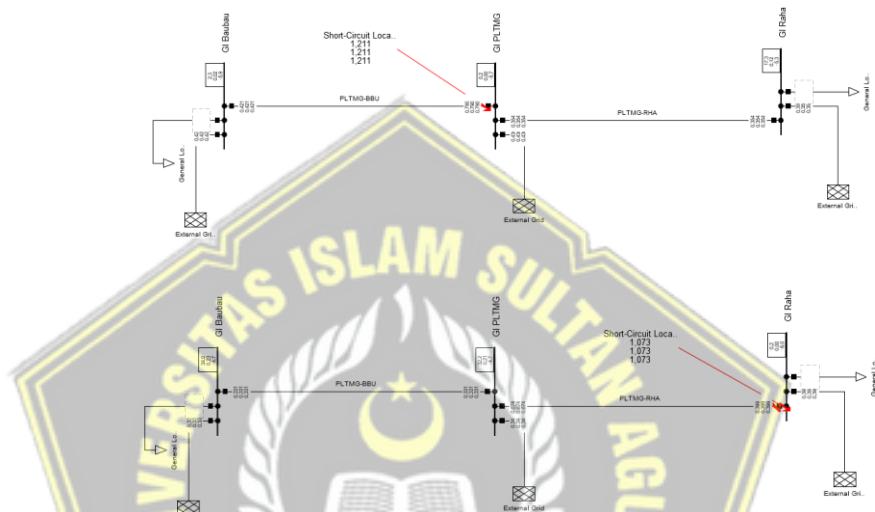


Gambar 4. 27 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 1 GI Raha

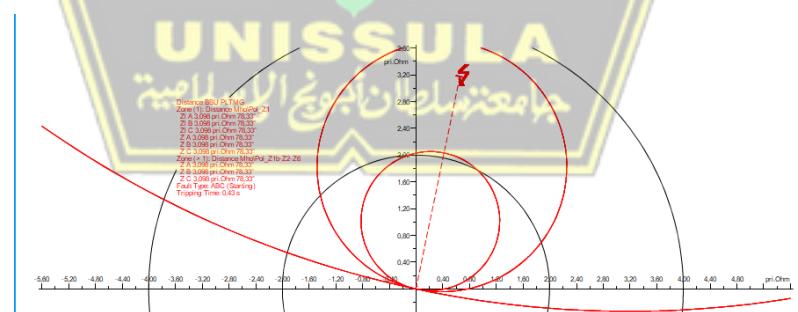
Gambar 4.25 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Raha dengan pengaturan aktual dalam bentuk diagram R–X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 3, yang berarti GI Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 3.

b. Skenario 2 Setting Proteksi Perhitungan Ulang

Skenario 2 merupakan simulasi gangguan menggunakan setting proteksi perhitungan ulang dengan lokasi gangguan yang terjadi pada jarak 10,483 km dari GI Baubau dan titik lokasi pada salah satu gangguan yang pernah terjadi pada tahun 2024.



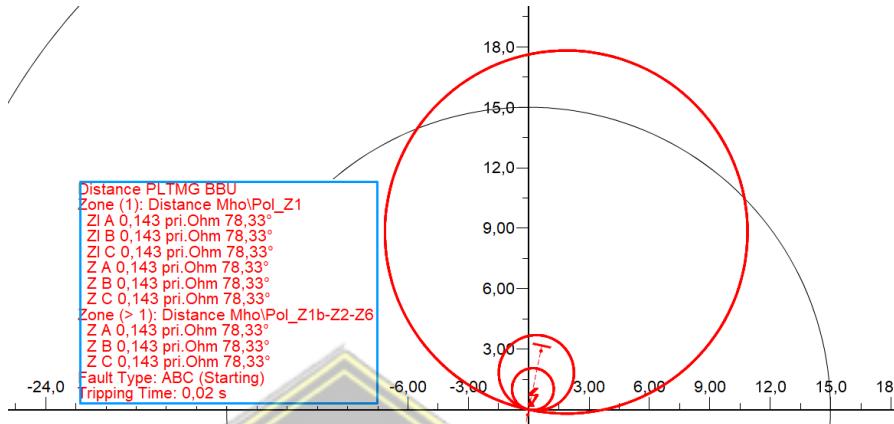
Gambar 4. 28 Letak Gangguan Skenario 2



Gambar 4. 29 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI Baubau

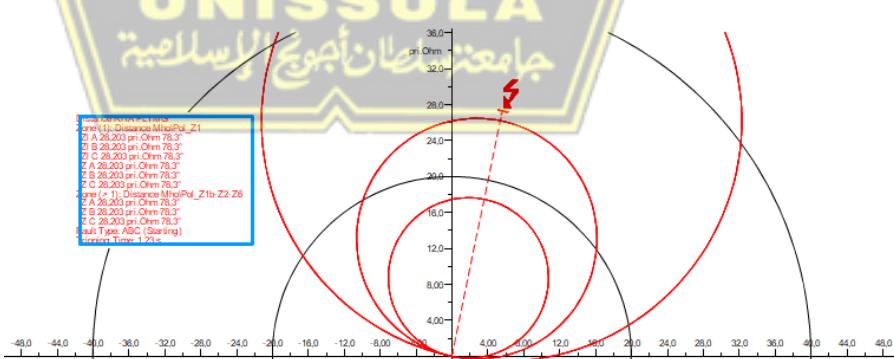
Gambar 4.27 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Baubau dengan pengaturan baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan

terdeteksi di zona 2, yang berarti GI Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 2.



Gambar 4. 30 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI PLTMG Baubau

Gambar 4.28 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI PLTMG Baubau dengan pengaturan baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 1, yang berarti GI PLTMG Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 1.



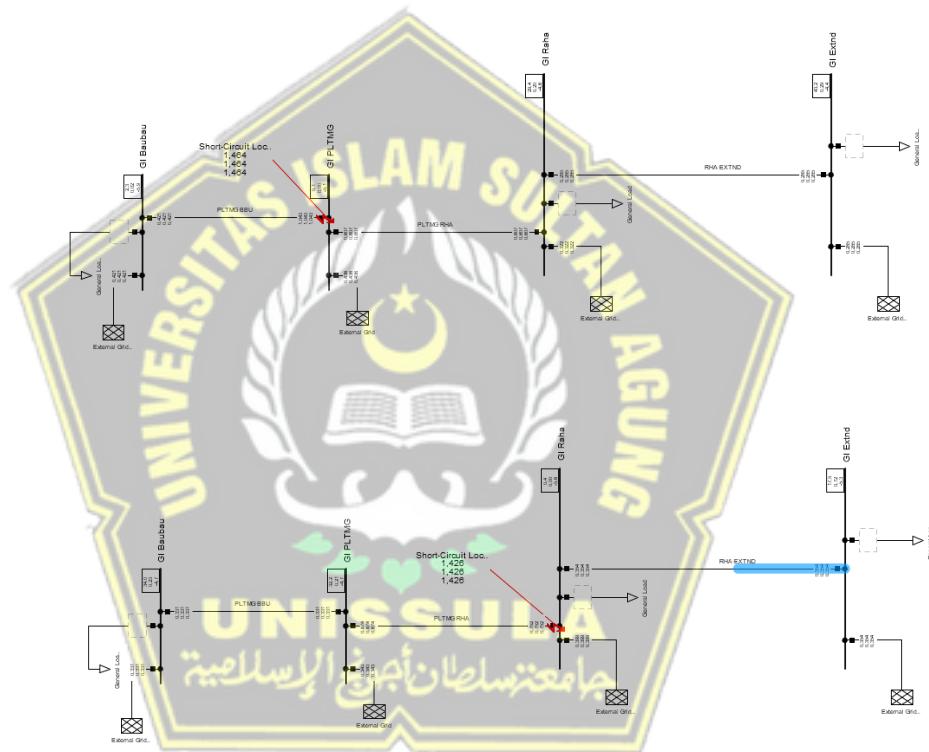
Gambar 4. 31 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 2 GI Raha

Gambar 4.29 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Raha dengan pengaturan baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan

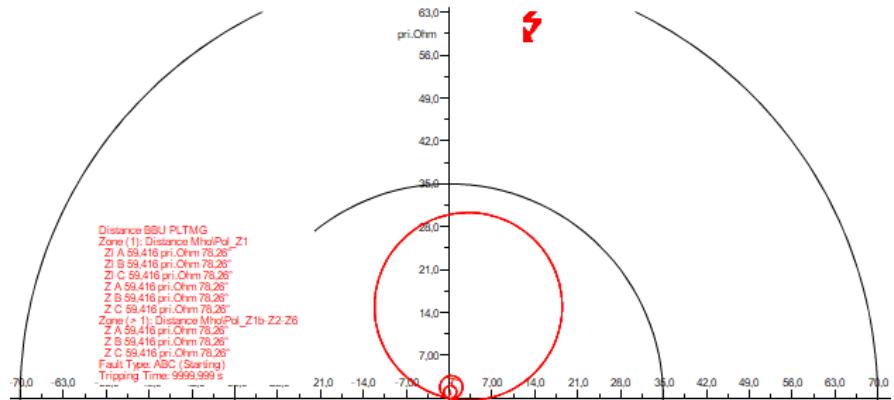
terdeteksi di zona 3, yang berarti GI Raha mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 3.

- c. Skenario 3 Setting Proteksi Perhitungan Ulang dengan asumsi penambahan jaringan

Skenario 2 merupakan simulasi gangguan menggunakan setting proteksi perhitungan ulang dengan lokasi gangguan yang terjadi pada jarak 10,483 km dari GI Baubau dan titik lokasi pada salah satu gangguan yang pernah terjadi pada tahun 2024.

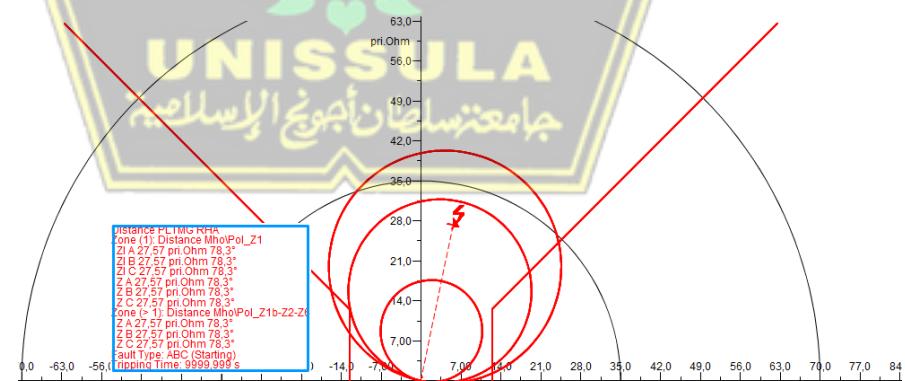


Gambar 4. 32 Letak Gangguan Skenario 3



Gambar 4. 33 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Baubau

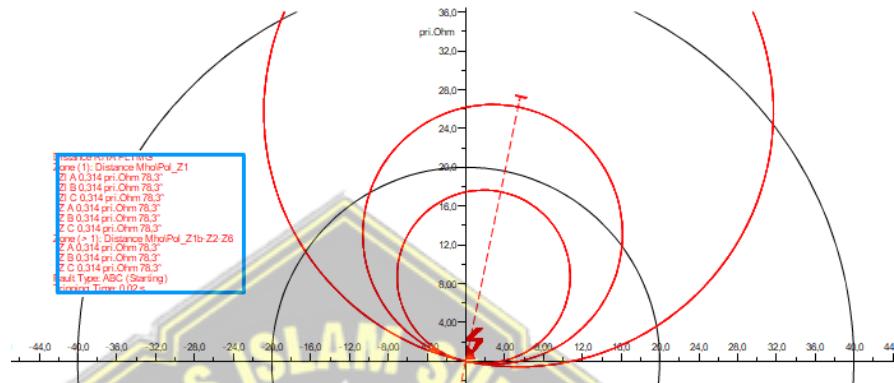
Gambar 4.31 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Baubau dengan pengaturan baru dengan asumsi apabila ada penambahan GI Baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di luar zona proteksi relai yang telah di setting, yang berarti GI Baubau tidak merasakan gangguan tersebut.



Gambar 4. 34 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI PLTMG

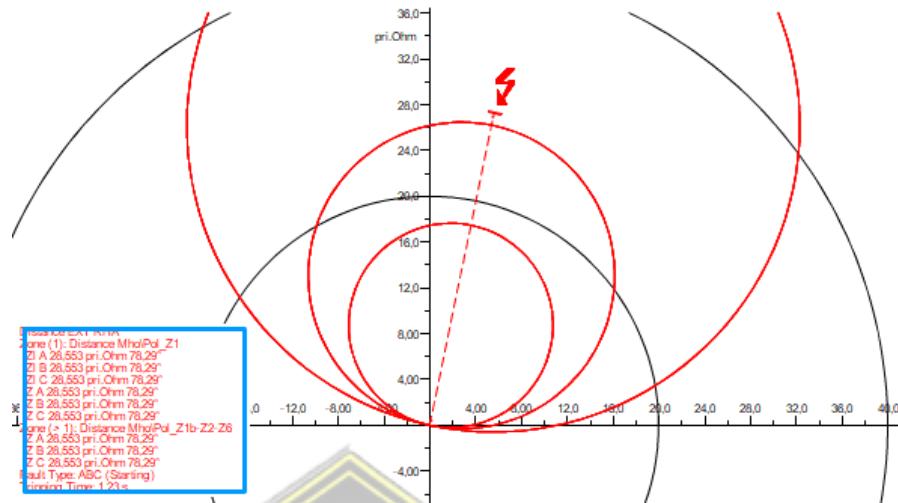
Gambar 4.32 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI PLTMG Baubau dengan pengaturan baru dengan asumsi apabila ada penambahan GI Baru dalam bentuk diagram

R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 2, yang berarti GI PLTMG Baubau mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona .



Gambar 4. 35 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Raha

Gambar 4.33 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Raha menggunakan pengaturan baru dengan asumsi apabila ada penambahan GI Baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 1, yang berarti GI Raha mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 1.



Gambar 4.36 R-X Diagram Gangguan 3 Phasa Skenario 3 GI Raha

Gambar 4.34 di atas menunjukkan karakteristik kerja relai jarak (distance relay) pada GI Tambahan menggunakan pengaturan baru dengan asumsi apabila ada penambahan GI Baru dalam bentuk diagram R-X. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa gangguan terdeteksi di zona 3, yang berarti GI Raha mendeteksi gangguan tersebut sebagai gangguan yang terjadi di Zona 3.

4.8 Analisa Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat Menggunakan *Software DIGSILENT PowerFactory 24.0.2.0*

DIGSILENT PowerFactory 24.0.2.0

Setelah simulasi menggunakan *Software DIGSILENT PowerFactory 24.0.2.0* dilaksanakan, didapatkan data hasil simulasi yang selanjutnya akan dilakukan analisa terkait data tersebut.

4.8.1 Analisa Hasil *Time Distance Diagram*

Berdasarkan hasil simulasi *time distance diagram* yang dilakukan menggunakan *Software DIGSILENT PowerFactory 24.0.2.0*, menunjukkan bahwa pada pengaturan aktual, *time-distance diagram* menunjukkan relai jarak di GI Raha, GI PLTMG, dan GI Baubau sudah bekerja sesuai zona proteksi, namun zona 1 masih terlalu pendek sehingga berpotensi *underreach*. Pada hasil perhitungan

baru, koordinasi relai menjadi lebih selektif dan sesuai standar PLN, dengan zona 1 mencakup 80–85% saluran serta waktu tunda yang lebih teratur sehingga risiko *underreach* maupun overlap berkurang. Sementara itu, penambahan gardu induk menyebabkan perubahan impedansi dan jangkauan zona, sehingga setting lama tidak lagi relevan dan menimbulkan potensi *overreach* atau *underreach*. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengaturan aktual masih berfungsi tetapi kurang optimal, setting baru memberikan hasil terbaik, dan penambahan gardu induk menuntut penyesuaian ulang setting agar proteksi tetap andal.

4.8.2 Analisa Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat

a. Skenario 1 – Setting Aktual

Pada pengaturan aktual, hasil R–X diagram menunjukkan bahwa relai di GI Baubau mendeteksi gangguan pada zona 2, GI PLTMG Baubau mendeteksi gangguan pada zona 1, sedangkan GI Raha mendeteksi pada zona 3. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan persepsi lokasi gangguan antar-relai, meskipun koordinasi masih berjalan. Kelemahan utama skenario ini adalah zona 1 yang terlalu pendek, sehingga berpotensi menimbulkan *underreach* jika gangguan terjadi di ujung saluran.

b. Skenario 2 – Setting Perhitungan Ulang

Pada setting hasil perhitungan baru, koordinasi proteksi menjadi lebih baik. Relai di GI Baubau tetap mendeteksi gangguan di zona 2, GI PLTMG Baubau di zona 1, dan GI Raha di zona 3, sama seperti kondisi aktual. Namun, perbedaannya terletak pada akurasi jangkauan zona yang telah disesuaikan dengan standar PLN (Z_1 mencakup 80–85% panjang saluran). Dengan demikian, sistem proteksi menjadi lebih selektif, cepat, dan mampu mengurangi risiko *underreach* maupun *overreach*.

c. Skenario 3 – Setting Perhitungan Ulang dengan Penambahan GI

Pada kondisi penambahan gardu induk baru, hasil simulasi menunjukkan perubahan signifikan. Relai di GI Baubau tidak lagi merasakan gangguan karena titik gangguan berada di luar zona proteksinya. GI PLTMG Baubau mendeteksi gangguan pada zona 2, sementara GI Raha mendeteksi gangguan

di zona 1. Hal ini membuktikan bahwa perubahan topologi jaringan menggeser distribusi impedansi, sehingga setting lama menjadi kurang relevan. Akibatnya, koordinasi antar-relai berkurang dan dapat menimbulkan risiko overreach atau underreach jika tidak dilakukan penyesuaian ulang.

4.9 Rugi Daya Akibat Adanya Gangguan

Gangguan pada sistem transmisi tenaga listrik tidak hanya berdampak pada kontinuitas pelayanan energi, tetapi juga menimbulkan kerugian energi yang terhenti penyalurannya. Dalam kasus ini, terjadi gangguan yang menyebabkan pemadaman dengan durasi selama 2 jam 23 menit atau setara dengan 2,383 jam. Beban yang terdampak oleh gangguan ini adalah sebesar 8,7 MW.

Untuk menghitung energi yang tidak tersalurkan selama gangguan, digunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Energi Tidak Tersalur (kWh)} &= \text{Beban Padam (MW)} \times \text{Durasi (jam)} \times 1000 \\ &= 8,7 \times 2,383 \times 1000 = 20.732,1 \text{ kWh}\end{aligned}$$

Selanjutnya, untuk mengetahui nilai kerugian ekonomi akibat gangguan ini, digunakan harga energi berdasarkan tarif rata-rata sebesar Rp1.444/kWh, sehingga:

$$\text{Kerugian Ekonomi} = 20.732,1 \times 1.444 = \text{Rp}29.939.622,4$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan selama penelitian, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut::

1. Evaluasi menunjukkan bahwa koordinasi setting relai jarak pada ketiga GI sudah bekerja selektif dan sesuai zona proteksi: relai terdekat membaca gangguan pada zona 1 dan memberi trip instan, sedangkan relai lain berfungsi sebagai cadangan dengan delay sesuai zona 2 dan zona 3. Pemanfaatan skema teleproteksi (PUTT) mempercepat pemutusan serempak ketika relai di satu sisi mendeteksi zona 1 sehingga meningkatkan kecepatan isolasi dan mengurangi risiko kerusakan. Secara keseluruhan, pengaturan aktual masih berfungsi, namun kurang efisien karena adanya potensi underreach. Hasil perhitungan baru lebih optimal, dengan koordinasi proteksi yang selektif dan sesuai standar PLN. Namun, penambahan gardu induk mengubah kondisi sistem secara signifikan, sehingga seluruh setting relai perlu disesuaikan ulang agar koordinasi dan keandalan proteksi tetap terjaga. Kondisi ini diperbaiki pada setting hasil perhitungan ulang.
2. Penambahan gardu/penambahan saluran mengubah topologi dan distribusi impedansi sehingga beberapa relai lama mengalami pergeseran zona proteksi: pada beberapa kasus relai di GI Baubau tidak lagi merasakan gangguan (gangguan berada di luar jangkauan zona yang telah diset), sementara relai lain bergeser ke zona yang berbeda. Dengan kata lain, setting lama menjadi kurang relevan. Penambahan jaringan menuntut recalculation dan resetting ulang seluruh setting relai agar selektivitas dan keamanan proteksi tetap terjaga.
3. Dari simulasi gangguan (3-Phasa, 2-Phasa, dan 2-Phasa ke Ground) pada berbagai lokasi, relai menunjukkan perilaku yang diharapkan: relai di GI yang paling dekat bekerja instan pada zona 1; relai di sisi lain bekerja

sebagai cadangan dengan delay (mis. 0,4 s untuk zona 2, 1,2 s untuk zona 3). Skema teleproteksi memungkinkan trip serempak (mis. PUTT) sehingga meskipun suatu relai membaca gangguan pada zona 2, sinyal dari relai yang membaca zona 1 dapat mempercepat tindakan di relai lain. Secara keseluruhan, kinerja relai teruji baik. Setting perhitungan ulang meningkatkan selektivitas dan menurunkan risiko underreach/overlap dibanding setting aktual.

4. Berdasarkan hasil perhitungan, gangguan pada sistem transmisi yang menyebabkan pemadaman selama 2 jam 23 menit dengan beban padam sebesar 8,7 MW mengakibatkan energi tidak tersalurkan sebesar 20.732,1 kWh. Jika dikalikan dengan tarif rata-rata energi listrik sebesar Rp1.444/kWh, maka nilai kerugian ekonomi akibat gangguan tersebut mencapai sekitar Rp29.939.622,40. Hal ini menunjukkan bahwa gangguan pada sistem transmisi tidak hanya berdampak teknis, tetapi juga menimbulkan kerugian finansial yang signifikan, sehingga penguatan sistem proteksi sangat penting untuk meminimalkan risiko serupa di masa mendatang.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dapat mengembangkan metode dan pendekatan yang digunakan dalam analisis koordinasi *setting* relai jarak, baik dari segi simulasi, pengujian aktual di lapangan, maupun evaluasi lebih mendalam terhadap dinamika sistem saat terjadi gangguan. Penelitian dapat diperluas dengan menambahkan perbandingan data relai dari merek atau tipe berbeda, serta data gangguan aktual pada tahun-tahun sebelumnya, sehingga dapat dilakukan analisa yang lebih komprehensif mengenai respons proteksi terhadap berbagai jenis gangguan.

Selain itu, peneliti berikutnya juga diharapkan dapat mengeksplorasi topik yang berkaitan dengan kinerja relai jarak dalam kondisi abnormal, seperti kesalahan pengukuran pada trafo arus atau tegangan, kegagalan komunikasi sistem teleproteksi, maupun pengaruh gangguan dari sisi primer atau sekunder

terhadap keandalan sistem proteksi. Penelitian lanjutan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi lebih lanjut dalam menentukan keandalan dan batas kelayakan operasi sistem proteksi, serta mampu mendeteksi secara dini risiko kegagalan proteksi yang dapat mengganggu kelangsungan penyaluran tenaga listrik di jaringan transmisi tegangan tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Edi. Sutrisno, “Analisa Pengaruh Perubahan Impedansi Penghantar SUTT 150 kV Terhadap Setting Relay Jarak Sebagai Pengaman Gardu Induk 150 kV Kudus-Jekulo-Pati,” 2023, *Universitas Islam Sultan Agung*.
- [2] A. YUDAWAN, “ANALISA KOORDINASI ZONA PROTEKSI SEBAGAI PENGAMAN SALURAN TRANSMISI 150 kV MENGGUNAKAN RELAI JARAK ANTARA GI PATI KE ARAH JEKULO,” 2020, *Universitas Islam Sultan Agung Semarang*.
- [3] A. F. F. Ahmad, “ANALISIS RESETTING RELAI JARAK SALURAN KABEL TEGANGAN TINGGI (SKTT) 150 KV PLUMPANG-KANDANG SAPI# 2 PADA GARDU INDUK 150 KV PLUMPANG,” 2024, *Universitas Islam Sultan Agung Semarang*.
- [4] F. A. Rista, “PERHITUNGAN JARAK GANGGUAN HUBUNG SINGKAT SALURAN KABEL UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV PENYULANG KPK 01 SEMARANG,” 2023, *UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG*.
- [5] I. A. Wibowo, “Optimasi Keandalan Proteksi Relai Distance pada Penghantar 150 kV Sunyaragi -- Jatigede,” 2025, *Semarang, Indonesia*.
- [6] H. A. Hasnuwardan, “Analisa Koordinasi Setting Relai Jarak pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV GI Sluke – Rembang,” 2019, *Semarang, Indonesia*. [Online]. Available: <https://repository.unissula.ac.id/16194/>
- [7] G. Dyestisari, “Analisa Koordinasi Setting Relai Jarak pada Saluran Transmisi 150 kV Ungaran – Pedurungan,” 2018, *Semarang, Indonesia*. [Online]. Available: <https://repository.unissula.ac.id/12031/>
- [8] A. R. Priambodo, T. Sukmadi, and M. Facta, “ANALISIS SETTING DAN KOORDINASI RELE JARAK SALURAN 150 KV UNGARAN-KRAPYAK-SRONDOL,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 223–229, 2018.

- [9] B. S. A. Nugroho, K. Karnoto, and M. Facta, “Analisis Setting dan Koordinasi Rele Jarak Pada GI 150 KV Pandean Lamper Arah Srondol,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [10] Q. Z. Mu’tashim, “Analisis Penggunaan Rele Jarak Pada Sistem Transmisi Gardu Induk 150 kV Jajar Ke Gardu Induk 150 kV Banyudono,” *E-Jurnal Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 2017.
- [11] K. T. Nugraha, S. Handoko, and A. Nugroho, “Analisis Koordinasi Setting Rele Jarak Pada Gi 150 Kv Kudus-Jekulo-Pati Secara Dua Arah,” *Transient*, vol. 7, no. 1, p. 83, 2018, doi: 10.14710/transient.7.1.83-91.
- [12] A. Jamaah, “EVALUASI SETTING RELE JARAK GARDU INDUK UNGARAN JARINGAN 150kV ARAH KRAPYAK-2,” *Orbith*, vol. 10, no. 1, pp. 82–89, 2014.
- [13] C. Cekdin and T. Barlian, “Transmisi Daya Listrik,” *Yogyakarta: Andi*, 2013.
- [14] A. Sumiyati *et al.*, “Konsep Dasar Transmisi Tenaga Listrik : Klasifikasi , Komponen Serta Gangguannya,” vol. 11, no. 2, pp. 612–617, 2024.
- [15] A. K. Yusuf, “ANALISIS TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR BERDASARKAN HASIL UJI INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA DAN BREAK DOWN VOLTAGE (STUDI KASUS: GARDU INDUK 150 kV RAWALO, BANYUMAS, JAWA TENGAH),” 2021, *Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*.
- [16] H. R. Febrijanto and R. Hidayat, “Analisis Pengujian Tan Delta Pada Transformator Arus Di Gitet Tasikmalaya Bay Pengantar Bandung Selatan-1,” *TEKNOKOM*, vol. 6, no. 2, pp. 86–95, 2023.
- [17] B. Pandjaitan, “Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik,” *Yogyakarta: Andi Offset*, 2012.
- [18] J. Sahebkar Farkhani, M. Zareein, A. Najafi, R. Melicio, and E. M. G. Rodrigues, “The Power System and Microgrid Protection—A Review,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, p. 8271, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10228271.
- [19] J. Dukelsky, *Power System Protection and Relaying*. Moscow: Energoatomizdat, 1987.

- [20] A. Y. Saputra and A. Multi, "STUDY OF THE INFLUENCE OF DISTANCE RELAY SETTING ON AIR LINE HIGH VOLTAGE 150 KV AGAINST HVCRC WIRE 1x310 mm² and ACCC 1x310 mm²," *SAINSTECH: JURNAL PENELITIAN DAN PENGKAJIAN SAINS DAN TEKNOLOGI*, vol. 31, no. 1, pp. 14–21, Jul. 2021, doi: 10.37277/stch.v31i1.1010.
- [21] A. S. Putra, G. Pranowo, and W. Susanto, "Analisis dan Penentuan Koordinasi Proteksi Relai Jarak dan Arus Lebih Transmisi 150 kV di PLTP Darajat," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 4, pp. 952–961, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/31680>
- [22] P. A. Catur, "Scanning Setting Rele Jarak (Distance Relay) Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 KV Gardu Induk Drajat-Garut-Tasik-Tasik Baru," 2014, *Semarang*.
- [23] A. Hamdadi and F. Fikriansyah, "Analisa Dan Pengaturan Ulang Relai Jarak Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 Kv Keramasan-Bukit Asam," *Jurnal Mikrotiga*, vol. 1, no. 3, 2014.
- [24] P. T. PLN, "Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali," *Jakarta: PT. PLN*, 2013.
- [25] S. Suhendar, A. S. Pramudyo, and F. Faris, "Penerapan power line communication pada sistem monitoring, controlling, dan data communication melalui sistem kelistrikan 220 volt AC," in *The 3rd National Conference on Industrial Electrical and Electronics*, 2014. doi: 10.13140/RG.2.1.2425.9681.
- [26] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [27] S. Bandri, "Studi Settingan Distance Relay Pada Saluran Transmisi 150 kV di GI Payakumbuh Menggunakan Software MATLAB," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 108–112, 2016.
- [28] D. R. Garibello-Narváez, E. Gómez-Luna, and J. C. Vasquez, "Performance Evaluation of Distance Relay Operation in Distribution Systems with Integrated Distributed Energy Resources," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 18, p. 4735, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17184735.

- [29] A. Dani, “Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi 150 KV Pada Gardu Induk KIM,” *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, vol. 2, no. 11, pp. 1892–1901, 2021, doi: 10.59141/jist.v2i11.265.
- [30] N. Benedicta, “Analisis Scanning Setting Proteksi Distance Relay Pada Penghantar 150 kV Gardu Induk Garuda Sakti Ke Gardu Induk Balai Pungut,” 2021, *Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*.
- [31] A. Fariris and S. Sumpena, “Penggunaan teleproteksi digital untuk mendukung kehandalan sistem proteksi defense scheme,” *Jurnal Teknologi Industri*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2022, doi: 10.35968/jti.v11i1.885.

