

**EVALUASI *SETTING OVERCURRENT RELAY* DAN
GROUND FAULT RELAY PADA BAY KOPEL GARDU
INDUK 150 KV KEBASEN DENGAN SIMULASI
DIGSILENT POWERFACTORY**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana S1 Pada
Prodi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung



Disusun oleh :

ERVAN JAGI MARTHA WIBOWO

NIM : 30602200143

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

I

FINAL PROJECT

**EVALUATION OF OVERCURRENT RELAY AND
GROUND FAULT RELAY SETTINGS ON THE
COUPLER BAY OF 150 KV KEBASEN SUBSTATION
USING DIGSILENT POWERFACTORY**

Suggested as One of the Requirements to Get a Bachelor's Degree in a Study
Program of Electrical Engineering at Sultan Agung Islamic University



ERVAN JAGI MARTHA WIBOWO

NIM : 30602200143

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ervan Jagi Martha Wibowo
NIM : 30602200143
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“EVALUASI SETTING OVERCURRENT RELAY DAN GROUND FAULT RELAY PADA BAY KOPEL GARDU INDUK 150 KV KEBASEN DENGAN SIMULASI DIGSILENT POWERFACTORY”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

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

Semarang, Februari 2025

Yang Menyatakan



10000
REPUBLIK INDONESIA
10
POSTERAT
TEMPEL
C25C9AMX090013974

Ervan Jagi Martha Wibowo

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ervan Jagi Martha Wibowo
NIM : 30602200143
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“EVALUASI SETTING OVERCURRENT RELAY DAN GROUND FAULT RELAY PADA BAY KOPEL Gardu Induk 150 KV Kebasen Dengan Simulasi Digsilent Powerfactory”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

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

Semarang, Februari 2025

Yang Menyatakan

**Materai
10000**

Ervan Jagi Martha Wibowo

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “EVALUASI SETTING OVERCURRENT RELAY DAN GROUND FAULT RELAY PADA BAY KOPEL GARDU INDUK 150 KV KEBASEN DENGAN SIMULASI DIGSILENT POWERFACTORY” ini disusun oleh:

Nama : ERVAN JAGI MARTHA WIBOWO
NIM : 30602200143
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 21 Februari 2025

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.
NIDN : 210693004

NIDN :

Mengetahui,

Ka Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “EVALUASI SETTING OVERCURRENT RELAY DAN GROUND FAULT RELAY PADA BAY KOPEL GARDU INDUK 150 KV KEBASEN DENGAN SIMULASI DIGSILENT POWERFACTORY” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 21 Februari 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T., IPM.

NIDN : 0628086501

Ketua

Ir. Budi Pramono Jati, M.T., M.M.

NIDN : 0623126501

Penguji I

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

NIDN : 210693004

Penguji II

ABSTRAK

Sistem tenaga listrik membutuhkan proteksi yang handal untuk menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik sekaligus melindungi peralatan dari kerusakan akibat gangguan. Salah satu proteksi utama adalah rele proteksi *Overcurrent Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR), yang digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan sistem terhadap gangguan arus lebih dan gangguan tanah. Penelitian ini dilakukan pada Bay Kopel Gardu Induk (GI) 150 kV Kebasen untuk menganalisis *setting* rele OCR dan GFR serta mengevaluasi kinerjanya melalui simulasi menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory.

Penentuan *setting* dilakukan berdasarkan perhitungan sesuai standar SPLN dengan mempertimbangkan arus nominal peralatan terkecil, serta karakteristik *inverse time* untuk OCR dan GFR. Simulasi dilakukan untuk beberapa skenario gangguan, baik pada busbar maupun Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), guna menguji respons proteksi dan koordinasi antar rele. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele OCR dan GFR bekerja sesuai karakteristik inverse yang diatur, dengan proteksi busbar bekerja secara instan di bawah 0,1 detik. Pada gangguan eksternal di SUTT, rele OCR dan GFR tidak trip terlebih dahulu, memastikan koordinasi proteksi dengan rele di GI *remote* berjalan sesuai.

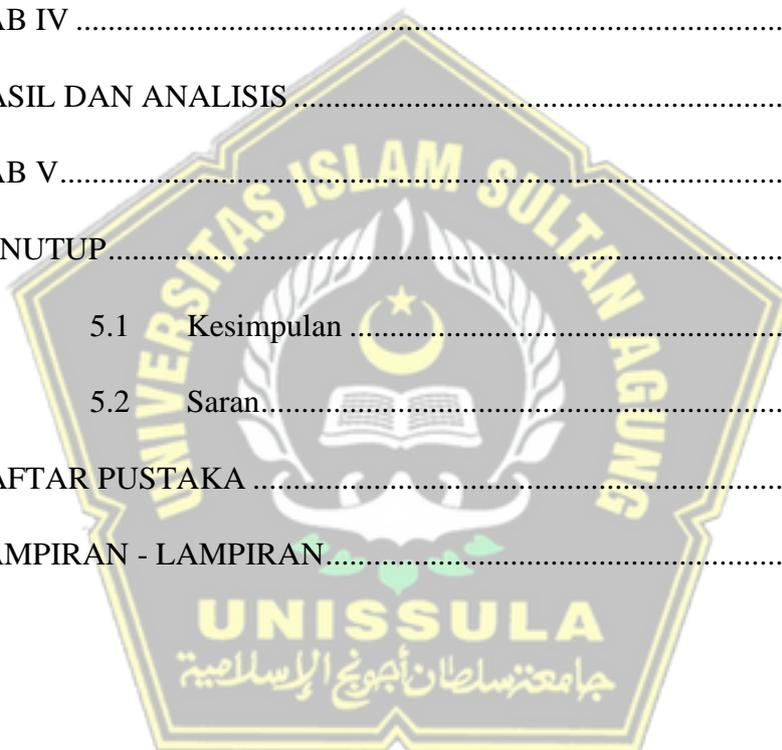
Pengujian individu terhadap rele menunjukkan bahwa perangkat masih dalam kondisi baik, dengan perbedaan hasil pengujian dan kalkulasi kurang dari 1%. Hal ini menunjukkan bahwa *setting* rele yang dihitung, diterapkan, dan disimulasikan telah sesuai dengan kebutuhan sistem. Penelitian ini memberikan rekomendasi bahwa *setting* proteksi yang ada dapat menjaga keandalan sistem sekaligus meningkatkan keamanan operasi gardu induk.

Kata kunci: Rele OCR, Rele GFR, Gardu Induk, Proteksi Sistem Tenaga, DIGSILENT PowerFactory.

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN.....	III
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	IV
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	V
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	VI
ABSTRAK	VIII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL.....	XIII
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penelitian	6
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori.....	8
2.2.1 Gardu Induk	8
2.2.2 Bay Kopel	8

2.2.3	Sistem Proteksi.....	9
2.2.4	<i>Overcurrent Relay</i> (OCR) dan <i>Ground Fault Relay</i> (GFR)	9
2.2.5	Pemutus Tenaga Listrik (PMT).....	13
2.2.6	DIgSILENT PowerFactory	14
BAB III		17
METODOLOGI PENELITIAN.....		17
BAB IV		29
HASIL DAN ANALISIS		29
BAB V.....		54
PENUTUP.....		54
5.1	Kesimpulan	54
5.2	Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN - LAMPIRAN.....		57



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. IEC 60255 <i>Standard Characteristic</i>	12
Gambar 2. 2 Aplikasi GIgSILENT PowerFactory	14
Gambar 3.1 <i>Single Line</i> Gardu Induk 150 KV Kebasen.....	17
Gambar 3. 2 <i>Single Line Diagram</i> Bay Kopel GI 150KV Kebasen	18
Gambar 3. 3 Simulasi Hubung singkat 3phs PowerFactory	21
Gambar 3. 4 Tabel Hubung Singkat Semester 2 Tahun 2024.....	21
Gambar 3. 5 <i>Multitest</i> Rele Omicorn CMC 356	22
Gambar 3. 6 <i>Setting</i> Parameter OCR dan GFR Bay Kopel.....	23
Gambar 3. 7 Diagram Alur Penelitian.....	28
Gambar 4. 1 Pemodelan Bay Kopel dengan Aplikasi DIgSILENT.....	34
Gambar 4. 2 <i>Setting</i> Parameter Rele OCR pada DIgSILENT	34
Gambar 4. 3 <i>Setting</i> Parameter Rele GFR pada DIgSILENT.....	35
Gambar 4. 4 <i>Setting</i> Parameter CT pada DIgSILENT.....	36
Gambar 4. 5 Karakteristik waktu kerja OCR dan GFR dengan simulasi DIgSILENT.....	37
Gambar 4. 6 Simulasi Gangguan Busbar 1	38
Gambar 4. 7 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 1phs - GND Busbar 1.....	39
Gambar 4. 8 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 2phs - GND Busbar 1.....	40
Gambar 4. 9 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 3phs Busbar 1 .	41
Gambar 4. 10 Pemodelan OCR dan GFR Kopel dengan SUTT Kebasen Pemalang.....	42

Gambar 4. 11 Gangguan 1Phs to GND Pada SUTT Kebasen Pemalang..... 43

Gambar 4. 12 Gangguan 2Phs to GND Pada SUTT Kebasen Pemalang..... 44

Gambar 4. 13 Tabel Pengujian Karakteristik OCR dan GFR pada GI Kebasen Bay Kopel 47

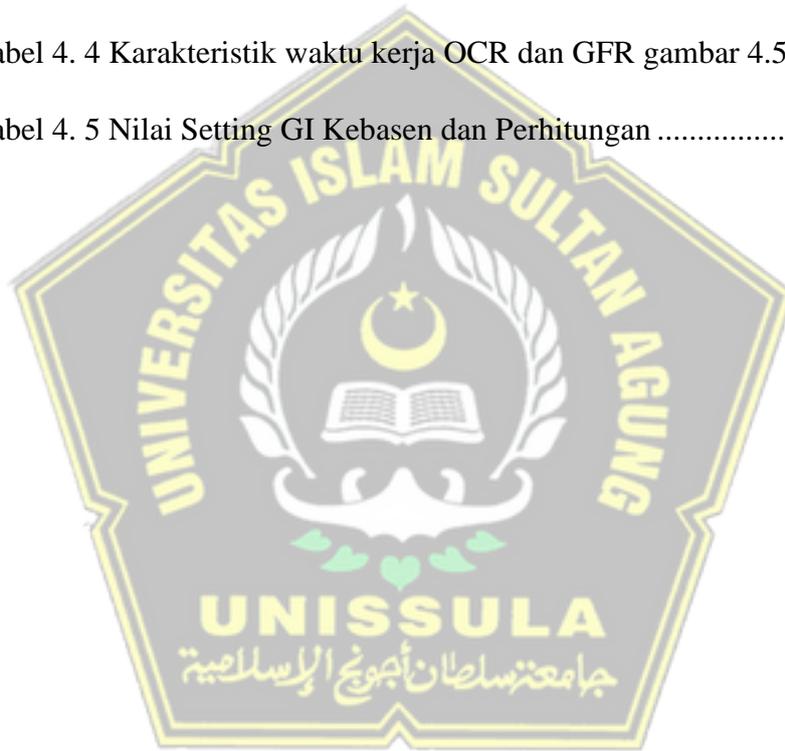
Gambar 4. 14 Karakteristik waktu kerja OCR GI Kebasen Bay Kopel..... 53

Gambar 4. 15 Karakteristik waktu kerja GFR GI Kebasen Bay Kopel 53



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi PMT Bay Kopel GI Kebasen.....	13
Tabel 4. 1 Data Peralatan GI 150 KV Kebasen Bay Kopel	29
Tabel 4. 2 Data <i>Setting Eksisting</i> OCR dan GFR Bay Kopel	29
Tabel 4. 3 Rekomendasi <i>Setting</i> Berdasarakan Standar SPLN dan IEC 60255	33
Tabel 4. 4 Karakteristik waktu kerja OCR dan GFR gambar 4.5	37
Tabel 4. 5 Nilai <i>Setting</i> GI Kebasen dan Perhitungan	46



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gardu Induk (GI) adalah salah satu instalasi penting dalam sistem tenaga listrik yang bertugas menerima energi listrik, kemudian mengubah tingkat tegangan untuk memastikan penyaluran daya ke area beban dapat berlangsung dengan efisien. Salah satu GI yang beroperasi dengan tegangan tinggi adalah Gardu Induk 150 kV Kebasen, yang merupakan bagian penting dari jaringan transmisi listrik di wilayah tersebut. GI ini bertanggung jawab dalam memastikan pasokan listrik yang andal dan kontinu ke berbagai konsumen, termasuk industri dan kawasan komersial.

Dalam operasinya, GI dilengkapi dengan berbagai peralatan proteksi yang dirancang untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan agar tidak merusak peralatan dan jaringan listrik secara keseluruhan. Salah satu komponen penting dalam GI adalah bay kopel, yang berfungsi sebagai penghubung antara dua busbar atau dua jalur transmisi. Bay kopel memegang peran vital dalam menjaga fleksibilitas dan keandalan operasi, memungkinkan pengalihan arus listrik ketika terjadi pemeliharaan atau gangguan pada salah satu jalur. Dalam hal ini, bay kopel harus dilindungi oleh sistem proteksi yang dapat mendeteksi gangguan seperti arus lebih (*overcurrent*) dan gangguan tanah (*ground fault*).

Namun, dalam operasional sehari-hari di Gardu Induk Kebasen, sering kali muncul tantangan terkait keandalan sistem proteksi. Salah satu masalah yang sering terjadi adalah ketidaktepatan setting rele proteksi, baik untuk arus lebih (*Overcurrent Relay/OCR*) maupun gangguan tanah (*Ground Fault Relay/GFR*). Ketidaktepatan ini dapat mengakibatkan beberapa kondisi negatif, seperti:

Pemutusan Terlambat (*Setting Terlalu Tinggi*), Jika *setting* OCR atau GFR terlalu tinggi, rele mungkin tidak mendeteksi gangguan dengan cepat. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan serius pada peralatan karena arus gangguan yang tidak segera diisolasi. Contohnya, sebuah trafo di GI yang mengalami hubung singkat dapat rusak permanen karena rele bekerja terlambat. Selain itu, gangguan yang

tidak segera diisolasi dapat menjalar ke bagian lain jaringan, memperluas dampak kerusakan.

Pemutusan Terlalu Cepat (*Setting Terlalu Rendah*), *Setting* yang terlalu rendah menyebabkan rele mendeteksi arus yang sebenarnya masih dalam batas aman sebagai gangguan. Akibatnya, terjadi pemadaman listrik yang tidak perlu. Sebagai contoh, arus yang naik sesaat ketika proses *switching* saat manuver pada GI dimana kenaiakan arus masih dibawah arus nominal peralatan sehingga rele proteksi mendeteksi dan menyebabkan suplai listrik terputus mengganggu operasional pelanggan.

Koordinasi Proteksi yang Tidak Optimal, Proteksi yang tidak terkoordinasi dengan baik dapat menyebabkan rele di area *downstream*, yang berada lebih jauh dari titik gangguan, bekerja lebih lambat dibandingkan rele *upstream*. Hal ini berpotensi memutus aliran listrik pada wilayah yang lebih luas daripada yang diperlukan. Misalnya, gangguan di salah satu *feeder* seharusnya ditangani oleh rele *feeder* itu sendiri, namun rele utama di bay kopel justru bekerja lebih dahulu, menyebabkan seluruh gardu padam.

Ketidaktepatan *setting* ini menunjukkan bahwa sistem proteksi yang tidak optimal dapat mengurangi keandalan pasokan listrik, meningkatkan risiko kerusakan peralatan, memperluas dampak gangguan, serta merugikan pelanggan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menentukan *setting* rele OCR dan GFR yang tepat pada bay kopel di GI Kebasen. *Setting* tersebut harus didasarkan pada standar internasional, seperti IEEE C37.112 dan IEC 60255 untuk proteksi untuk proteksi arus lebih dan gangguan tanah, serta mempertimbangkan kondisi operasional spesifik Gardu Induk Kebasen.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan solusi yang lebih optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi di GI Kebasen. Solusi ini juga diharapkan mampu meminimalisir potensi kerugian akibat gangguan listrik, sehingga mendukung keberlanjutan pasokan listrik yang andal dan stabil bagi konsumen di wilayah tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang dirumuskan dapat dibagi menjadi beberapa poin utama:

- a. Apakah *setting* rele proteksi *Overcurrent Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) yang saat ini diterapkan pada Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen sudah memenuhi standar yang berlaku, seperti IEC 60255 dan SPLN T5.011:2024?
- b. Bagaimana menentukan *setting* rele proteksi OCR dan GFR yang optimal pada Bay Kopel Gardu Induk Kebasen menggunakan metode perhitungan berdasarkan standar internasional (IEEE Standard C37.112 dan IEC 60255)?
- c. Apakah terdapat perbedaan signifikan antara hasil perhitungan *setting* OCR dan GFR berdasarkan standar dengan *setting* yang sudah diimplementasikan di Gardu Induk Kebasen?
- d. Bagaimana pengaruh *setting* OCR dan GFR yang optimal terhadap keandalan dan keamanan sistem proteksi di Gardu Induk Kebasen saat diuji menggunakan simulasi DIgSILENT PowerFactory?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian terbatas pada Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen dan tidak mencakup bay lain atau gardu induk dengan tegangan berbeda.
- b. Analisis hanya mencakup gangguan arus lebih (*overcurrent*) dan gangguan tanah (*ground fault*) sesuai fungsi rele OCR dan GFR, tanpa membahas gangguan diferensial atau antar fasa.
- c. Perhitungan *setting* mengacu pada IEEE Standard C37.112, IEC 60255, dan SPLN T5.011:2024 tentang Pola Proteksi Busbar dan Diameter Gardu Induk.
- d. Analisis dilakukan berdasarkan data arus nominal, arus gangguan, dan karakteristik peralatan di Gardu Induk Kebasen selama periode penelitian. Perubahan sistem atau penambahan komponen lain di luar periode tersebut tidak menjadi bagian dari analisis.
- e. Penelitian berfokus pada aspek teknis *setting* rele, termasuk arus *pickup* dan waktu kerja, tanpa membahas analisis ekonomis atau biaya implementasi.
- f. Evaluasi kinerja proteksi dilakukan melalui simulasi DIgSILENT PowerFactory untuk validasi *setting* sesuai standar. Hasil simulasi kemudian

dibandingkan dengan hasil pengujian lapangan untuk memastikan kesesuaian dan efektivitas *setting* proteksi yang diterapkan.

Batasan ini dirancang untuk memastikan penelitian tetap fokus pada tujuan utama, yaitu mengevaluasi dan mengoptimalkan *setting* OCR dan GFR sesuai rumusan masalah yang diajukan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini:

- a. Menganalisis keandalan *setting* eksisting rele OCR dan GFR pada Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen berdasarkan standar internasional (IEC 60255 dan SPLN T5.011:2024).
- b. Menentukan *setting* yang optimal untuk rele proteksi OCR dan GFR menggunakan metode perhitungan berbasis simulasi dan analisis sistem tenaga di DIgSILENT PowerFactory.
- c. Menguji koordinasi proteksi antara rele OCR dan GFR dengan proteksi lainnya, seperti proteksi busbar dan rele di gardu induk remote, untuk memastikan selektivitas dan keandalan sistem.
- d. Memberikan rekomendasi pengaturan *setting* proteksi yang dapat meningkatkan keandalan operasional dan meminimalkan risiko kerusakan peralatan serta gangguan pada pasokan listrik.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini sebagai berikut :

Manfaat Teoritis:

- a. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode analisis dan evaluasi proteksi sistem tenaga listrik, khususnya pada pengaturan OCR dan GFR berbasis standar internasional.
- b. Menjadi referensi bagi studi lanjutan terkait optimasi sistem proteksi pada gardu induk atau infrastruktur kelistrikan lainnya.

Manfaat Praktis:

- a. Bagi Gardu Induk Kebasen, mengoptimalkan pengaturan proteksi untuk meningkatkan keandalan operasi dan mengurangi risiko gangguan listrik.

- b. Bagi teknisi dan operator, memberikan pedoman praktis dalam menentukan dan memvalidasi *setting* rele proteksi OCR dan GFR, sehingga meminimalkan kesalahan pengaturan.
- c. Bagi manajemen, mendukung pengambilan keputusan strategis terkait pemeliharaan dan investasi pada sistem proteksi gardu induk, yang berkontribusi pada efisiensi biaya operasional.
- d. Bagi konsumen listrik, mengurangi potensi pemadaman listrik akibat gangguan, sehingga meningkatkan kontinuitas pelayanan listrik.



1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang masalah yang melandasi penelitian, merumuskan masalah yang akan diselesaikan, menetapkan batasan ruang lingkup penelitian, menentukan tujuan dan manfaat penelitian, serta menjelaskan sistematika penulisan laporan secara ringkas.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini membahas teori dasar terkait sistem proteksi tenaga listrik, fungsi rele OCR dan GFR, standar internasional seperti IEC 60255 dan SPLN T5.011:2024, serta tinjauan penelitian terdahulu yang relevan sebagai acuan ilmiah dalam penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah penelitian, mulai dari pengumpulan data teknis di Gardu Induk Kebasen, perhitungan *setting* rele OCR dan GFR berbasis standar, hingga simulasi dan evaluasi kinerja proteksi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory.

BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Bab ini menyajikan data teknis peralatan, hasil perhitungan *setting* optimal, analisis hasil simulasi skenario gangguan, perbandingan antara *setting eksisting* dan perhitungan, serta evaluasi pengaruh *setting* terhadap keandalan proteksi sistem.

BAB V : PENUTUP

Bab ini memberikan kesimpulan dari hasil penelitian yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian, serta menyampaikan saran implementasi *setting* optimal dan rekomendasi untuk penelitian lanjutan di bidang proteksi sistem tenaga listrik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian terkait setting rele proteksi *overcurrent* (OCR) dan *ground fault* (GFR) di Indonesia telah banyak dilakukan oleh peneliti lokal. Beberapa penelitian yang relevan dengan skripsi ini adalah:

- a. Analisis *Overcurrent Relay* Sebagai Proteksi Arus Lebih Di Gardu Induk Rangkas Kota 70 KV Bay Kopel [1]. Hasil kajian bahwa *overcurrent relay* (OCR) yang digunakan pada Gardu Induk Rangkas Kota 70 kV Bay Kopel untuk melindungi sistem dari gangguan arus lebih. Proteksi ini diatur dengan *setting definite time* 0,5 detik, yang memungkinkan *relay* untuk *trip* setelah waktu tertentu jika arus lebih melebihi nilai yang ditetapkan.
- b. Analisis *Setting* Proteksi Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Trafo Daya 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Cibatu [2]. Hasil kajian bahwa *setting* rele OCR dan GFR menggunakan karakteristik *standard inverse* (SI) dengan TMS OCR (20 kV = 0,11; 150 kV = 0,17) dan TMS GFR (20 kV = 0,12; 150 kV = 0,08). *Grading time* 0,3 detik sesuai standar IEC 60255. Hasil simulasi ETAP 16 menunjukkan koordinasi relai baik pada gangguan 3 fasa, namun terdapat potongan kurva pada gangguan 1 fasa ke tanah akibat perbedaan TMS. Dibandingkan kondisi PLN, hasil perhitungan memiliki waktu kerja lebih cepat dengan keandalan lebih baik, sehingga relai dapat bereaksi cepat untuk memutus gangguan tanpa mengurangi keandalan sistem.
- c. Evaluasi Kinerja Setting Proteksi *Over Current Relay* dan *Ground Fault Relay* Jaringan Distrbusi 20 kV Pada Gardu Induk Pankkukang [3]. Hasil kajian didapatkan *setting* OCR dan GFR di lapangan dinilai baik karena memenuhi standar *grading time* IEC 60255 sebesar 0,3–0,5 detik, dengan waktu kerja terlama 0,382 s pada gangguan 2 fasa-tanah pada jarak 8,76 km. Hal ini menunjukkan proteksi sistem yang andal dan sesuai standar.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gardu Induk

Gardu Induk (GI) adalah instalasi penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari satu level ke level lainnya, baik dari tegangan tinggi ke tegangan menengah maupun sebaliknya. Selain itu, GI juga berperan dalam pengukuran, pengawasan, operasi, dan pengaturan pengamanan sistem tenaga Listrik [4].

Dalam operasionalnya, GI menghubungkan sistem transmisi dengan sistem distribusi, memastikan aliran listrik yang stabil dan andal ke konsumen akhir. Peralatan utama dalam GI meliputi transformator yang mengubah tegangan, pemutus sirkuit yang melindungi sistem dari gangguan, dan perangkat pengukuran untuk memantau kinerja sistem [5].

Dengan demikian, GI memainkan peran krusial dalam menjaga kualitas dan kontinuitas pasokan listrik, serta melindungi peralatan dan infrastruktur listrik dari potensi kerusakan akibat gangguan atau beban berlebih [6].

2.2.2 Bay Kopel

Bay kopel dalam Gardu Induk berfungsi sebagai penghubung antara dua busbar atau saluran transmisi, memungkinkan aliran listrik dialihkan untuk menjaga kontinuitas pasokan. Pemasangan Pemutus Tenaga (PMT) kopel dapat meningkatkan kontinuitas penyaluran energi listrik dengan menghubungkan kedua busbar, sehingga beban dari satu trafo dapat dialihkan ke trafo lain [7].

Pengaturan proteksi yang tepat pada bay kopel sangat penting untuk memastikan bahwa jika terjadi gangguan, hanya bagian yang bermasalah yang diisolasi, sehingga meminimalkan dampak pada keseluruhan sistem. *Relay overcurrent* (OCR) pada kopel diharapkan dapat menghindari gangguan hubung singkat pada sistem. *Relay* ini bekerja dengan cara membandingkan arus yang terbaca dengan nilai setingannya; bila arus yang dibaca lebih besar daripada nilai setingan, maka relay akan memerintahkan Pemutus Tenaga (PMT) untuk memutus aliran listrik setelah waktu tertentu [8].

Dengan demikian, bus pemutus memainkan peran penting dalam fleksibilitas operasi dan keandalan sistem tenaga listrik, serta memerlukan pengaturan proteksi yang cermat untuk menjaga stabilitas dan keamanan jaringan listrik.

2.2.3 Sistem Proteksi

Sistem proteksi dalam jaringan tenaga listrik berfungsi untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan guna menjaga stabilitas dan keandalan sistem. Proteksi yang efektif harus mampu melindungi peralatan dengan cepat dan tepat. Karakteristik utama yang harus dimiliki oleh sistem proteksi meliputi:

- a. Selektivitas: Kemampuan sistem proteksi untuk memilih dan memutuskan hanya bagian sistem yang mengalami gangguan, sehingga area lain dapat terus beroperasi tanpa terganggu.
- b. Sensitivitas: Sistem proteksi harus mampu merespons gangguan dengan cepat untuk mengurangi kemungkinan kerusakan peralatan dan memastikan kontinuitas layanan.
- c. Keandalan (Reliabilitas): Sistem proteksi harus andal dalam mendeteksi dan mengatasi gangguan, memastikan bahwa proteksi bekerja dengan baik dalam semua kondisi operasi.

Memastikan bahwa sistem proteksi memiliki karakteristik selektivitas, sensitivitas, dan keandalan yang baik adalah esensial untuk menjaga integritas dan stabilitas jaringan tenaga listrik..

2.2.4 *Overcurrent Relay (OCR)* dan *Ground Fault Relay (GFR)*

Overcurrent Relay (OCR) adalah perangkat proteksi yang mendeteksi arus berlebih akibat gangguan seperti kelebihan beban atau hubung singkat. Prinsip kerjanya didasarkan pada deteksi arus yang melebihi nilai ambang batas yang telah ditentukan, ketika arus yang terdeteksi melebihi nilai ini, OCR akan memerintahkan pemutus sirkuit (*circuit breaker*) untuk memutuskan aliran listrik guna mencegah kerusakan lebih lanjut [9].

Pengaturan OCR harus mempertimbangkan karakteristik sistem, termasuk arus nominal dan arus hubung singkat. Penelitian menunjukkan bahwa penyesuaian *setting relay* arus lebih diperlukan setelah adanya perubahan

dalam sistem tenaga listrik, seperti penambahan pembangkit baru, untuk memastikan proteksi yang optimal [10].

Dengan demikian, setting yang tepat pada OCR sangat penting untuk mengurangi risiko kerusakan akibat gangguan arus lebih, memastikan bahwa sistem proteksi bekerja secara efektif dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan.

Karakteristik Rele OCR:

- a. *Instantaneous Overcurrent*: Rele bekerja tanpa penundaan.
- b. *Definite Time Overcurrent*: Rele bekerja setelah waktu tertentu.
- c. *Inverse Time Overcurrent*: Waktu kerja rele berbanding terbalik dengan besar arus gangguan.

OCR bekerja berdasarkan prinsip *inverse time* dan *instantaneous*. Pada karakteristik *inverse time*, waktu kerja relay berbanding terbalik dengan besar arus yang terdeteksi. Semakin besar arus gangguan, semakin cepat *relay* bekerja. Sementara pada *instantaneous relay*, *relay* akan bekerja segera setelah arus yang terdeteksi melebihi nilai batas yang telah ditetapkan, tanpa adanya penundaan waktu.

Perhitungan *setting* OCR melibatkan beberapa parameter, termasuk nilai arus nominal (I nominal) dan faktor keandalan. Rumus untuk *setting* OCR mengikuti standar IEC 60255 dan IEEE C37.112, yang mengacu pada kurva waktu-inversi. Beberapa rumus yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Arus Setting Overcurrent (I_s):

$$I_s = \frac{I_{Fault}}{I_{Nominal}} \quad (2.1)$$

Di mana :

I_s = Nilai Arus Setting *Overcurrent*

I_{Fault} = Arus Gangguan

$I_{Nominal}$ = Arus Nominal Sistem

- b. *Time Multiplier Setting* (TMS): Setelah menentukan arus setting OCR, waktu operasi relay dapat dihitung dengan menggunakan *Time Multiplier Setting* (TMS). Nilai TMS dapat ditemukan dari kurva standar *time-inverse* sesuai dengan nilai arus gangguan yang diukur. Rumusnya adalah:

$$T = TMS \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I_{fault}}{I_s}\right)^n - 1} \right) \quad (2.2)$$

Di mana :

T = Waktu Kerja Relay

TMS = Time Multiplier Setting

K = Konstanta (tergantung jenis kurva *relay*)

n = Faktor eksponen (tergantung jenis kurva *relay*)

I_s = Nilai Arus Setting *Overcurrent*

I_{Fault} = Arus Gangguan

Nilai K dan n berbeda berdasarkan jenis kurva yang digunakan, seperti *Standard Inverse*, *Very Inverse*, atau *Extremely Inverse*, yang telah diatur oleh standar IEEE C37.112.

- c. *Instantaneous Overcurrent Relay*: *Instantaneous* OCR tidak menggunakan penundaan waktu, sehingga settingnya hanya ditentukan oleh arus gangguan yang melebihi nilai tertentu. Untuk menghindari gangguan sementara atau *switching transien*, nilai arus *setting* untuk rele *instantaneous* biasanya diatur lebih tinggi dari setting arus OCR waktu-inversi.

Ground Fault Relay (GFR) adalah perangkat proteksi yang mendeteksi arus yang mengalir ke tanah, yang sering terjadi akibat kerusakan isolasi. GFR bekerja dengan membandingkan arus fase dan arus balik; perbedaan antara keduanya menunjukkan adanya kebocoran arus ke tanah .

Pengaturan GFR yang tepat sangat penting untuk mencegah risiko kebakaran dan kerusakan peralatan. Standar internasional seperti IEC 60255 memberikan pedoman dalam pengaturan rele proteksi. Penerapan standar ini memastikan bahwa sistem proteksi sejalan dengan praktik terbaik global, sehingga meningkatkan keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik.

Annex A
(normative)

Constants for dependent time operating and reset characteristics

Table A.1 shows the constant for dependent time operating and reset characteristics.

Table A.1 – Constants for dependent time operating and reset characteristics

Curve type	Operating time			Reset time		Commonly used name
	$t(G) = TMS \left[\frac{k}{\left(\frac{G}{G_S}\right)^\alpha} + c \right]$			$t_r(G) = TMS \left(\frac{t_r}{1 - \left(\frac{G}{G_S}\right)^\alpha} \right)$		
	<i>k</i> s	<i>c</i> s	<i>α</i>	<i>t_r</i> s	<i>α</i>	
A	0,14	0	0,02	*	*	Inverse
B	13,5	0	1	*	*	Very inverse
C	80	0	2	*	*	Extremely inverse
D	0,0515	0,1140	0,02	4,85	2	IEEE Moderately inverse
E	19,61	0,491	2	21,6	2	IEEE Very inverse
F	28,2	0,1217	2	29,1	2	IEEE Extremely inverse

* For curves A, B and C, the manufacturer shall declare if dependent time reset characteristic is implemented and provide the appropriate information.

LICENSED TO MECOM Limited - RANGHIRANGALORE, FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

Gambar 2.1. IEC 60255 Standard Characteristic

Kesalahan dalam pengaturan proteksi dapat menyebabkan rele tidak berfungsi dengan baik, baik terlalu lambat maupun terlalu cepat. Penggunaan perangkat lunak simulasi direkomendasikan untuk mengoptimalkan pengaturan proteksi, sehingga dapat meminimalkan kerugian akibat gangguan [11].

Dengan demikian, pemilihan nilai pengaturan GFR berdasarkan karakteristik sistem dan lingkungan sangat penting untuk memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu yang diputus, menjaga kontinuitas pasokan listrik, dan mencegah kerusakan lebih lanjut..

2.2.5 Pemutus Tenaga Listrik (PMT)

Circuit Breaker (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) adalah perangkat penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk memutus aliran listrik saat terjadi gangguan seperti kelebihan beban atau hubungan arus pendek. CB bekerja berdasarkan sinyal dari rele proteksi, seperti *Overcurrent Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR), untuk memastikan bahwa bagian sistem yang bermasalah dapat diisolasi tanpa mempengaruhi keseluruhan jaringan.

Pemilihan dan pengaturan CB yang tepat sangat penting untuk memastikan operasi sistem yang aman dan andal. CB harus mampu menangani arus gangguan yang besar tanpa menyebabkan kerusakan pada sistem. Selain itu, CB harus dapat dioperasikan secara otomatis maupun manual untuk keperluan pemeliharaan dan perbaikan.

Dalam konteks sistem proteksi tenaga listrik, CB bekerja bersama dengan rele proteksi untuk mendeteksi dan mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan. Rele proteksi mendeteksi kondisi tidak normal dan mengirim sinyal ke CB untuk memutus aliran listrik, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut dan memastikan keselamatan sistem secara keseluruhan [12].

Tabel 2. 1 Spesifikasi PMT Bay Kopel GI Kebasen

Spesifikasi PMT Bay Kopel GI Kebasen		
Item	Nilai/Keterangan	Satuan
Standard	IEC62271	
Rated Voltage	170	KV
Rated Current	4000	A
Rated short-circuit breaking current	50	KA

Pemutus Tenaga (PMT) pada Bay Kopel Gardu Induk Kebasen dirancang sesuai dengan standar internasional IEC 62271, yang mengatur perangkat *switchgear* tegangan tinggi. PMT ini memiliki tegangan nominal sebesar 170 kV dan mampu mengalirkan arus hingga 4000 A dalam kondisi operasi normal. Selain itu, PMT ini dirancang untuk dapat memutus arus hubung singkat sebesar 50 kA, sehingga memastikan proteksi yang andal terhadap gangguan arus besar yang mungkin terjadi di sistem. Spesifikasi ini memastikan bahwa PMT mampu beroperasi dengan aman dan efektif di lingkungan sistem tenaga listrik bertegangan tinggi.

2.2.6 DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT PowerFactory adalah perangkat lunak simulasi dan analisis sistem tenaga listrik yang dirancang untuk mendukung berbagai kebutuhan teknis dalam perencanaan, pengoperasian, dan pengelolaan jaringan listrik. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh DIgSILENT GmbH (*Digital Simulation and Electrical Network Calculation*) dan telah menjadi salah satu alat utama yang digunakan oleh para insinyur listrik di seluruh dunia.



Gambar 2. 2 Aplikasi DIgSILENT PowerFactory

PowerFactory mengintegrasikan berbagai fungsi analisis sistem tenaga, seperti analisis aliran daya, simulasi hubung singkat, analisis kestabilan sistem, hingga simulasi sistem proteksi. Kemampuan perangkat lunak ini menjadikannya alat yang andal untuk menyelesaikan permasalahan dalam desain, optimalisasi, dan evaluasi kinerja jaringan tenaga listrik.

a. Fitur Utama DIgSILENT PowerFactory

Beberapa fitur utama yang disediakan oleh DIgSILENT PowerFactory adalah sebagai berikut:

1. Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*)

Memungkinkan pengguna untuk menghitung distribusi tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif dalam sistem tenaga listrik. Analisis ini penting untuk memastikan efisiensi dan stabilitas jaringan.

2. Analisis Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*)

Digunakan untuk menghitung arus gangguan akibat hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Analisis ini membantu dalam menentukan parameter proteksi sistem.

3. Simulasi Dinamis (*Dynamic Simulation*)

Memungkinkan analisis kestabilan sistem dalam menghadapi perubahan kondisi operasi, seperti gangguan sementara atau perubahan beban.

4. Analisis Proteksi (*Protection Analysis*)

Digunakan untuk mengevaluasi koordinasi dan kinerja rele proteksi dalam mendeteksi serta mengisolasi gangguan. Pengujian dapat dilakukan untuk berbagai karakteristik proteksi, termasuk inverse time, definite time, dan instantaneous.

5. Optimasi Sistem (*System Optimization*)

Mendukung perencanaan dan optimalisasi jaringan, seperti penempatan pembangkit atau penentuan setting optimal untuk perangkat proteksi.

6. Antarmuka Pengguna yang Interaktif

Menyediakan visualisasi diagram satu garis (*single line diagram*) yang memudahkan pengguna dalam memahami konfigurasi sistem serta hasil analisis secara grafis.

b. Peran DIgSILENT PowerFactory dalam Penelitian

Dalam konteks penelitian ini, DIgSILENT PowerFactory digunakan untuk:

1. Menghitung *Setting* Optimal Rele Proteksi

Simulasi dilakukan untuk menentukan *setting* arus *pickup* dan waktu kerja rele OCR dan GFR berdasarkan standar internasional.

2. Menguji Koordinasi Proteksi

PowerFactory digunakan untuk memastikan koordinasi antar rele dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan, sehingga selektivitas proteksi dapat tercapai.

3. Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi

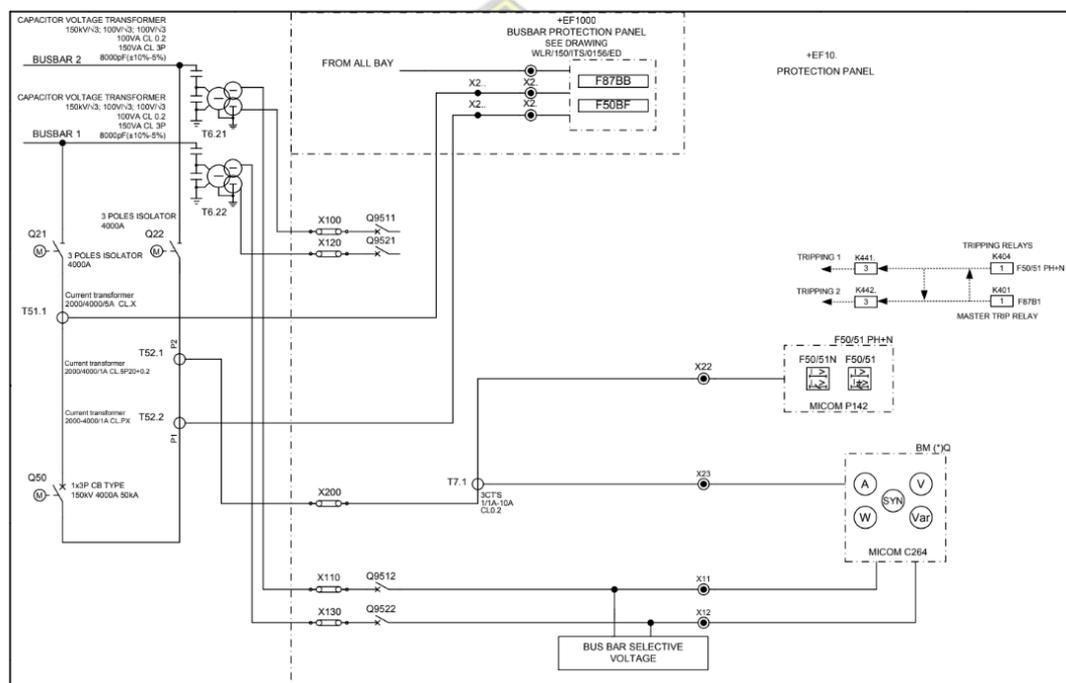
Simulasi berbagai skenario gangguan, seperti gangguan fasa-ke-tanah atau gangguan tiga fasa, dilakukan untuk menilai keandalan dan efektivitas setting yang diterapkan.

4. Validasi Hasil Perhitungan Teoretis

Hasil simulasi digunakan untuk memverifikasi kesesuaian antara perhitungan manual dan implementasi di lapangan.

Bay kopel ini dilengkapi dengan peralatan proteksi seperti *Overcurrent Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR), yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengatasi gangguan yang mungkin terjadi di sistem transmisi. Analisis akan berfokus pada:

1. *Setting* proteksi OCR: Rele arus lebih yang digunakan untuk mendeteksi gangguan arus lebih akibat beban berlebih atau gangguan hubung singkat.
2. *Setting* proteksi GFR: Rele gangguan tanah yang mendeteksi kebocoran arus ke tanah, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan dan sistem jika tidak segera ditangani.



Gambar 3. 2 *Single Line Diagram* Bay Kopel GI 150KV Kebasen

Gambar di atas merupakan *Single Line Diagram* (SLD) untuk Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen. Berikut adalah deskripsi dari setiap komponen yang terdapat dalam diagram:

1. *Capacitor Voltage Transformer* (CVT)

CVT berfungsi untuk mengukur tegangan pada Busbar 1 dan Busbar 2. Tegangan yang diukur adalah 150 kV dengan dikonversi menjadi tegangan

sekunder sebesar 100 V, Tegangan sekunder CVT akan memberikan input tegangan ke sistem proteksi atau peralatan monitoring.

2. PMS Busbar (Q21 dan Q22)

Q21 dan Q22 merupakan PMS (Pemutus dan Penyambung Sistem) yang digunakan untuk menghubungkan atau memisahkan busbar dari peralatan lainnya selama operasi sistem atau kegiatan pemeliharaan. PMS ini memiliki kapasitas arus nominal 4000 A.

3. Current Transformer (CT)

CT pada diagram ini (T51.1, T52.1, T52.2) digunakan untuk mengukur arus pada sistem. Hasil pengukuran CT ini menjadi input ke rele proteksi (MiCOM P142). Rasio CT yang digunakan adalah 2000/4000 - 1 A, sesuai dengan kebutuhan sistem tegangan tinggi 150 kV.

4. Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (Q50)

PMT merupakan perangkat utama yang berfungsi untuk memutus aliran arus listrik saat terjadi gangguan atau ketika dibutuhkan untuk operasi tertentu. PMT pada Bay Kopel ini memiliki kemampuan untuk menangani arus hubung singkat hingga 50 kA dan arus nominal operasi sebesar 4000 A.

5. Rele Proteksi (MiCOM P142)

Rele proteksi MiCOM P142 digunakan untuk proteksi *overcurrent* (OCR) dan *ground fault* (GFR). Ketika terdeteksi adanya gangguan berupa arus lebih atau gangguan tanah, rele ini akan mengirimkan sinyal trip ke PMT untuk memutus aliran listrik, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan.

6. Busbar Protection Panel

Panel ini khusus digunakan untuk proteksi busbar. Jika terjadi gangguan pada busbar, sistem proteksi ini akan mendeteksi dan merespons dengan cepat untuk memutus arus pada area yang terganggu.

7. *Bay Control Unit* (BCU) Micom C264

Micom C264 berfungsi sebagai perangkat untuk monitoring dan kontrol. Perangkat ini dapat menampilkan parameter-parameter operasional seperti tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, serta faktor daya pada sistem.

8. *Tripping Relays*

Relay K441 dan K442 digunakan untuk meneruskan sinyal trip dari rele MiCOM P142 ke PMT. Hal ini memastikan bahwa pemutusan arus dilakukan secara otomatis saat terdeteksi gangguan.

Diagram ini menjelaskan aliran listrik dari Busbar 1 dan Busbar 2 yang terhubung melalui Bay Kopel. Seluruh peralatan dirancang untuk menjaga keamanan, keandalan, dan stabilitas sistem tegangan tinggi 150 kV. Dengan sistem proteksi yang terintegrasi, gangguan dapat dideteksi dan ditangani secara cepat untuk mencegah dampak lebih besar pada sistem.

3.2 **Alat dan Bahan**

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan alat dan bahan yang mendukung proses pengumpulan data dan analisis. Berikut adalah daftar alat dan bahan yang digunakan:

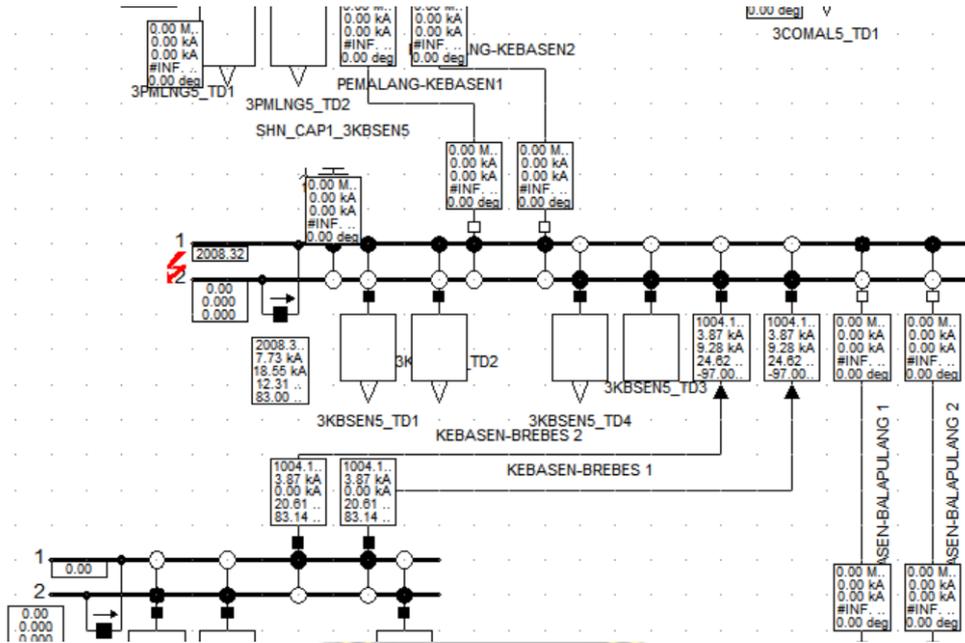
3.2.1 **Alat**

1. Laptop/Komputer

Digunakan untuk melakukan perhitungan, simulasi, dan analisis data. Perangkat ini akan dilengkapi dengan *software* perhitungan dan simulasi yang mendukung analisis proteksi, seperti DIgSILENT PowerFactory.

2. Software Perhitungan Proteksi

DIgSILENT PowerFactory digunakan untuk melakukan perhitungan arus gangguan dan simulasi *setting* proteksi OCR dan GFR. *Software* ini mendukung analisis sistem tenaga listrik secara detail.



Gambar 3. 3 Simulasi Hubung singkat 3phs PowerFactory

Diagram ini menggambarkan aliran daya listrik dari sumber menuju berbagai bus (termasuk Bus Kopel), lengkap dengan informasi arus hubung singkat, impedansi, dan sudut fasa pada titik-titik kritis. Diagram juga memperlihatkan beberapa proteksi yang dipasang di jalur-jalur tertentu, serta nilai arus gangguan yang terdeteksi di berbagai titik sistem.

3. Aplikasi Spreadsheet (Microsoft Excel atau Google Sheets)

Digunakan untuk mengolah data hasil perhitungan secara manual, seperti perhitungan arus gangguan dan penentuan *setting* rele berdasarkan standar.

Arus Hubung Singkat GI/GITET Sistem Jawa Bali Semester 2 Tahun 2024

No.	Bus	GI/GITET	UP2B	Arus Hubung Singkat Pembangkit DMN ROB Juli 2024								Arus Hubung Singkat KIT Aktif ROB Juli 2024				
				TEG	Impedansi Urutan Positif				Impedansi Urutan Negatif				Arus Hubung Singkat		1ph(kA)	3ph(kA)
					R1(pu)	X1(pu)	R2(pu)	X2(pu)	R0(pu)	X0(pu)	1ph(kA)	3ph(kA)				
721	2	JEKULOS	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.002606	0.021129	0.002783	0.021489	0.008969	0.040594	15.00	19.83	14.96	19.73		
722	1	JELOK	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.004422	0.028277	0.004425	0.028464	0.010027	0.033213	13.78	14.76	13.73	14.67		
723	2	JELOK	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.007542	0.043110	0.007443	0.043123	0.008944	0.061458	8.48	9.66	8.45	9.61		
724	1	JEPARA	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.003759	0.020849	0.003786	0.021037	0.008966	0.036696	15.76	19.91	15.69	19.74		
725	2	JEPARA	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.003759	0.020849	0.003786	0.021037	0.008966	0.036696	15.76	19.91	15.69	19.74		
726	1	KALASAN	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.009115	0.052307	0.009099	0.052321	0.019534	0.093378	6.29	7.96	6.28	7.94		
727	2	KALASAN	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.009115	0.052307	0.009099	0.052321	0.019534	0.093378	6.29	7.96	6.28	7.94		
728	1	KALIBAKAL	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.002097	0.026170	0.001995	0.026927	0.003053	0.026211	15.93	16.10	14.74	14.41		
729	2	KALIBAKAL	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.002097	0.026170	0.001995	0.026927	0.003053	0.026211	15.93	16.10	14.74	14.41		
730	1	KALISARI	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.002117	0.014385	0.001960	0.014307	0.005303	0.018777	26.10	28.98	24.67	26.33		
731	2	KALISARI	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.002117	0.014385	0.001960	0.014307	0.005303	0.018777	26.10	28.98	24.67	26.33		
732	1	KALIWUNGU	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.004649	0.021981	0.004509	0.021907	0.011610	0.033673	15.75	18.76	15.28	17.73		
733	2	KALIWUNGU	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.004649	0.021981	0.004509	0.021907	0.011610	0.033673	15.75	18.76	15.28	17.73		
734	1	KEBASEN	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.006208	0.056188	0.006344	0.059274	0.024853	0.128120	5.15	7.48	5.14	7.47		
735	2	KEBASEN	UP2B Jawa Tengah & DIY	150	0.006208	0.056188	0.006344	0.059274	0.024853	0.128120	5.15	7.48	5.14	7.47		

Gambar 3. 4 Tabel Hubung Singkat Semester 2 Tahun 2024

Gambar tabel tersebut menampilkan data arus hubung singkat untuk beberapa Gardu Induk (GI) dan GITET di Sistem Jawa Bali pada semester 2 tahun 2024, termasuk di Gardu Induk Kebasen. Pada kolom Kebasen, terlihat bahwa untuk bus 1 dan bus 2, arus hubung singkat 1 *phase* (1phs): 5.15 kA arus hubung singkat 3 *phase* (3phs): 7.47 kA. Data ini juga mencakup nilai impedansi urutan positif, negatif, dan nol untuk arus hubung singkat, yang penting untuk analisis perhitungan proteksi sistem. Nilai-nilai ini membantu dalam menentukan *setting* rele proteksi di GI Kebasen agar sesuai dengan kondisi arus gangguan yang mungkin terjadi.

4. Relay Test Set

Alat uji proteksi untuk melakukan pengujian terhadap rele OCR dan GFR, termasuk pengujian karakteristik waktu kerja rele dan keakuratannya dalam mendeteksi gangguan. Beberapa contoh alat uji proteksi yang sering digunakan adalah Omicron CMC atau Megger SMRT.



Gambar 3. 5 *Multitest* Rele Omicorn CMC 356

3.2.2 Bahan

1. Data Teknis Gardu Induk 150 kV Kebasen

Data teknis yang digunakan meliputi spesifikasi peralatan listrik seperti transformator, pemutus tenaga, rele proteksi, dan kabel yang digunakan di Bay Kopel. Data ini biasanya tersedia dari dokumen teknis gardu induk.

2. Dokumentasi Setting Rele Proteksi

Bahan ini berupa data setting rele OCR dan GFR yang sudah diterapkan di gardu induk, termasuk data uji proteksi dan hasil pengujian yang sebelumnya sudah dilakukan.

PROTECTION G1	
[50/51] PHASE OC	
Function I>	Yes
I>	1.20In
Delay Type	IDMT
Idmt	SI (IEC)
Tms	0.514
t Reset	0.00s
Function I>>	No
Function I>>>	No
[50N/51N] E/Gnd	
Function Ie>	Yes
Ie>	0.400Ien
Delay Type	IDMT
Idmt	SI (IEC)
Tms	0.770
t Reset	0.00s
Function Ie>>	No
Function Ie>>>	No

Gambar 3. 6 *Setting* Parameter OCR dan GFR Bay Kopel

Gambar tersebut menampilkan parameter *setting* rele proteksi OCR (*Overcurrent Relay*) dan GFR (*Ground Fault Relay*) pada sistem proteksi. Berikut penjelasan singkat mengenai beberapa parameter utama yang terlihat:

1. [50/51] PHASE OC (*Overcurrent*):

- Function I> : Fungsi proteksi *overcurrent* fase (OC) aktif.
- I> : Nilai *setting* arus *pickup* sebesar 1.20 In (nilai arus nominal).
- Delay Type : Menggunakan IDMT (*Inverse Definite Minimum Time*), tipe standar IEC.
- Tms : *Time multiplier setting* (Tms) sebesar 0.514, yang menentukan waktu tunda untuk proteksi.
- t Reset : Waktu reset sebesar 0.00s, yang menunjukkan waktu pemulihan setelah gangguan.

2. [50N/51N] E/Gnd (*Ground Fault Relay*):

- Function Ie> : Fungsi proteksi gangguan tanah (GFR) aktif.
- Ie> : Nilai setting arus pickup gangguan tanah sebesar 0.400.
- Delay Type : Menggunakan IDMT dengan standar IEC.
- Tms : *Time multiplier setting* (Tms) sebesar 0.770 untuk proteksi gangguan tanah.
- t Reset : Waktu reset 0.00s, yang menunjukkan tidak ada waktu pemulihan setelah gangguan.

Parameter ini penting dalam menentukan bagaimana rele bereaksi terhadap gangguan arus lebih atau gangguan tanah di sistem, dengan memperhatikan nilai arus *pickup* dan waktu tunda yang diatur.

3. Standar-standar Proteksi Rele

IEC 60255 dan IEEE C37.112 adalah dua standar utama yang akan digunakan sebagai referensi dalam perhitungan *setting* rele proteksi. Dokumen ini penting sebagai acuan dalam menentukan perhitungan dan *setting* yang sesuai dengan standar internasional.

Panduan teknis dari pabrik terkait pengoperasian, pengaturan, dan pemeliharaan rele proteksi OCR dan GFR yang digunakan di Gardu Induk Kebasen. Rele yang digunakan adalah merk Alstom dengan tipe Micom P142. Panduan ini mencakup instruksi untuk mengatur parameter rele, seperti arus *pickup*, waktu operasi, serta panduan untuk melakukan pengujian dan pemeliharaan agar rele dapat berfungsi optimal dan andal dalam mendeteksi gangguan.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini melibatkan beberapa tahapan yang sistematis untuk memastikan hasil penelitian yang valid dan dapat diandalkan. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini:

3.3.1. Studi Literatur

Penelitian dimulai dengan studi literatur untuk memahami teori dan konsep dasar mengenai rele proteksi *Overcurrent* (OCR) dan *Ground Fault* (GFR) serta

penerapan standar yang berlaku, seperti IEC 60255 dan IEEE C37.112. Pada tahap ini, literatur yang berkaitan dengan proteksi pada sistem tenaga listrik, perhitungan arus gangguan, serta standar internasional dikumpulkan untuk mendukung analisis.

3.3.2. Pengumpulan Data di Lapangan

Proses pengumpulan data di lapangan dilakukan di Gardu Induk 150 kV Kebasen dengan fokus pada Bay Kopel. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Data teknis peralatan: Spesifikasi dan karakteristik peralatan proteksi, seperti *rating* arus dan tegangan transformator, *setting* rele OCR dan GFR, serta informasi tentang saluran transmisi dan beban yang dilayani.
2. *Setting* rele yang sudah diterapkan: Data *setting* proteksi rele OCR dan GFR yang sudah ada di lapangan diambil dari dokumen teknis gardu.
3. Pengukuran lapangan: Jika diperlukan, dilakukan pengukuran langsung terhadap arus, tegangan, dan impedansi saluran menggunakan alat pengukur seperti *multimeter* dan *clamp* meter untuk memverifikasi data teknis yang ada.

3.3.3. Perhitungan Arus Gangguan

Setelah data teknis diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan arus gangguan dengan menggunakan rumus-rumus yang sesuai dengan standar internasional:

1. Perhitungan Arus Hubung Singkat: Perhitungan ini melibatkan analisis impedansi saluran dan sumber untuk menentukan besarnya arus gangguan yang mungkin terjadi di sistem tenaga listrik.
2. Perhitungan Arus Tanah (*Ground Fault Current*): Berdasarkan konfigurasi sistem grounding dan karakteristik tanah, arus gangguan tanah dihitung untuk menentukan sensitivitas *setting* rele GFR.
3. Perhitungan dilakukan secara manual dengan spreadsheet, serta diverifikasi dengan menggunakan *software* seperti ETAP atau PowerFactory untuk memastikan akurasi hasil perhitungan.

3.3.4. Penentuan *Setting* Rele OCR dan GFR

Dari hasil perhitungan arus gangguan, *setting* rele proteksi OCR dan GFR dihitung menggunakan standar yang berlaku. Tahapan ini meliputi:

1. *Setting* Arus *Pickup*: Menentukan arus minimum yang akan memicu kerja rele OCR dan GFR. *Setting* ini harus disesuaikan dengan karakteristik sistem untuk memastikan rele bekerja pada kondisi gangguan yang tepat.
2. *Setting* Waktu Kerja: Menentukan kurva karakteristik waktu kerja rele sesuai dengan standar IEC 60255. *Setting* waktu harus diatur sedemikian rupa sehingga rele bekerja dengan cepat saat terjadi gangguan, namun tetap mempertimbangkan selektivitas dan koordinasi dengan rele lain di sistem.

3.3.5. Simulasi Pengujian *Setting*

Setelah *setting* rele OCR dan GFR ditentukan, dilakukan simulasi menggunakan *software* analisis sistem tenaga listrik seperti ETAP atau PowerFactory. Simulasi ini bertujuan untuk:

1. Menguji performa *setting* proteksi: Menilai apakah rele dapat mendeteksi gangguan dengan cepat dan tepat tanpa menimbulkan operasi yang salah (*false trip*).
2. Evaluasi koordinasi proteksi: Memastikan bahwa rele di Bay Kopel berkoordinasi dengan rele lain di sistem, sehingga hanya rele yang paling dekat dengan lokasi gangguan yang bekerja.

3.3.6. Hasil Perhitungan dengan *Setting* di Lapangan

Langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil perhitungan *setting* dengan *setting* yang telah diterapkan di Bay Kopel Gardu Induk Kebasen. Tujuan perbandingan ini adalah untuk:

1. Menilai efektivitas *setting* yang sudah ada: Menentukan apakah *setting* yang sudah diterapkan di gardu induk sudah sesuai dengan hasil perhitungan teoretis dan standar yang berlaku.

2. Identifikasi perbedaan: Jika terdapat perbedaan antara hasil perhitungan dan *setting* yang sudah ada, analisis dilakukan untuk memahami penyebabnya dan apakah perlu dilakukan penyesuaian.

3.3.7. Analisis dan Penyimpulan

Setelah perbandingan selesai, hasil penelitian dianalisis secara mendalam. Analisis ini mencakup:

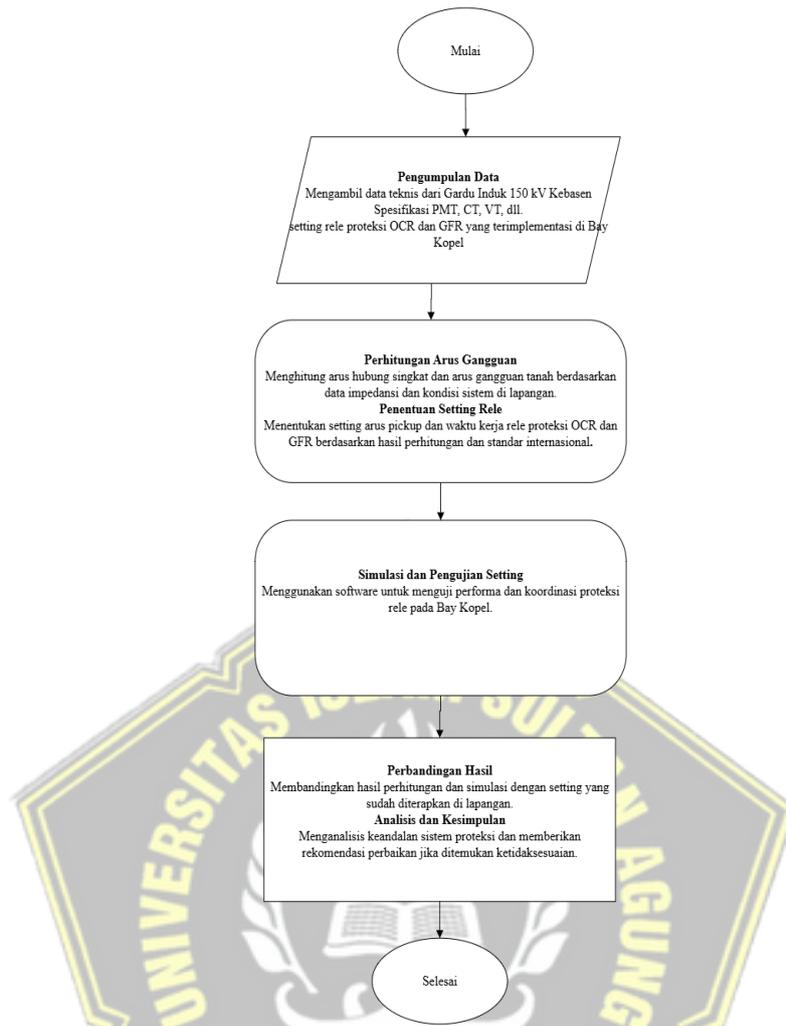
1. Evaluasi keandalan proteksi: Berdasarkan simulasi dan perhitungan, dinilai apakah proteksi OCR dan GFR pada Bay Kopel sudah optimal atau masih memerlukan perbaikan.
2. Rekomendasi perbaikan: Jika ditemukan bahwa *setting* proteksi yang ada tidak optimal, rekomendasi akan diberikan untuk mengoptimalkan *setting* proteksi sesuai dengan hasil perhitungan.

3.3.8. Penyusunan Laporan

Langkah terakhir adalah menyusun laporan hasil penelitian dalam bentuk skripsi, yang mencakup seluruh proses penelitian mulai dari studi literatur, pengumpulan data, perhitungan, analisis, hingga kesimpulan dan rekomendasi.

3.4 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahap berdasarkan diagram alur pada gambar 8.



Gambar 3. 7 Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian dimulai dengan pengumpulan data teknis dari Gardu Induk 150 kV Kebasen, termasuk spesifikasi PMT, CT, VT, dan setting rele proteksi OCR dan GFR yang telah terimplementasi di Bay Kopel. Selanjutnya, dilakukan perhitungan arus hubung singkat dan arus gangguan tanah berdasarkan data impedansi serta kondisi sistem di lapangan dengan menggunakan simulasi *digilent*. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, ditentukan *setting* arus *pickup* dan waktu kerja rele proteksi OCR dan GFR. *Setting* ini kemudian diuji melalui simulasi menggunakan software *digilent* untuk menilai performa dan koordinasi proteksi rele pada Bay Kopel. Hasil simulasi dan perhitungan dibandingkan dengan *setting* yang telah diterapkan di lapangan untuk mengidentifikasi potensi kesalahan atau ketidaktepatan.

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, data yang diperoleh dari Gardu Induk 150 kV Kebasen meliputi spesifikasi peralatan seperti pemutus tenaga (PMT), transformator arus (CT), transformator tegangan (VT), serta *setting* awal rele OCR dan GFR pada Bay Kopel. Data ini menjadi dasar untuk melakukan analisis lebih lanjut mengenai kinerja sistem proteksi.

Tabel 4. 1 Data Peralatan GI 150 KV Kebasen Bay Kopel

Spesifikasi PMT Bay Kopel GI Kebasen		
Item	Nilai/Keterangan	Satuan
Standard	IEC62271	
Rated Voltage	170	KV
Rated Current	4000	A
Rated Short-Circuit Breaking Current	50	KA
Spesifikasi CT Bay Kopel GI Kebasen		
Ratio	2000-4000 / 1	A
Spesifikasi CVT Bay Kopel GI Kebasen		
Ratio	150000 / 100	V
NB : CCC terkecil arus nominal peralatan adalah 4000 A		

Tabel 4. 2 Data *Setting Eksisting* OCR dan GFR Bay Kopel

Setting OCR dan GFR Bay Kopel GI Kebasen		
	Fungsi	Setting
OCR	I>	1,2 A
	SI (IEC)	0,514 TMS
GFR	Ie>	0,4 A
	SI (IEC)	0,77 TMS

Pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 merupakan data peralatan bay kopel GI Kebasen, Pengumpulan data ini dilakukan dengan mengakses dokumen teknis di Gardu Induk Kebasen, dan observasi langsung ke lokasi peralatan. Data yang terkumpul akan menjadi dasar untuk melakukan perhitungan arus gangguan, penentuan *setting* baru, dan evaluasi performa proteksi pada Bay Kopel.

4.2 Perhitungan Nilai Setting OCR dan GFR Bay Kopel

Penentuan *setting* rele proteksi untuk Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen dilakukan berdasarkan standar internasional dan rekomendasi dari induk sistem. Setting ini mencakup *Overcurrent Relay* (OCR) untuk proteksi arus lebih dan *Ground Fault Relay* (GFR) untuk proteksi. Standar yang digunakan untuk *setting* menggunakan standar IEC 60255 [13].

$$\text{Standard Inverse (SI)} \quad t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1} \quad (4.1)$$

$$\text{Verry Inverse (VI)} \quad t(G) = \text{TMS} * \frac{13,5}{\left(\frac{G}{GS}\right) - 1} \quad (3.2)$$

$$\text{Extremely Inverse (EI)} \quad t(G) = \text{TMS} * \frac{80}{\left(\frac{G}{GS}\right)^2 - 1} \quad (4.3)$$

Menurut panduan dalam buku Proteksi SPLN terkait pola proteksi busbar, penentuan *setting* rele proteksi arus lebih (*Overcurrent Relay/OCR*) dan gangguan tanah (*Ground Fault Relay/GFR*) didasarkan pada persentase tertentu dari arus nominal peralatan terkecil. Untuk OCR, nilai *setting* arus diatur sebesar 110–120% dari arus nominal, sementara untuk GFR, nilai *setting* arus diatur sebesar 20–40% dari arus nominal peralatan terkecil. *Setting* waktu kerja rele OCR mengikuti *standard inverse* (SI) dengan waktu kerja sebesar 1,5 detik, yang ditentukan berdasarkan nilai *breaking capacity* pemutus tenaga (PMT) pada Bay Kopel [14].

Pada kondisi gardu induk yang tidak dilengkapi dengan proteksi busbar, *setting* kerja rele dapat menggunakan metode *definite time* dengan waktu tunda sebesar 0,5

detik, sedangkan untuk *Zone 2 (Z2)* gardu induk *remote* diatur pada waktu 0,8 detik. Pengaturan ini bertujuan untuk menyelamatkan salah satu busbar yang tidak terkena gangguan.

Gardu Induk Kebasen, yang menjadi objek penelitian ini, telah dilengkapi dengan proteksi busbar. Oleh karena itu, acuan setting arus OCR ditentukan sebesar 120% dari arus nominal peralatan terkecil, sedangkan *setting* arus GFR ditentukan sebesar 40% dari arus nominal peralatan terkecil. Berdasarkan Tabel 4.1, diketahui bahwa arus nominal peralatan terkecil adalah 4000 A.

Berdasarkan buku satandar SPLN T5:011: 2024 Pola Proteksi Busbar dan Diameter Gardu Induk, maka untuk menentukan setting arus pada OCR dan GFR sebagai berikut:

$I_{\text{Nominal}} = 4000 \text{ A}$ diketahui dari tabel 4.1.

$I(\text{ arus setting OCR }) = 120\% (1,2) \text{ dari } I_n [14]$

Maka $I_s = 1,2 * 4000 \text{ A} = \mathbf{4800 \text{ A}}$

Berdasarkan rekomendasi SPLN untuk setting arus pada OCR bay Kopel GI Kebasen adalah 4800 A (Primer) dan 1,2 A (Sekunder)

Setting GFR :

$I_{\text{Nominal}} = 4000 \text{ A}$ diketahui dari tabel 4.1.

$I_e(\text{ arus setting GFR }) = 40\% (0,4) \text{ dari } I_n [14]$

Maka $I_e = 0,4 * 4000 \text{ A} = \mathbf{1600 \text{ A}}$.

Berdasarkan rekomendasi SPLN untuk setting arus pada GFR bay Kopel GI Kebasen adalah 1600 A (Primer) dan 0,4 A (Sekunder)

Setting waktu kerja rele untuk OCR dan GFR ditetapkan sebesar 1,5 detik, mengikuti nilai *breaking capacity* PMT pada Bay Kopel sebesar 50 kA. Menggunakan rumus persamaan 2 dan 3 untuk *setting* waktu dengan karakteristik *standar inverse* [14].

$$\text{Standard Inverse (SI)} \quad t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$t(G) = 1,5 \text{ s}$ (waktu yang ditetapkan SPLN)

G (*measured value*) = 50 KA merupakan nilai *breaking capacity* PMT pada Bay Kopel [14], dan GS (*setting value*) = 4800 A

$$\left(\frac{G}{GS}\right) = \frac{50.000 \text{ A}}{4800} = 10,416$$

$$t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$\text{TMS} = t(G) : \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1} = \mathbf{0,514 \text{ tms OCR}}$$

Untuk nilai TMS GFR sebagai berikut:

$$\left(\frac{G}{GS}\right) = \frac{50.000 \text{ A}}{1600} = 31,25$$

$$t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$\text{TMS} = t(G) : \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1} = \mathbf{0,77 \text{ tms OCR}}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang mengacu pada standar SPLN Pola Proteksi Busbar dan Diameter untuk menentukan nilai *setting* arus serta karakteristik waktu, dan perhitungan karakteristik waktu yang sesuai dengan standar IEC 60255 *Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection* dalam menentukan nilai *Time Multiplier Setting* (TMS), maka diperoleh *setting* proteksi sebagai berikut: Overcurrent Relay (OCR) *setting* pada arus 1,2 A (4800 A) dengan TMS sebesar 0,514 *standard Inverse* (SI), sedangkan *Ground Fault Relay* (GFR) *setting* pada arus 0,4 A (1600 A) dengan TMS sebesar 0,77 *standard Inverse* (SI). Dengan pengaturan ini, sistem proteksi pada Bay Kopel GI Kebasen diharapkan

dapat bekerja secara optimal untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan, serta melindungi peralatan dari potensi kerusakan akibat gangguan arus lebih maupun gangguan tanah.

Tabel 4. 3 Rekomendasi *Setting* Berdasarkan Standar SPLN dan IEC 60255

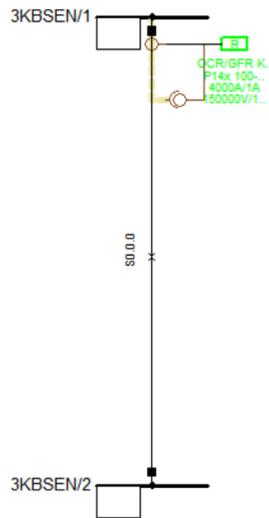
Rekomendasi <i>Setting</i> OCR dan GFR Bay Kopel GI Kebasen			
	Fungsi	Setting	Acuan Standar
OCR	I>	1,2 A	SPLN
	SI (IEC)	0,514 TMS	IEC 60255
GFR	Ie>	0,4 A	SPLN
	SI (IEC)	0,77 TMS	IEC 60255

4.3 Simulasi dan Evaluasi *Setting* Menggunakan *Software* DIgSILENT

Untuk memastikan bahwa *setting* rele proteksi yang telah ditentukan dapat berfungsi dengan baik dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. *Software* ini dipilih karena memiliki kemampuan untuk mensimulasikan berbagai skenario sistem tenaga, termasuk analisis proteksi dan koordinasi rele.

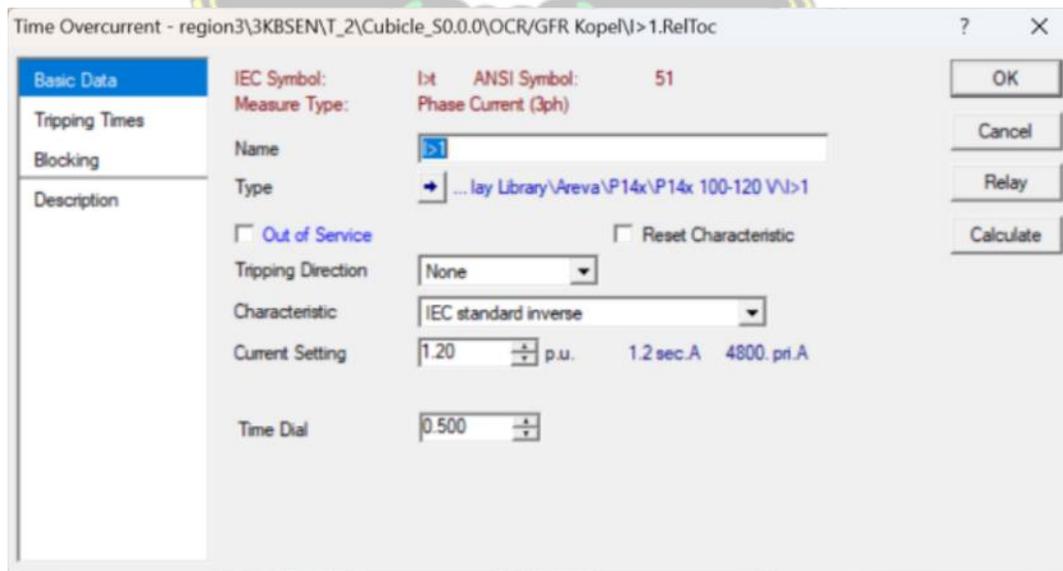
4.3.1 Pembuatan Model Sistem Tenaga

Model sistem tenaga Gardu Induk Kebasen dibuat dengan memasukkan data teknis dari peralatan utama, seperti *transformator*, PMT, CT, dan CVT, sesuai dengan spesifikasi yang telah dikumpulkan. Bay Kopel dimasukkan sebagai fokus utama dalam simulasi ini.



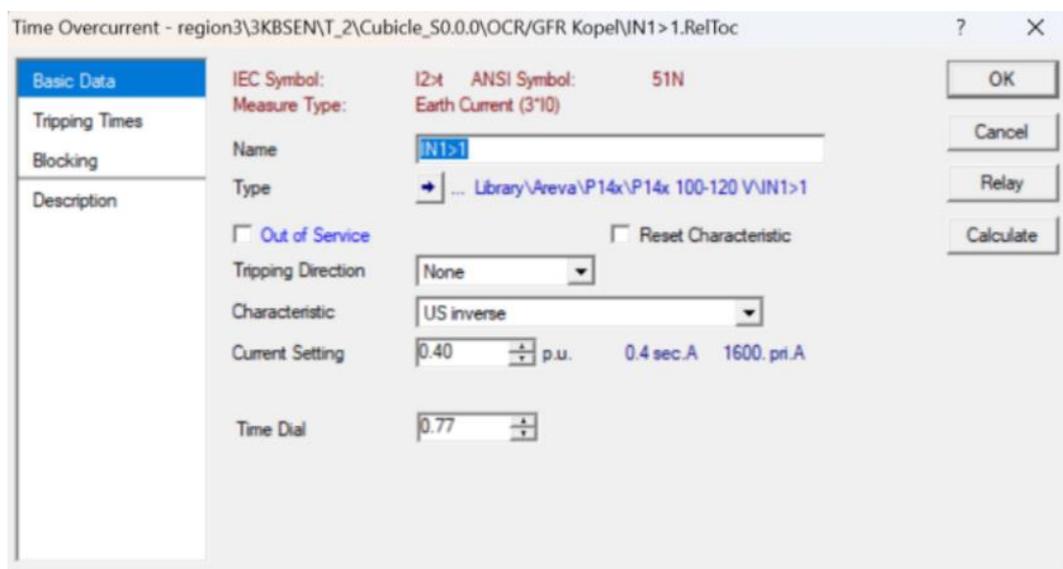
Gambar 4. 1 Pemodelan Bay Kopel dengan Aplikasi DIGSILENT

Gambar 4.1 menunjukkan diagram sistem tenaga listrik pada Bay Kopel di Gardu Induk Kebasen yang dibuat menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory. Sistem ini terdiri dari dua busbar, yaitu 3KBSSEN/1 dan 3KBSSEN/2, yang dihubungkan melalui Bay Kopel. Pada Bay Kopel, terpasang rele proteksi *Overcurrent Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) dengan type Alstom P14X, yang ditandai dengan simbol kotak hijau bertuliskan parameter seperti rasio CT (4000/1 A) dan tegangan nominal (150000 V).



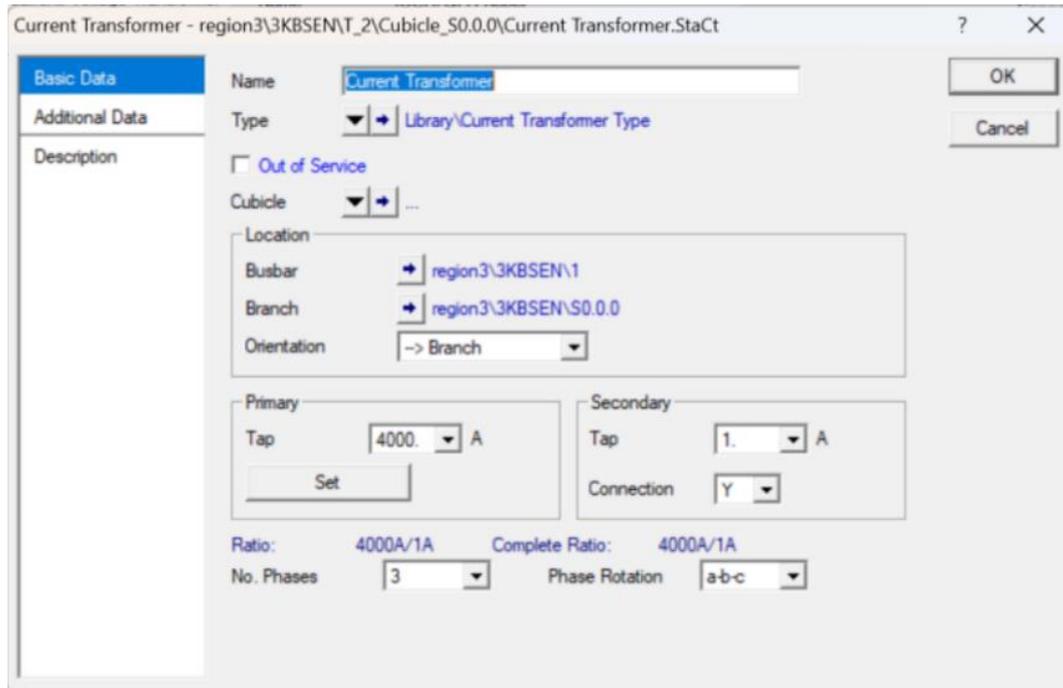
Gambar 4. 2 Setting Parameter Rele OCR pada DIGSILENT

Gambar 4.2 menunjukkan pengaturan parameter untuk rele OCR yang telah disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan. Nilai *setting* arus yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak DIgSILENT adalah sebesar 1,2 A pada sisi sekunder (setara dengan 4800 A pada sisi primer). Untuk pengaturan waktu kerja rele, digunakan *Time Multiplier Setting* (TMS) sebesar 0,5. Penyesuaian ini dilakukan mengingat kelipatan *setting* pada perangkat tidak memungkinkan pengaturan nilai TMS di 0,514, sehingga nilai 0,5 dipilih sebagai pendekatan yang paling sesuai. *Setting* ini akan digunakan untuk melakukan simulasi kerja rele OCR guna mengevaluasi keandalannya dalam menangani gangguan arus lebih.



Gambar 4. 3 Setting Parameter Rele GFR pada DIgSILENT

Gambar 4.3 menunjukkan pengaturan parameter untuk rele GFR yang telah disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan. Nilai *setting* arus yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak DIgSILENT adalah sebesar 0,4 A pada sisi sekunder (setara dengan 1600 A pada sisi primer). Untuk pengaturan waktu kerja rele, digunakan *Time Multiplier Setting* (TMS) sebesar 0,77. *Setting* ini akan digunakan untuk melakukan simulasi kerja rele OCR guna mengevaluasi keandalannya dalam menangani gangguan arus lebih.

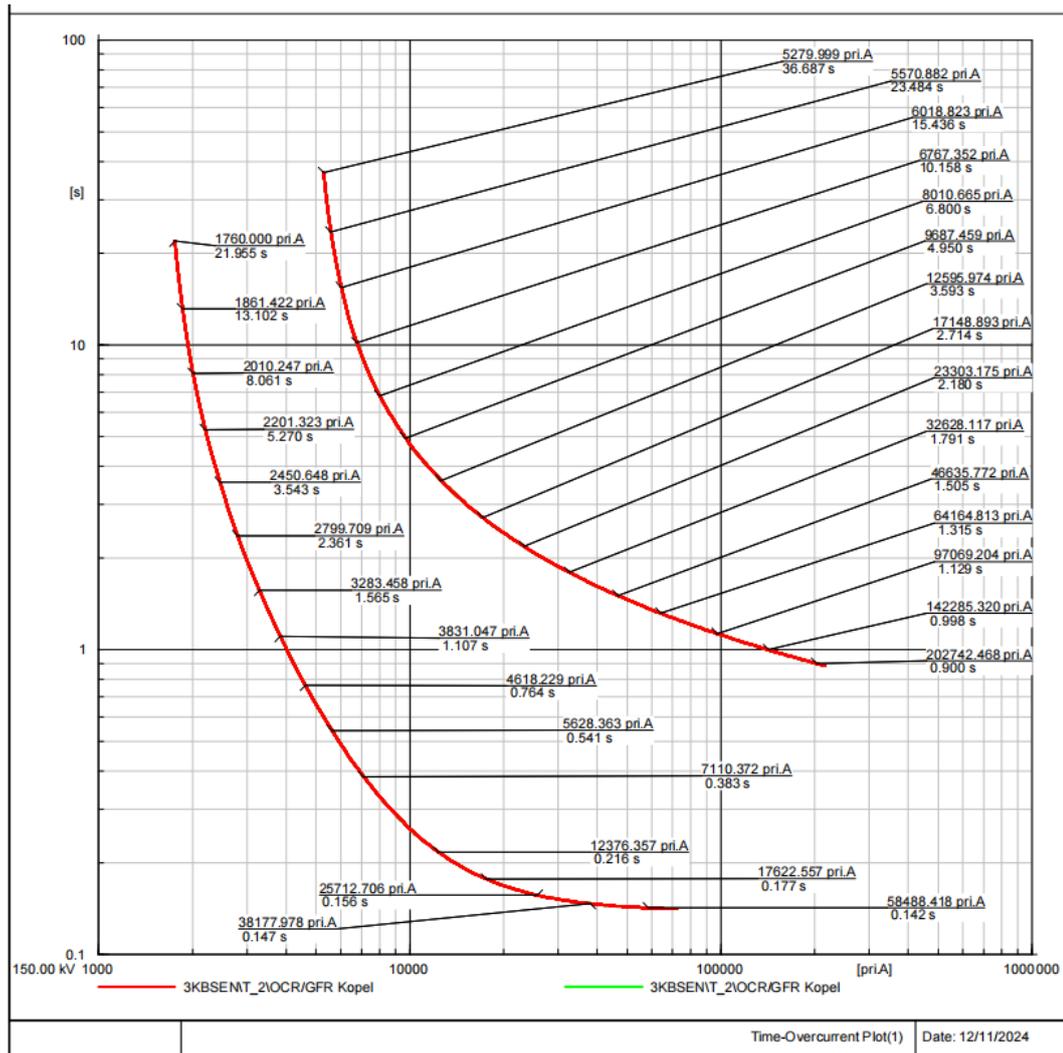


Gambar 4. 4 *Setting* Parameter CT pada DIgSILENT

Gambar 4.4 menunjukkan pengaturan parameter CT untuk rele OCR dan GFR. Nilai CT yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak DIgSILENT adalah sebesar 4000 A pada sisi primer dan 1 A pada sisi sekunder.

4.3.2 Simulasi Skenario Gangguan

Simulasi skenario gangguan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *setting* rele OCR dan GFR pada bay kopel di Gardu Induk Kebasen dengan menggunakan *software* DIgSILENT. Beberapa skenario gangguan yang disimulasikan meliputi gangguan tiga fasa, dua fasa ke tanah, dan satu fasa ke tanah, yang diterapkan pada titik-titik tertentu dalam sistem untuk menguji respons rele proteksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus gangguan yang terdeteksi oleh rele, waktu kerja rele untuk memutuskan gangguan, serta koordinasi dengan rele di lokasi lain sesuai dengan *setting* yang telah dihitung sebelumnya. Dengan gangguan yang diterapkan di dekat bay kopel, simulasi ini memastikan bahwa rele OCR dan GFR bekerja sesuai dengan standar, mampu mendeteksi dan memutuskan gangguan dalam waktu yang sesuai, serta mengisolasi gangguan tanpa memperburuk kondisi sistem tenaga listrik. Hal ini penting untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi di Gardu Induk Kebasen.



Gambar 4. 5 Karakteristik waktu kerja OCR dan GFR dengan simulasi DIgSILENT

Gambar 4.5 menunjukkan dua kurva karakteristik proteksi yang dihasilkan oleh software DIgSILENT. Kurva bawah mewakili karakteristik *ground fault relay* (GFR), sedangkan kurva atas menggambarkan karakteristik *overcurrent relay* (OCR). Kedua kurva ini menggambarkan hubungan antara arus gangguan (dalam ampere) dan waktu pemutusan (dalam detik).

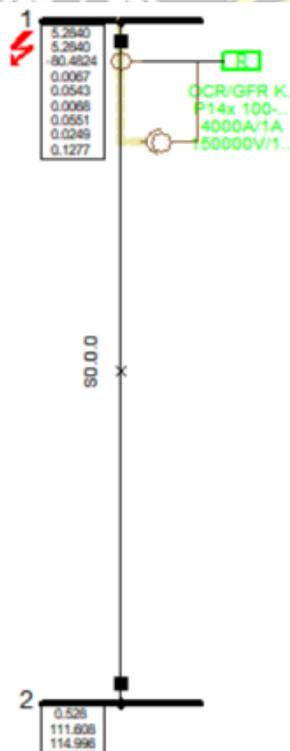
Tabel 4. 4 Karakteristik waktu kerja OCR dan GFR gambar 4.5

OCR					
x Arus Setting	1.7	2.6	3.6	4.8	6.8
Arus Gangguan (ampere)	8010.65	12596	17249	23203	32628

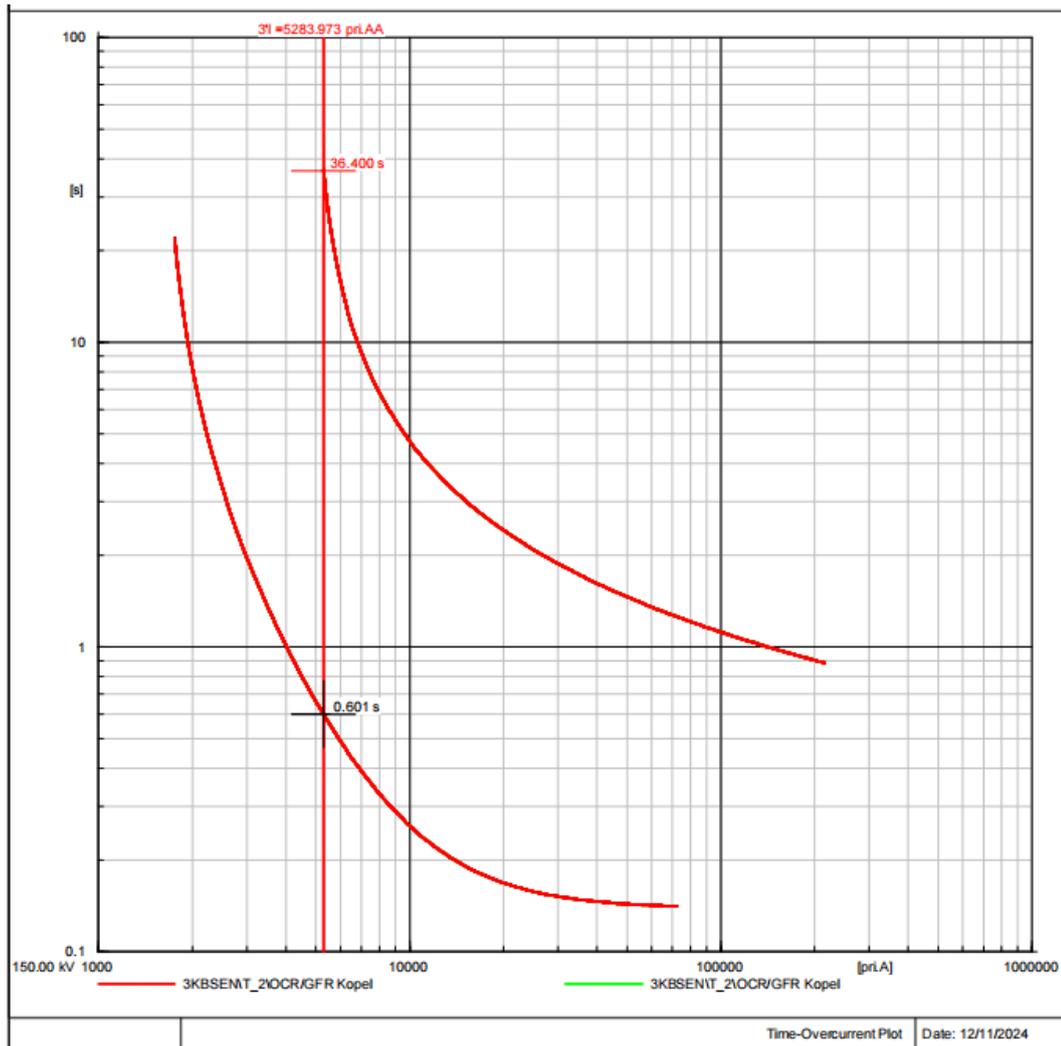
Waktu Kerja (s)	6.8	3.593	2.714	2.18	1.791
GFR					
x Arus <i>Setting</i>	1.5	2.1	2.9	3.5	4.4
Arus Gangguan (ampere)	2450.6	3283	4618	5628	7110
Waktu Kerja (s)	3.453	1.565	0.764	0.541	0.383

Kurva dan tabel ini digunakan untuk melakukan analisis waktu pemutusan yang diperlukan berdasarkan arus gangguan yang terdeteksi, baik untuk OCR maupun GFR, pada sistem proteksi di Gardu Induk Kebasen. Beberapa skenario gangguan disimulasikan, meliputi:

A. Simulasi Gangguan Fasa Ke Tanah Pada Busbar 1



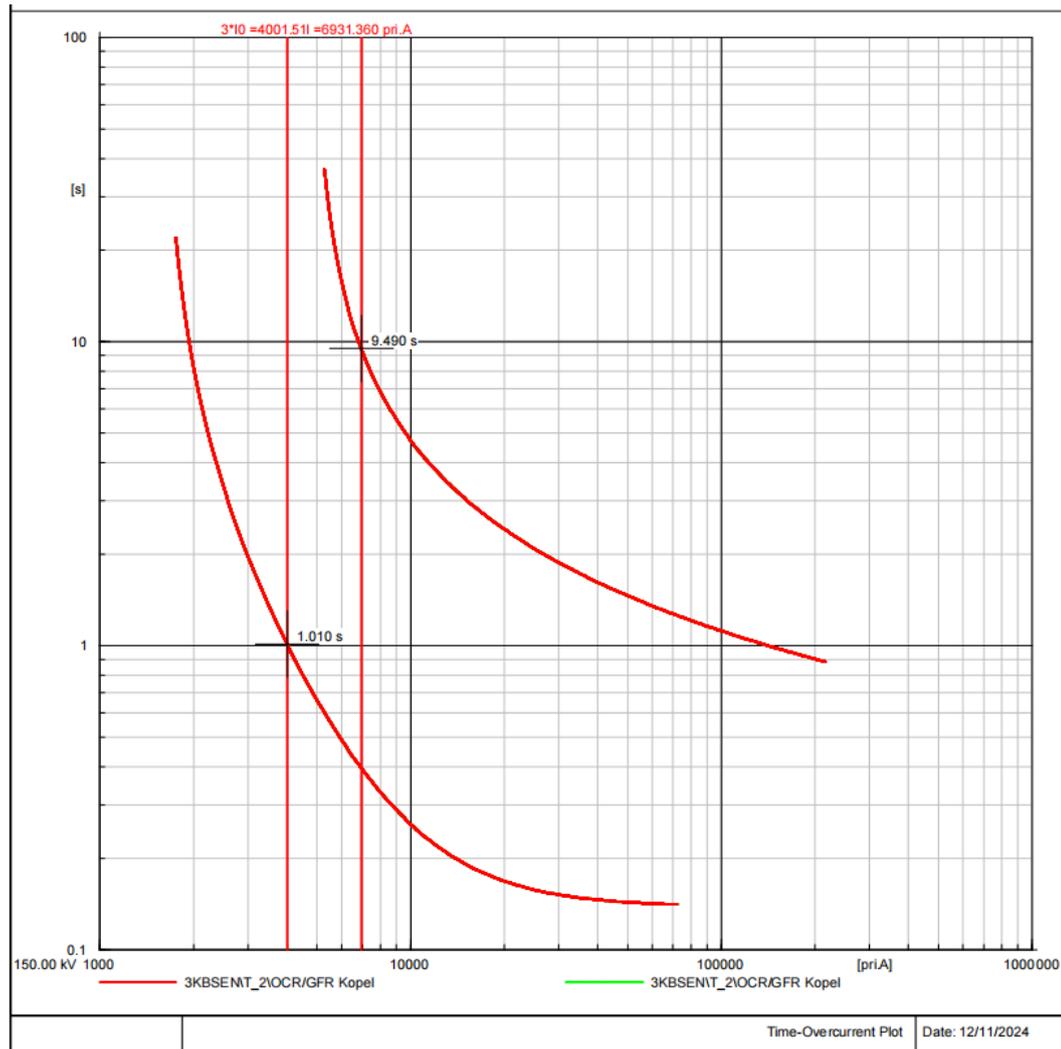
Gambar 4. 6 Simulasi Gangguan Busbar 1



Gambar 4. 7 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 1phs - GND Busbar 1

Pada Gambar 4.6, gangguan disimulasikan pada Busbar 1 dengan arus hubung singkat sebesar 5,284 kA. Hasil simulasi yang ditampilkan pada Gambar 4.7 menunjukkan respons sistem proteksi terhadap gangguan tersebut, termasuk waktu pemutusan dan arus yang terdeteksi oleh rele proteksi. Rele yang bekerja adalah GFR (*ground fault relay*) dengan waktu kerja 0,601 detik, dan OCR (*overcurrent relay*) dengan waktu kerja 36,4 detik. Dengan demikian, GFR bekerja lebih dahulu, yang ditunjukkan dengan induksi GFR trip dan OCR *pickup*.

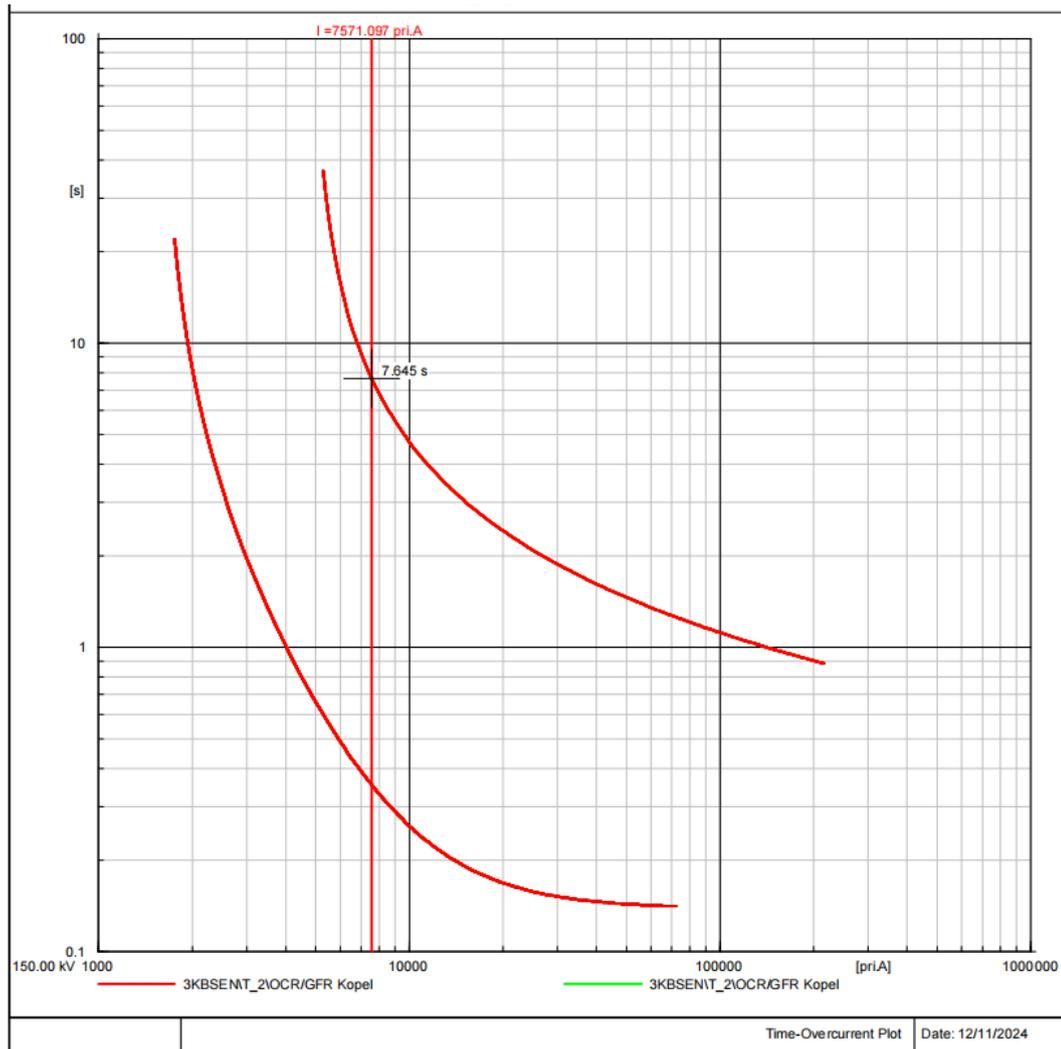
B. Simulasi Gangguan Fasa-Fasa Ke Tanah Pada Busbar 1



Gambar 4. 8 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 2phs - GND Busbar 1

Pada Gambar 4.8, hasil simulasi menunjukkan terjadinya gangguan dengan arus hubung singkat *phase-to-ground* sebesar 4001,5 A dan *phase-to-phase* sebesar 6931,3 A. Dalam simulasi tersebut, *ground fault relay* (GFR) bekerja lebih cepat dengan waktu kerja 1,01 detik, sementara *overcurrent relay* (OCR) bekerja dalam waktu 9,49 detik. Dengan demikian, fungsi proteksi GFR akan mengamankan gangguan tersebut karena memiliki respons yang lebih cepat.

C. Simulasi Gangguan 3 Fasa Pada Busbar 1



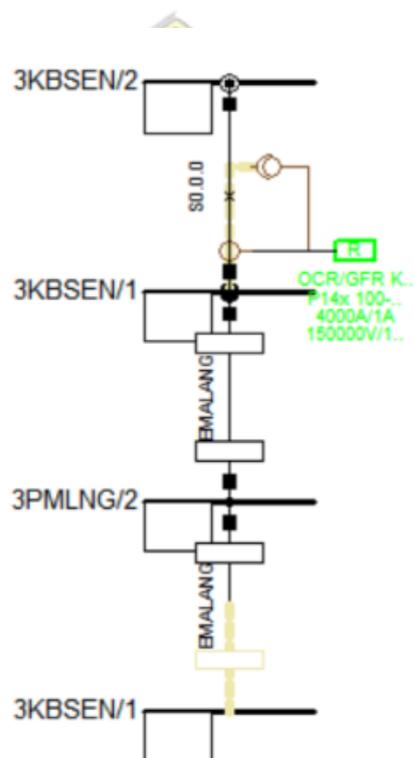
Gambar 4. 9 Respons Sistem Proteksi Terhadap Gangguan 3phs Busbar 1

Pada Gambar 4.9, simulasi gangguan menunjukkan terjadinya gangguan tiga fasa (*3-phase*) pada Busbar 1 dengan arus hubung singkat sebesar 7571 A. Gangguan tersebut dideteksi oleh *overcurrent relay* (OCR), yang bekerja dengan waktu operasi sebesar 7,645 detik untuk mengamankan sistem dari dampak gangguan.

Berdasarkan analisis Gambar 4.7, 4.8, dan 4.9, dapat disimpulkan bahwa rele proteksi pada sistem bekerja sesuai dengan karakteristik *standard inverse*. Karakteristik ini diterapkan karena Gardu Induk Kebasen telah dilengkapi dengan sistem proteksi busbar yang memiliki waktu respons sangat cepat, yaitu kurang dari 0,1 detik. Proteksi busbar berfungsi untuk mengamankan gangguan secara langsung pada busbar, sehingga menjadi proteksi utama.

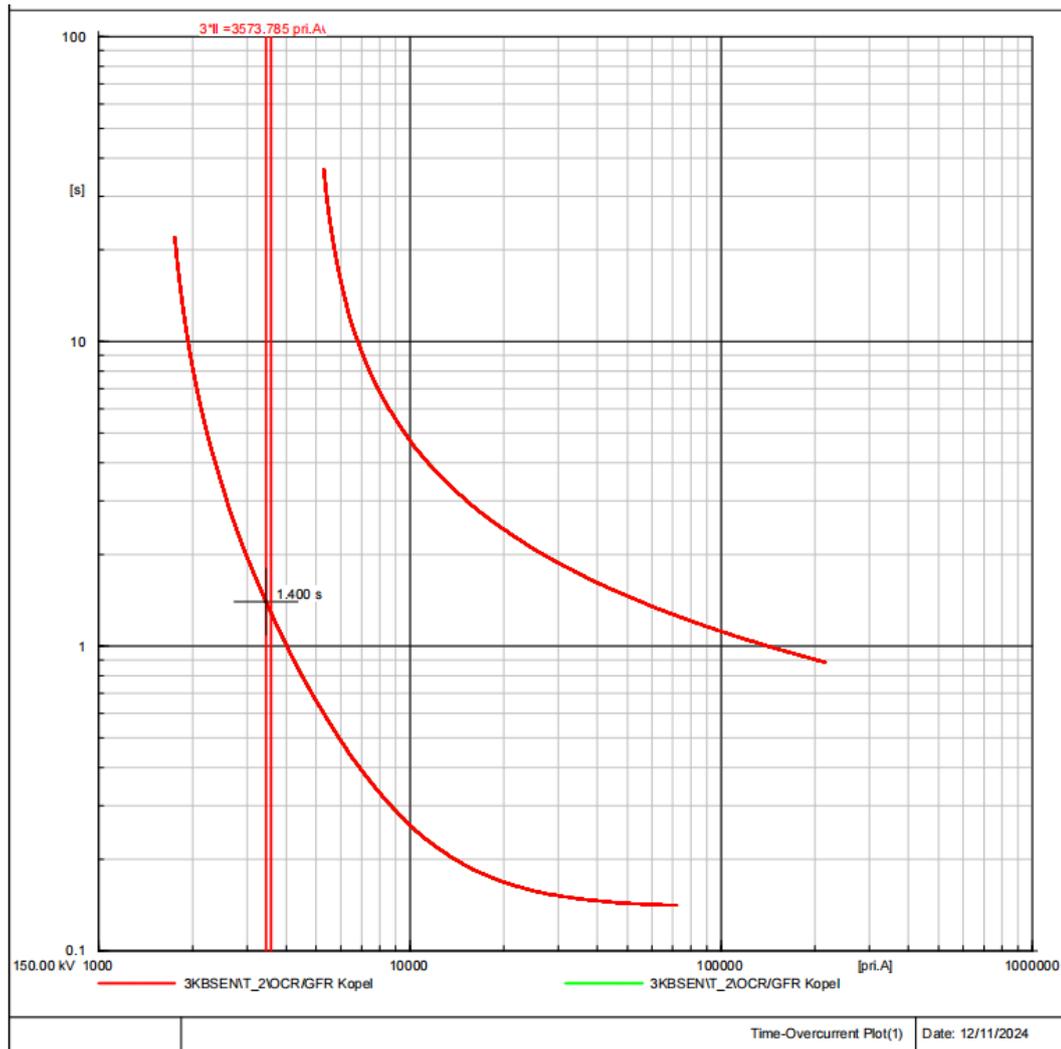
Dalam skenario gangguan yang terjadi, rele OCR dan GFR berfungsi sebagai proteksi cadangan dan bekerja setelah proteksi busbar jika diperlukan. Waktu kerja rele OCR dan GFR telah diatur berdasarkan *setting* yang disesuaikan dengan karakteristik sistem dan memastikan selektivitas proteksi tetap terjaga. Hal ini menunjukkan bahwa sistem proteksi pada Gardu Induk Kebasen telah dirancang untuk memberikan perlindungan yang andal, dengan memastikan gangguan dapat diisolasi secara efektif tanpa mengorbankan keandalan operasional jaringan secara keseluruhan.

D. Simulasi Gangguan Fasa Ke Tanah Pada SUTT Kebasen Pemalang



Gambar 4. 10 Pemodelan OCR dan GFR Kopel dengan SUTT Kebasen Pemalang

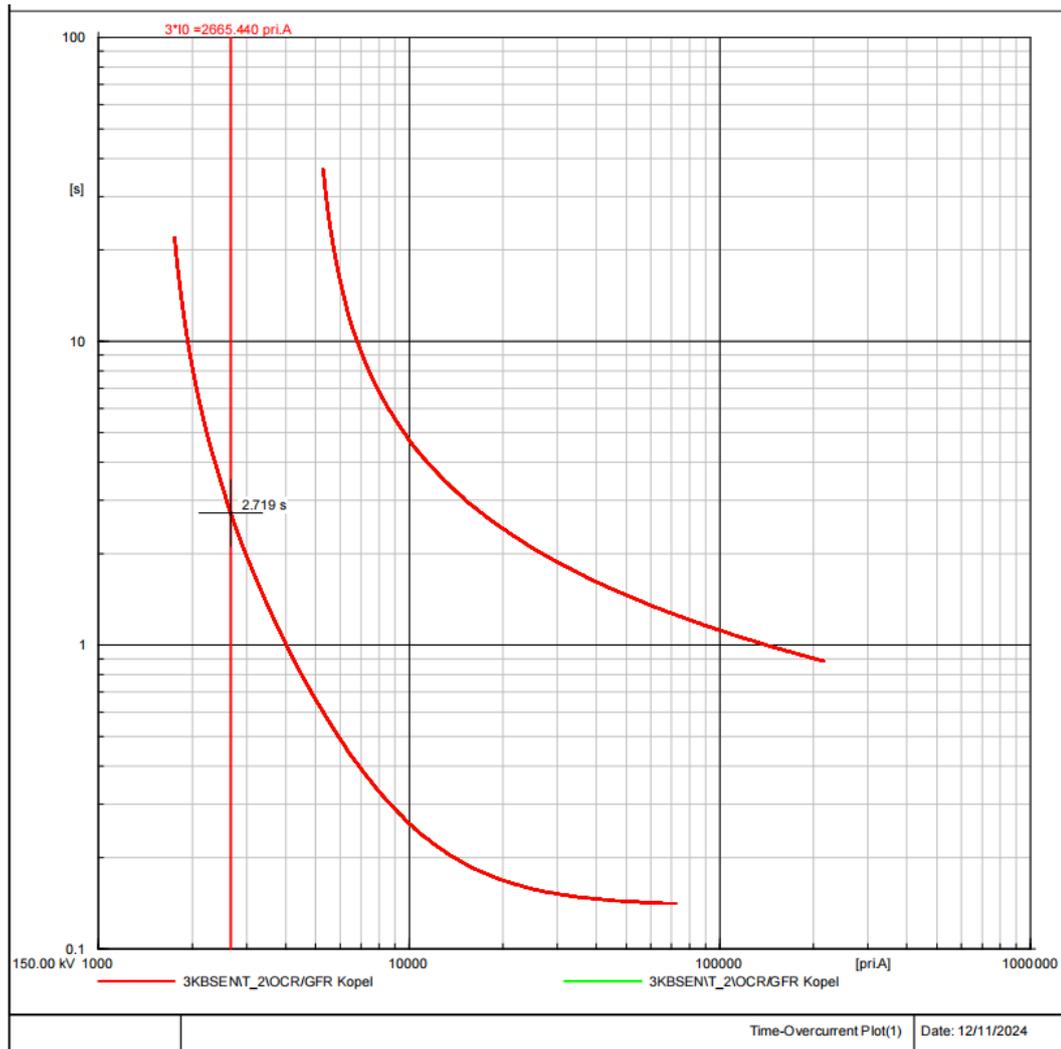
Pada Gambar 4.10, ditampilkan pemodelan simulasi OCR pada bay kopel di Gardu Induk Kebasen yang terhubung ke SUTT Kebasen–Pemalang. Pemodelan ini dilakukan untuk mengevaluasi koordinasi proteksi antara OCR pada bay kopel dengan sistem proteksi pada SUTT Kebasen–Pemalang. Tujuannya adalah memastikan proteksi bekerja secara selektif dalam menangani gangguan.



Gambar 4. 11 Gangguan 1Phs to GND Pada SUTT Kebasen Pemalang

Pada Gambar 4.11, hasil simulasi menunjukkan adanya gangguan satu fasa ke tanah pada SUTT Kebasen–Pemalang dengan arus gangguan sebesar 3573,7 A. Gangguan ini terdeteksi oleh rele GFR dengan waktu kerja sebesar 1,4 detik.

E. Simulasi Gangguan Fasa-Fasa Ke Tanah Pada SUTT Kebasen Pemalang



Gambar 4. 12 Gangguan 2Phs to GND Pada SUTT Kebasen Pemalang

Pada Gambar 4.12, ditampilkan simulasi gangguan *phase-to-phase to ground* pada SUTT Kebasen–Pemalang dengan arus gangguan sebesar 2665,4 A. Gangguan ini dirasakan oleh rele GFR pada bay Kopel GI Kebasen dengan waktu kerja sebesar 2,719 detik. Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 4.11 dan gambar 4.12, diketahui bahwa gangguan yang terjadi pada SUTT Kebasen–Pemalang dapat disimpulkan bahwa rele proteksi pada sistem bekerja sesuai dengan karakteristik *standard inverse*, hasil Simulasi menunjukkan bahwa proteksi di gardu induk *remote* berhasil mengisolasi gangguan tanpa memicu *trip* pada OCR dan GFR bay Kopel di Gardu Induk Kebasen. Hal ini memastikan bahwa rele OCR dan GFR pada bay Kopel Gardu Induk Kebasen tidak bekerja lebih dahulu, sehingga gangguan

dapat diamankan oleh proteksi utama pada SUTT Kebasen–Pemalang, membuktikan koordinasi proteksi yang baik.

4.4 Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa koordinasi proteksi antara rele OCR dan GFR pada bay kopel di Gardu Induk Kebasen dengan proteksi busbar dan proteksi pada SUTT Kebasen–Pemalang telah berjalan sesuai dengan perhitungan dan pengaturan yang telah dilakukan. *Setting* rele yang diterapkan berhasil memenuhi standar selektivitas proteksi, sehingga memastikan gangguan ditangani secara efektif tanpa memengaruhi keandalan sistem transmisi secara keseluruhan.

Hasil simulasi yang telah dilakukan bertujuan untuk mengevaluasi kinerja setting rele OCR dan GFR pada bay kopel Gardu Induk Kebasen. Analisis ini dilakukan berdasarkan beberapa indikator berikut:

1. Waktu Kerja Rele dalam Merespons Gangguan

Simulasi menunjukkan bahwa rele OCR dan GFR bekerja sesuai dengan waktu kerja yang telah dihitung berdasarkan standar karakteristik *standard inverse*. Misalnya, pada gangguan satu fasa ke tanah (*phase-to-ground*) dengan arus gangguan sebesar 3573,7 A, rele GFR bekerja dalam waktu 1,4 detik, sedangkan pada gangguan tiga fasa (*three-phase fault*) dengan arus hubung singkat sebesar 7571 A, rele OCR bekerja dalam waktu 7,645 detik. Waktu kerja ini sesuai dengan koordinasi proteksi yang dirancang agar sistem dapat mengamankan gangguan secara efektif.

2. Koordinasi dengan Proteksi Lain

Simulasi membuktikan bahwa rele OCR dan GFR di Gardu Induk Kebasen telah terkoordinasi dengan baik dengan proteksi busbar dan rele di gardu induk *remote*. Proteksi busbar, yang bekerja secara instan (di bawah 0,1 detik), selalu merespons gangguan terlebih dahulu pada busbar. Hal ini memastikan bahwa rele OCR dan GFR hanya bekerja jika proteksi utama tidak bekerja, sehingga tidak ada redundansi kerja yang mengganggu operasi sistem.

3. Kemampuan Mendeteksi Gangguan

Rele berhasil mendeteksi arus gangguan sesuai dengan *setting* arus yang telah dihitung. Sebagai contoh, pada gangguan *phase-to-phase to ground* pada SUTT Kebasen Pemalang dengan arus gangguan sebesar 2665,4 A, rele GFR bekerja dalam waktu 2,719 detik. Simulasi juga menunjukkan bahwa gangguan pada SUTT Kebasen–Pemalang berhasil diamankan oleh proteksi utama di SUTT tersebut, tanpa memicu *trip* yang tidak diinginkan pada rele OCR dan GFR di bay kopel pada Gardu Induk Kebasen. Hal ini membuktikan bahwa *setting* arus telah disesuaikan dengan tingkat arus nominal peralatan terkecil dan skema proteksi yang dirancang.

Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa setting rele OCR dan GFR pada bay kopel Gardu Induk Kebasen telah sesuai dengan standar dan rekomendasi proteksi. *Setting* ini mampu memastikan waktu kerja yang selektif, koordinasi yang baik dengan proteksi lain, serta kemampuan mendeteksi gangguan secara akurat. Dengan demikian, sistem proteksi pada Gardu Induk Kebasen dapat bekerja secara andal dalam menghadapi berbagai skenario gangguan.

4.5 Analisis Hasil Dengan Peralatan Eksisting

Hasil analisis menunjukkan bahwa *setting* rele yang telah terimplementasi di Gardu Induk Kebasen telah sesuai dengan hasil perhitungan yang dilakukan. Perbedaan antara *setting eksisting* dengan hasil perhitungan hanya terletak pada pembulatan nilai parameter rele. Pada tabe 4.4, nilai *time multiplier setting* (TMS) *eksisting* adalah 0,515, sedangkan hasil perhitungan menunjukkan nilai TMS sebesar 0,514. Perbedaan ini sangat kecil dan dapat dianggap tidak signifikan, mengingat adanya batas toleransi dalam pengaturan rele.

Tabel 4. 5 Nilai Setting GI Kebasen dan Perhitungan

Setting OCR dan GFR Bay Kopel GI Kebasen				
Relay	Fungsi	Setting Eksisting	Setting Perhitungan	Standar
OCR	I>	1,2 A	1,2 A	1,1 – 1,2 (SPLN)
	SI (IEC)	0,515 TMS	0,514 TMS	0,514 (IEC 60255)
GFR	Ie>	0,4 A	0,4 A	0,2 – 0,4 (SPLN)
	SI (IEC)	0,77 TMS	0,77 TMS	0,77 (IEC 60255)

Dengan demikian, *setting* yang terimplementasi sudah memenuhi kriteria proteksi yang optimal dan sesuai dengan standar yang berlaku. Hal ini memastikan bahwa rele proteksi dapat bekerja secara selektif dan andal dalam mengamankan sistem tenaga listrik di Gardu Induk Kebasen.

Pada Gambar 4.13, ditampilkan hasil pengujian individu terhadap rele OCR dan GFR yang terpasang di Bay Kopel Gardu Induk Kebasen. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja rele dalam merespons berbagai skenario arus injeksi dengan kelipatan tertentu dari nilai *pickup current* (Iset). Pengujian dilakukan pada empat kondisi, yaitu $1,5 \times Iset$, $2,0 \times Iset$, $2,5 \times Iset$, dan $3,0 \times Iset$.

Poin Pengujian	Parameter	1.5 x Iset	2.0 x Iset	2.5 x Iset	3.0 x Iset
OCR Fasa R	Arus Injeksi (A)	1,80	2,40	3,00	3,60
	Hasil Kalkulasi (s)	8,86	5,16	3,90	3,25
	Hasil Uji (s)	8,84	5,17	3,91	3,26
	% Error	0%	0%	0%	0%
OCR Fasa S	Arus Injeksi (A)	1,80	2,40	3,00	3,60
	Hasil Kalkulasi (s)	8,86	5,16	3,90	3,25
	Hasil Uji (s)	8,84	5,18	3,91	3,26
	% Error	0%	0%	0%	1%
OCR Fasa T	Arus Injeksi (A)	1,80	2,40	3,00	3,60
	Hasil Kalkulasi (s)	8,86	5,16	3,90	3,25
	Hasil Uji (s)	8,85	5,17	3,91	3,26
	% Error	0%	0%	0%	0%
GFR	Arus Injeksi (A)	0,60	0,80	1,00	1,20
	Hasil Kalkulasi (s)	13,24	7,72	5,83	4,85
	Hasil Uji (s)	13,34	7,77	5,86	4,88
	% Error	1%	1%	1%	1%
Kalkulasi Error Terbesar		1%	1%	1%	1%
Hasil Asesmen		9	9	9	9

Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Karakteristik OCR dan GFR pada GI Kebasen Bay Kopel

Perhitungan nilai $t(G)$ atau hasil kalkulasi (dalam satuan s) sebagai berikut :

1. Untuk PHS R $1,5 \times Iset$ (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 1,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(1,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 8,86 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 8,84 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{8,84 - 8,86}{8,86} \times 100\%$$

$$= - 0,22 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

2. Untuk PHS R 2,5 x Iset (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 2,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(2,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 3,9 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 3,91 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{3,91 - 3,9}{3,9} \times 100\%$$

$$= 0,25 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

3. Untuk PHS S 1,5 x Iset (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 1,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(1,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 8,86 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 8,84 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{8,84 - 8,86}{8,86} \times 100\%$$

$$= - 0,22 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

4. Untuk PHS S 2,5 x Iset (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 2,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(2,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 3,9 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 3,91 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{3,91 - 3,9}{3,9} \times 100\%$$

$$= 0,25 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

5. Untuk PHS T 1,5 x Iset (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 1,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(1,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 8,86 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 8,85 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{8,85 - 8,86}{8,86} \times 100\%$$

$$= -0,11 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

6. Untuk PHS T 2,5 x Iset (arus setting OCR 4800 A primer atau 1,2 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 2,5$, dan $TMS = 0,514$

$$t(G) = TMS * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,514 * \frac{0,14}{(2,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 3,9 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 3,91 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{3,91 - 3,9}{3,9} \times 100\%$$

= 0,25 %

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

7. Untuk GFR 1,5 x Iset (arus setting OCR 1600 A primer atau 0,4 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 1,5$, dan TMS = 0,77

$$t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,77 * \frac{0,14}{(1,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 13,24 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 13,34 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} * 100\%$$

$$\text{Error \%} = \frac{13,34 - 13,24}{13,24} * 100\%$$

$$= 0,75 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

8. Untuk GFR 2,5 x Iset (arus setting OCR 1600 A primer atau 0,4 A sekunder).

Diketahui, $\left(\frac{G}{GS}\right) = 2,5$, dan TMS = 0,77

$$t(G) = \text{TMS} * \frac{0,14}{\left(\frac{G}{GS}\right)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 0,77 * \frac{0,14}{(2,5)^{0,02} - 1}$$

$$t(G) = 5,83 \text{ s}$$

bedasarkan hasil uji pada gambar 4.13 didapat hasil 5,86 s, sehingga error pengujian sebesar.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Nilai Ukur} - \text{Nilai Hitung}}{\text{Nilai Hitung}} \times 100\%$$

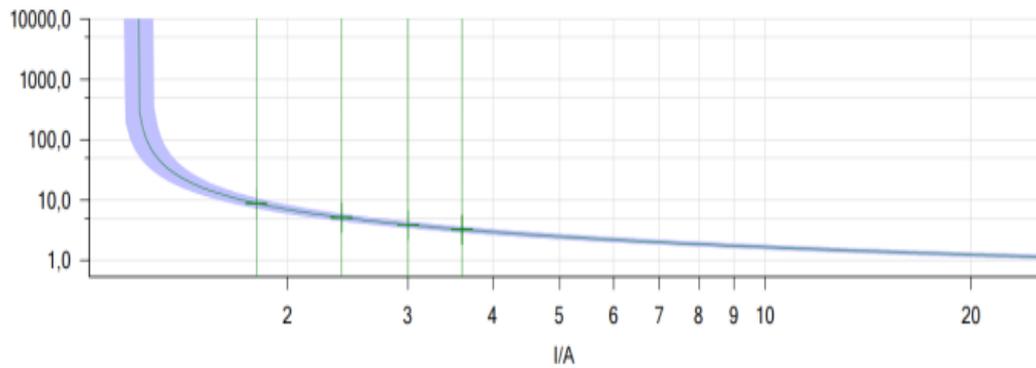
$$\text{Error \%} = \frac{5,86 - 5,83}{5,83} \times 100\%$$

$$= 0,51 \%$$

Dalam standar IEC 60255, batas error yang diijinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ms}$. Sehingga hasil uji masih sesuai dengan standar IEC 6055.

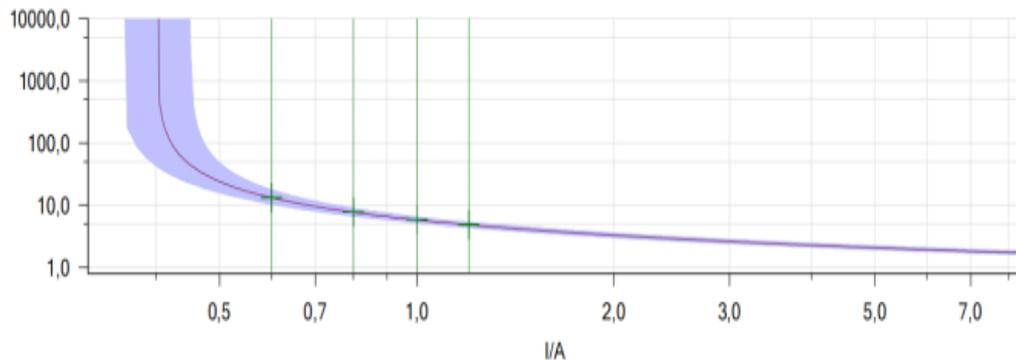
Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu kerja hasil kalkulasi dan waktu kerja hasil uji berada dalam batas toleransi dengan tingkat kesalahan (*error percentage*) maksimum sebesar 1%, yang sesuai dengan standar pengujian rele proteksi. Pada rele OCR (fase R, S, dan T), waktu kerja hasil pengujian menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan hasil kalkulasi pada semua skenario arus injeksi. Hal serupa juga ditunjukkan oleh rele GFR, di mana nilai waktu kerja hasil uji memiliki deviasi yang sangat kecil dibandingkan nilai kalkulasi. Dalam standar IEC 60255, batas error yang diizinkan adalah $\pm 5\%$ atau $\pm 20\text{ ms}$, sehingga hasil uji ini masih berada dalam rentang toleransi yang diperbolehkan oleh standar IEC 60255 dan dapat dikategorikan sebagai valid serta sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

Pada Gambar 4.14 ditampilkan kurva karakteristik kerja rele OCR (*Overcurrent Relay*) yang menunjukkan hubungan antara arus gangguan (I/A) dengan waktu kerja rele (dalam satuan detik). Kurva ini menggambarkan pola kerja rele berdasarkan karakteristik *standard inverse* yang digunakan. Rele akan bekerja lebih cepat jika arus gangguan yang terdeteksi lebih tinggi dibandingkan nilai arus *setting* (*pickup current*).



Gambar 4. 14 Karakteristik waktu kerja OCR GI Kebasen Bay Kopel

Pada Gambar 4.15 ditampilkan kurva karakteristik kerja rele GFR (*Ground Fault Relay*) yang menunjukkan hubungan antara arus gangguan tanah (I/A) dengan waktu kerja rele (dalam satuan detik). Kurva ini memiliki karakteristik *standard inverse*, di mana waktu kerja rele akan semakin cepat jika arus gangguan yang terdeteksi meningkat.



Gambar 4. 15 Karakteristik waktu kerja GFR GI Kebasen Bay Kopel

Karakteristik ini dirancang untuk mendeteksi gangguan hubungan singkat ke tanah dengan sensitivitas tinggi. Nilai arus yang lebih kecil dibandingkan dengan rele OCR mencerminkan fungsi GFR untuk merespons gangguan tanah secara spesifik. Kurva ini juga menunjukkan area toleransi waktu kerja rele dalam merespons arus gangguan pada berbagai level.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan terhadap analisis dan evaluasi *setting Overcurrent Relay (OCR)* dan *Ground Fault Relay (GFR)* pada Bay Kopel di Gardu Induk 150 kV Kebasen.

1. *Setting* yang diterapkan pada rele OCR dan GFR bay Kopel GI 150KV Kebasen, sudah memenuhi standar SPLN T5.011:2024 dan IEC 60255 *Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection*, hal.30.
2. *Setting* optimal pada rele OCR dan GFR bay Kopel GI 150KV Kebasen berdasarkan standar SPLN T5.011:2024 dan IEC 60255 *Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection*, nilai *setting* arus diatur sebesar 110–120% dari arus nominal, sementara untuk GFR, nilai *setting* arus diatur sebesar 20–40% dari arus nominal peralatan terkecil. *Setting* waktu kerja rele OCR mengikuti *standard inverse (SI)* dengan waktu kerja sebesar 1,5 detik, yang ditentukan berdasarkan nilai *breaking capacity* pemutus tenaga (PMT) pada Bay Kopel
3. *Setting* yang diterapkan pada rele OCR dan GFR bay Kopel GI 150KV Kebasen, sudah sesuai dengan perhitungan yang berdasarkan standar SPLN T5.011:2024 dan IEC 60255 *Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection*, hal.30.
4. Simulasi menggunakan DigSILENT PowerFactory menunjukkan bahwa sistem proteksi bekerja dengan benar. Hasil simulasi berbagai skenario gangguan, baik gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, tiga fasa, maupun gangguan eksternal pada SUTT, menunjukkan bahwa proteksi bekerja sesuai dengan koordinasi yang telah ditentukan.

5.2 Saran

1. Peningkatan evaluasi dan pengujian.
2. Implementasi teknologi proteksi digital.
3. Pemanfaatan data historis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] RAIHAN FAHREZI and IRWANTO IRWANTO, “ANALISIS OVER CURRENT RELAY SEBAGAI PROTEKSI ARUS LEBIH DI GARDU INDUK RANGKAS KOTA 70 KV BAY KOPEL,” 2023.
- [2] Fauzia Haz and Ichsan Aditya M N, “Analisis Setting Proteksi Relai Arus Lebih dan Relai Gangguan Tanah Pada Trafo Daya 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Cibatu,” 2020.
- [3] Mustari Rauf, “Evaluasi Kinerja Setting Proteksi Over Current Relay dan Ground Fault Relay Jaringan Distrbusi 20 kV Pada Gardu Induk Pankkukang,” 2021.
- [4] KEMENDIKBUD Republik Indonesia 2013, “GARDU INDUK XI 3,” 2013, Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositori.kemdikbud.go.id/10213/1/GARDU%20INDUK%20XI%203.pdf>
- [5] JZP(JIEZOUPOWER), “Apa itu gardu induk?” Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.jiezoupower.com/id/news/what-is-a-substation/>
- [6] Christina Pasaribu, “Gardu Induk: Peran Penting dalam Distribusi Listrik,” <https://indosbu.com/>. Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://indosbu.com/blog/gardu-induk-peran-penting-dalam-distribusi-listrik>
- [7] S. Hartanto, R. Pahlavi, and T. Priyono, “PENGUJIAN KINERJA PMT 20 kV PADA KUBIKEL NETTO GARDU INDUK PLTMG SENAYAN,” *TEKNOKRIS*, vol. 26, pp. 45–53, Feb. 2023, doi: 10.61488/teknokris.v26i1.259.
- [8] Gilang Ramadhan, Yuslan Basir, and Dyah Utari Y.W, “PENERAPAN OVER CURRENT RELAY (OCR) KOPEL 20 KV DI GARDU INDUK BOOMBARU,” 2020.

- [9] M. Reza Adzani, “ANALISIS EVALUASI SETTING RELAY DOCR (DIRECTIONAL OVERCURRENT RELAYS) SEBAGAI PROTEKSI PADA PT. LINDE INDONESIA SITUS GRESIK JAWA TIMUR.”
- [10] Z. Muslimin and A. Nurjihan, “Studi Setting Relai Arus Lebih Sistem Proteksi Generator dan Transformator PLTA Bakaru Sebelum dan Setelah Masuknya PLTA Malea,” *Jurnal EKSITASI*, vol. 2, no. 2, p. 2023.
- [11] E. Dermawan and D. Nugroho, “Analisa Koordinasi Over Current Relay Dan Ground Fault Relay Di Sistem Proteksi Feeder Gardu Induk 20 kV Jababeka,” *Jurnal Elektum*, vol. 14, no. 2, doi: 10.24853/elektum.14.2.43-48.
- [12] Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, “DIKLAT PROTEKSI SISTEM TENAGA LISTRIK,” 2022.
- [13] “INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Measuring relays and protection equipment-Part 151: Functional requirements for over/under current protection Relais de mesure et dispositifs de protection-Partie 151: Exigences fonctionnelles pour les protections à minimum et maximum de courant,” 2009. [Online]. Available: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm
- [14] PT PLN (Persero) Jl. Trunojoyo Blok M-1/135 Kebayoran Baru Jakarta Selatan 12160, “SPLN T5.011: 2024 POLA PROTEKSI BUSBAR DAN DIAMETER GARDU INDUK,” 2024.