

**ANALISA DAN OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY*
(OCR) DAN *GROUND FAULT RELAY* (GFR) PADA TRAFO 4 DI GARDU
INDUK TEGINENENG DENGAN MENGGUNAKAN METODE
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)**

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD RIEHAN ARRAIEF

2115031099



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

ANALISA DAN OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY* (OCR) DAN *GROUND FAULT RELAY* (GFR) PADA TRAFO 4 DI GARDU INDUK TEGINENENG DENGAN MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Oleh

MUHAMMAD RIEHAN ARRAIEF

Sistem proteksi pada jaringan tenaga listrik dituntut untuk bekerja cepat, tepat, dan selektif demi menjaga keandalan serta keamanan operasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan koordinasi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) pada Trafo 4 di Gardu Induk Tegineneng menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Parameter yang dioptimalkan meliputi *Time Dial Setting* (TDS), arus *pick-up* (I_p), dan waktu operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PSO menghasilkan *setting* baru yang lebih selektif dibanding kondisi eksisting. *Setting* akhir yang diperoleh adalah sebagai berikut: OCR penyulang dengan $I_p = 360$ A, TDS = 0.15 s; OCR 20 kV dengan $I_p = 2000$ A, TDS = 0.27 s; OCR 150 kV dengan $I_p = 270$ A, TDS = 0.38 s. Sementara itu, GFR penyulang memiliki $I_p = 30$ A dengan waktu operasi 0.125 s, GFR 20 kV dengan $I_p = 100$ A dan waktu operasi 0.23 s, serta GFR 150 kV dengan $I_p = 90$ A dan waktu operasi 0.62 s. Urutan kerja proteksi menjadi lebih optimal, yaitu *relay* penyulang bekerja paling cepat, diikuti *relay* 20 kV, dan terakhir *relay* 150 kV, sesuai standar IEC 60255. Dengan demikian, penerapan metode PSO mampu mengoptimasi koordinasi sistem proteksi serta meminimalisir pemutusan area gangguan yang lebih luas.

Kata kunci: Sistem Proteksi, *Over Current Relay*, *Ground Fault Relay*, *Time Dial Setting*, *Pick-up Current*, Waktu Operasi, *Particle Swarm Optimization*.

ABSTRACT

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF OVER CURRENT RELAY (OCR) AND GROUND FAULT RELAY (GFR) COORDINATION ON TRANSFORMER 4 AT TEGINENENG SUBSTATION USING THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) METHOD

By

MUHAMMAD RIEHAN ARRAIEF

The protection system in electrical power networks must operate quickly, accurately, and selectively to ensure reliability and safety. This research aims to analyze and optimize the coordination of Over Current Relay (OCR) and Ground Fault Relay (GFR) on Transformer 4 at the Tegineneng Substation using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The optimized parameters include Time Dial Setting (TDS), pickup current (I_p), and operating time. The results show that PSO produces new relay settings that are more selective compared to the existing configuration. The final settings obtained are as follows: feeder OCR with $I_p = 360\text{ A}$ and $TDS = 0.15\text{ s}$; 20 kV OCR with $I_p = 2000\text{ A}$ and $TDS = 0.27\text{ s}$; and 150 kV OCR with $I_p = 270\text{ A}$ and $TDS = 0.38\text{ s}$. For GFR, the feeder relay operates with $I_p = 30\text{ A}$ and 0.125 s , the 20 kV relay with $I_p = 100\text{ A}$ and 0.23 s , and the 150 kV relay with $I_p = 90\text{ A}$ and 0.62 s . The protection sequence becomes more optimal, with feeder relays operating first, followed by 20 kV relays, and finally 150 kV relays, in accordance with IEC 60255 standards. According to the IEC 60255 standard. Thus, the application of the PSO method is able to optimize the coordination of the protection system and minimize the disconnection of a wider fault area.

Keywords: Power System Protection, Over Current Relay, Ground Fault Relay, Time Dial Setting, Pick-up Current, Time Operation, Particle Swarm Optimization.

**ANALISA DAN OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY*
(OCR) DAN *GROUND FAULT RELAY* (GFR) PADA TRAFO 4 DI GARDU
INDUK TEGINENENG DENGAN MENGGUNAKAN METODE
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)**

Oleh

MUHAMMAD RIEHAN ARRAIEF

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

Judul Skripsi

: ANALISA DAN OPTIMASI KOORDINASI
OVER CURRENT RELAY (OCR) DAN GROUND
FAULT RELAY (GFR) PADA TRAFO 4 DI GARDU
INDUK TEGINENENG DENGAN
MENGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM*
OPTIMIZATION (PSO)

Nama Mahasiswa

: Muhammad Riehan Arraief

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115031099

Program Studi

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua program Studi Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 197103141999032001

Sumadi, S.T., M.T.
NIP 197311042000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



Sekretaris

: Zulmiftahul Huda, S.T., M.Eng.



Penguji,

Bukan Pembimbing : Osea Zebua, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP-197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 02 September 2025

SURAT PENYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 02 September 2025



Muhammad Riehan Arraief
NPM. 2115031099

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 25 Desember 2002. Sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Saroji dan Ibu Suminar Sari Handayani.

Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar (SD) Abadi Perkasa, pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Abadi Perkasa pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Sugar Group pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, Pada tahun 2021 masuk melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis tergabung kedalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) pada tahun 2022. Penulis melaksanakan magang MSIB pada tahun 2023 di PT. Prima Layanan Nasional Enjiniring (PLN-E), Jakarta Pusat, Jakarta. Kemudian penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PLN Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Tarahan, lebih tepatnya di Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk Tegineneng, Pesawaran, Lampung. Dalam satuan kerja perawatan listrik dan membuat laporan kerja praktik yang berjudul “Analisa dan Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) Pada Trafo 4 Di Gardu Induk Tegineneng.”

MOTTO

كُلُّ لَحْظَةٍ فِي الْحَيَاةِ كَنْزٌ لَا يَتَكَرَّرُ

Setiap kesempatan dalam kehidupan adalah harta berharga yang tidak akan terulang kembali.

“Agar kamu tidak bersedih hati terhadap apa yang luput dari kamu dan tidak pula terlalu gembira terhadap apa yang diberikan-Nya kepadamu. Dan Allah tidak menyukai terhadap orang yang sombong dan membanggakan diri.”

(Q.S Al-Hadid: 23)

“Tidak ada masalah yang membebani seseorang, kecuali sesuai dengan kesanggupan dirinya”

SANWACANA

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

Tugas Akhir ini dengan judul “Analisa dan Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) Pada Trafo 4 Di Gardu Induk Tegingeneng Dengan menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlianawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan sangat tulus dan penuh kesabaran sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Zulmiftahul Huda, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan sangat baik dan ramah.

7. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, kritik dan arahan yang baik.
8. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan bimbingan, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan berlangsung.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengajaran, pengetahuan, dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Orang tua tersayang, Bapak Saroji dan Ibu Suminar Sari. Terimakasih atas segala pengorbanan dan tulus kasih sayang yang diberikan. Beliau memang tidak sempat merasakan Pendidikan di bangku perkuliahan, namun mereka mampu senantiasa memberikan yang terbaik untuk penulis, tidak kenal lelah dalam mendoakan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana. Semoga bapak dan ibu sehat, Panjang umur, dan kelak dapat melihat anak-anaknya meraih kesuksesan.
12. Teruntuk Dia, Puji Lestari manusia yang baik hati dan lemah lembut. Terimakasih atas semua bantuan dan support yang baik kepada penulis sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan skripsi ini. Semoga apa yang telah diberikan mendapatkan balasan baik yang lebih serta diberi kelancaran untuk segala urusannya,
13. Keluarga PENGHUNI KONTRAKAN KALIURANG; Justin, Ferdian, Aldo, Novaldy, Joe, Ivan, dan Akbar. Serta Keluarga SHOES CLEAN; Ferdian, Arrley, dan Rama semoga kalian semua diberi kelancaran.
14. Keluarga besar Angkatan 2021 (Excalto), yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai social, dan bantuan dalam berbagai hal.
15. Teman-teman WONG KITO (sumsel); Syabi, Rasyid, Imam, Raselindo, dan Rizky. Yang telah banyak memberikan masukan dan motivasi kepada penulis semoga kalian selalu diberikan kemudahan dan kelancaran.

16. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis mengucapkan terimakasih atas bantuan dan kerjasamanya.
17. Kepada penulis sendiri, Muhammad Riehan Arraief. Terimakasih sudah mampu bertahan sejauh ini. Terimakasih tetap memilih berusaha dan merayakan dirimu sendiri sampai di titik ini, walau sering kali merasa atas apa yang dirasakan dan diusahakan belum cukup berhasil, namun terimakasih tetap menjadi manusia yang selalu mau berusaha dan tidak lelah untuk mencoba.

Penulis Menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembacanya.

Bandar Lampung, 02 September 2025



Muhammad Riehan Arraief

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL.....	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
1.6. Hipotesis	5
1.7. Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sistem Proteksi	7
2.2. Fungsi Sistem Proteksi	10
2.3. Syarat pada Sistem Proteksi	10
2.4. Prinsip dan Karakteristik Operasi <i>Relay</i>	11
2.5. Jenis-Jenis <i>Relay</i>	12
2.6. <i>Relay</i> Proteksi.....	16
2.7. <i>Relay</i> Arus Lebih (<i>Over Current Relay</i>)	18
2.8. <i>Ground Fault Relay</i> (GFR).....	22
2.9. Jenis Gangguan.....	24
2.10. Gangguan Hubung Singkat	25
2.11. <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	28
III. METODELOGI PENELITIAN	30
3.1. Waktu dan Tempat	30
3.2. Alat dan Bahan	30
3.3. Metodologi Penelitian.....	31
3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian	32
3.5. Pemodelan Analisa Penelitian	33
3.6. Matriks.....	36

3.7. Perhitungan <i>Time Dial Setting</i> (TDS)	39
3.8. Perhitungan <i>Setting Arus Pickup</i>	40
3.9. Perhitungan Optimasi <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	40
IV. HASIL DAN ANALISA PEMBAHASAN	45
4.1. Data Gardu Induk Tegineneng	45
4.2. Hasil optimasi <i>over current relay</i> (OCR)	54
4.3. Hasil optimasi <i>ground fault relay</i> (GFR)	57
4.4. Perbandingan hasil optimasi dengan kondisi <i>existing</i> pada <i>over current relay</i> (OCR)	60
4.5. Perbandingan hasil optimasi dengan kondisi <i>existing</i> pada <i>ground fault relay</i> (GFR)	61
4.6. Analisa perbandingan hasil optimasi PSO dengan Kondisi <i>existing</i>	63
4.7. Simulasi <i>single line diagram</i> (SLD) pada kondisi <i>existing</i>	67
4.8. Simulasi <i>single line diagram</i> (SLD) pada hasil optimasi PSO	69
4.9. Nilai <i>konvergensi</i> optimasi <i>particle swarm optimization</i> (PSO)	70
V. SIMPULAN DAN SARAN	71
5.1. Kesimpulan	71
5.2. Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Sistem Proteksi	7
Gambar 2. Rangkaian Pengawat OCR	18
Gambar 3. Karakteristik <i>Over Current Relay Inverse Time</i>	19
Gambar 4. Karakteristik <i>Over Current Relay Definite Time</i>	21
Gambar 5. Karakteristik <i>Over Current Relay Instantaneous</i>	21
Gambar 6. Rangkaian Pengawat GFR	22
Gambar 7. Kurva Karakteristik GFR	23
Gambar 8. Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa	26
Gambar 9. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa	27
Gambar 10. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	28
Gambar 11. Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 12. Diagram Alir PSO	41
Gambar 13. Diagram Alir Program PSO	44
Gambar 14. Gambar SLD GI Tegineneng	45
Gambar 15. Gambar Hasil Optimasi Kurva TCC <i>over current relay</i> (OCR)	56
Gambar 16. Gambar Hasil Optimasi Kurva TCC <i>Ground Fault Relay</i> (GFR)....	58
Gambar 17. Perbandingan Kurva Karakteristik TCC Hasil Optimasi PSO Dengan Kondisi <i>Existing</i> Pada OCR	63
Gambar 18. Perbandingan Kurva Karakteristik TCC Hasil Optimasi PSO Dengan Kondisi <i>Existing</i> Pada GFR	65
Gambar 19. Gambar Simulasi <i>Single Line Diagram</i> (SLD) Pada Kondisi <i>Existing</i>	67
Gambar 20. Gambar Simulasi <i>Single Line Diagram</i> (SLD) Pada Hasil Optimasi PSO	69
Gambar 21. Grafik <i>Konvergensi</i> Optimasi <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Konstanta karakteristik waktu arus lebih	20
Tabel 2. Jadwal Penelitian Tugas Akhir	30
Tabel 3. Data Matriks Pemetaan	37
Tabel 4. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) 150 KV	46
Tabel 5. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) 150 KV	46
Tabel 6. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) 20 KV	47
Tabel 7. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) 20 KV	47
Tabel 8. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang a	48
Tabel 9. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang a	48
Tabel 10. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang b	49
Tabel 11. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang b	49
Tabel 12. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang c	50
Tabel 13. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang c	50
Tabel 14. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang d	51
Tabel 15. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang d	51
Tabel 16. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang e	52
Tabel 17. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang e	52
Tabel 18. Data <i>Over Current Relay</i> (OCR) Penyulang f	53
Tabel 19. Data <i>Ground Fault Relay</i> (GFR) Penyulang f	53
Tabel 20. Hasil Optimasi <i>Over Current Relay</i> (OCR)	54
Tabel 21. Hasil Optimasi <i>Ground Fault Relay</i> (GFR)	57
Tabel 22. Perbandingan Hasil Optimasi Dengan <i>Existing</i> pada OCR	60
Tabel 23. Perbandingan Hasil Optimasi Dengan <i>Existing</i> pada GFR	61

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem proteksi dalam jaringan tenaga listrik memegang peranan penting dalam menjaga keandalan, kontinuitas, dan keselamatan operasi sistem. Salah satu komponen utama dalam sistem proteksi adalah rele arus lebih (*Over Current Relay/OCR*) dan rele gangguan tanah (*Ground Fault Relay/GFR*), yang berfungsi untuk mendeteksi arus gangguan dan memutuskan bagian sistem yang mengalami gangguan secara selektif dan cepat. Di Gardu Induk Tegineneng, yang merupakan bagian penting dari sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, keberadaan OCR dan GFR pada sisi penyulang, sisi 20 kV, dan sisi 150 kV menjadi sangat krusial untuk menjamin proteksi berlapis dan terkoordinasi. Salah satu parameter utama dalam pengaturan rele ini adalah *time dial setting* (TDS), yaitu pengatur waktu kerja rele berdasarkan besarnya arus gangguan yang terdeteksi. Pengaturan TDS yang tidak tepat dapat menyebabkan rele bekerja terlalu lambat atau bahkan saling tumpang tindih (*overlap*), sehingga berdampak pada hilangnya selektivitas dan berpotensi menyebabkan pemadaman listrik yang lebih luas dari area gangguan seharusnya [1].

Masalah koordinasi proteksi sering kali ditemukan di lapangan, terutama dalam sistem tenaga yang kompleks dan terus berkembang. Setting TDS yang tidak sesuai dapat disebabkan oleh perubahan beban, perluasan jaringan, atau bahkan kesalahan dalam desain awal proteksi. Seiring dengan meningkatnya penetrasi energi terbarukan, perubahan karakteristik jaringan menjadi tantangan baru bagi pengaturan rele. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kondisi eksisting menjadi penting untuk mengetahui apakah setting yang ada masih *valid* atau perlu dilakukan penyesuaian. Dalam hal ini, penelitian diarahkan untuk menganalisis performa TDS OCR dan GFR berdasarkan data aktual serta mengevaluasi apakah terdapat ruang untuk optimasi agar sistem proteksi bekerja secara lebih efisien. Optimasi ini bertujuan tidak hanya untuk mempercepat respon rele terhadap gangguan, tetapi juga menjamin bahwa setiap level proteksi bekerja

secara berurutan dari sisi penyulang, ke 20 kV, dan hingga 150 kV. Prinsip selektivitas tersebut sangat penting dalam mencegah pemutusan gangguan secara berlebihan [2].

Standar internasional seperti IEC 60255-121 dan IEEE Std C37.112-2018 menekankan pentingnya koordinasi antar proteksi agar sistem tetap stabil dalam kondisi *abnormal*. Namun, untuk mencapai koordinasi yang optimal, dibutuhkan teknik evaluasi dan penyetelan yang modern. Dalam satu dekade terakhir, banyak pendekatan berbasis optimasi yang digunakan dalam menyelesaikan masalah koordinasi rele. Salah satunya adalah penggunaan algoritma optimasi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Genetic Algorithm* (GA), dan algoritma *evolusioner* lainnya. Penelitian oleh Rahman [3] menunjukkan bahwa metode PSO memberikan hasil setting TDS yang lebih optimal dan selektif dibanding metode konvensional berbasis perhitungan manual. Begitu pula studi oleh Al-Fatlawi & Hasan [4] membuktikan bahwa optimasi koordinasi OCR menggunakan pendekatan *metaheuristik* mampu menurunkan total waktu operasi rele serta meminimalisir konflik antar rele.

Metode optimasi modern juga memungkinkan integrasi data aktual dari sistem proteksi, sehingga hasil simulasi dan perhitungan TDS lebih akurat dan dapat disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan. Bahkan, beberapa penelitian terbaru menggabungkan teknik optimasi dengan *fuzzy logic* atau machine learning untuk menangani ketidakpastian dalam data proteksi [5]. Hal ini semakin memperkuat pentingnya penggunaan pendekatan komputasional dalam sistem proteksi modern, terutama untuk sistem tenaga skala menengah hingga besar seperti di Gardu Induk Tegineneng.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menjadi sangat penting dilakukan di Gardu Induk Tegineneng, mengingat fungsinya yang strategis dalam mendistribusikan energi pada berbagai level tegangan. Dengan menganalisis dan mengevaluasi setting TDS pada OCR dan GFR secara menyeluruh di ketiga sisi utama penyulang, 20 kV, dan 150 kV serta

mengusulkan perbaikan melalui simulasi optimasi, diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar teknis yang kuat dalam mendukung pengambilan keputusan terkait pengelolaan proteksi sistem tenaga listrik yang lebih andal, efisien, dan sesuai dengan perkembangan teknologi saat ini.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan mengevaluasi *setting time dial* (TDS), *pick up current* dan waktu operasi pada rele *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) yang terpasang di Gardu Induk Tegineneng, khususnya pada sisi penyulang, sisi 20 kV, dan sisi 150 kV. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi peluang optimasi nilai TDS dengan menggunakan pendekatan analitis dan simulatif, sehingga dapat diperoleh *setting* yang tetap andal. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam meningkatkan keandalan sistem proteksi dan mendukung pengambilan keputusan dalam penetapan setting rele yang lebih optimal.

1.3. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana kondisi eksisting *time dial setting* (TDS), *pick up current* dan waktu operasi pada rele *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) di sisi penyulang, sisi 20 kV, dan sisi 150 kV. Selain itu, penelitian ini ingin mengetahui apakah terdapat peluang untuk mendapatkan nilai TDS, *pick up current* dan waktu operasi yang lebih optimal dibandingkan kondisi *existing*, sehingga sistem proteksi dapat bekerja secara lebih baik tanpa mengorbankan keandalan dan kecepatan dalam mendeteksi serta memutus gangguan. Apakah metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang digunakan dalam penelitian ini mampu memberikan hasil optimasi *setting* koordinasi *relay* OCR dan GFR yang terbaik, sehingga memenuhi urutan waktu kerja proteksi sesuai standar serta meningkatkan selektivitas, keandalan, dan kecepatan operasi sistem proteksi.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada analisis dan evaluasi nilai *time dial setting* (TDS), *pick up current* dan waktu operasi dari *relay Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) yang terpasang di Gardu Induk Tegineneng, khususnya pada sisi penyulang, sisi 20 kV, dan sisi 150 kV. Fokus penelitian hanya mencakup optimasi nilai TDS, *pick up current* dan waktu operasi tanpa mengubah jenis karakteristik kurva *relay* yang digunakan, seperti *standard inverse* atau *very inverse*, yang diasumsikan telah ditentukan sebelumnya. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi arus gangguan, arus beban, dan *setting existing*, yang diasumsikan *valid* dan tetap selama proses analisis dan optimasi. Metode optimasi yang digunakan terbatas pada *Particle Swarm Optimization* (PSO), yang diharapkan mampu mencari kombinasi nilai TDS, *pick up current*, dan waktu operasi terbaik dengan meminimalkan selisih antara hasil perhitungan dan target waktu operasi, serta tetap memenuhi urutan kerja koordinasi proteksi sesuai standar. Penelitian ini tidak mencakup aspek teknis instalasi di lapangan, pengaruh *transien* sistem, atau proteksi *diferensial*, dan juga tidak membahas koordinasi proteksi dengan gardu atau sistem eksternal di luar Gardu Induk Tegineneng.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teknis maupun praktis dalam pengelolaan sistem proteksi di Gardu Induk Tegineneng. Secara teknis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi dan memperbaiki *time dial setting* (TDS), *pick up current* dan waktu operasi pada *relay* OCR dan GFR, sehingga dapat meningkatkan kinerja sistem proteksi. Penelitian ini juga memberikan gambaran mengenai efektivitas *setting existing* dan membuka peluang untuk memperoleh nilai TDS, *pick up current* dan waktu operasi yang lebih optimal melalui pendekatan analitis dan simulatif. Secara praktis, hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi bagi *engineer* atau pihak pengelola sistem tenaga dalam menetapkan *setting* proteksi yang

lebih baik dan terkoordinasi, terutama pada sisi penyulang, 20 kV, dan 150 kV, tanpa perlu melakukan perubahan besar pada sistem yang sudah ada. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada peningkatan keandalan operasi sistem tenaga listrik secara menyeluruh.

1.6. Hipotesis

Berdasarkan tujuan dan ruang lingkup penelitian, hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa nilai *time dial setting* (TDS), *pick up current* dan waktu operasi pada *relay Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) di Gardu Induk Tegineneng, khususnya pada sisi penyulang, 20 kV, dan 150 kV, masih dapat dioptimalkan untuk mencapai kinerja proteksi yang lebih baik. Dengan melakukan analisa terhadap kondisi eksisting serta penerapan metode optimasi yang sesuai, diasumsikan bahwa nilai TDS, *pick up current* dan waktu operasi yang lebih optimal dapat ditemukan. Hipotesis ini didasari oleh asumsi bahwa adanya perbedaan koordinasi waktu antar rele yang belum *ideal* dapat diperbaiki melalui evaluasi berbasis data sistem aktual dan simulasi teknik optimasi, sehingga pengoperasian sistem proteksi menjadi lebih baik tanpa mengorbankan keamanan sistem.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan akhir bertujuan guna memberikan suatu gambaran secara sederhana terkait dengan pembahasan yang ada di dalam tugas akhir skripsi ini serta juga untuk memudahkan dalam memahami isi yang disajikan dalam skripsi ini. Adapun sistematika yang digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini berisi latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini berisikan tentang teori pendukung materi tugas akhir yang merupakan pengantar dalam pemahaman terkait materi tugas akhir yang dikutip dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, proseding, dan buku yang digunakan sebagai panduan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

Dalam bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, pelaksanaan serta pengamatan analisis dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menjelaskan hasil data hasil yang di dapatkan dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

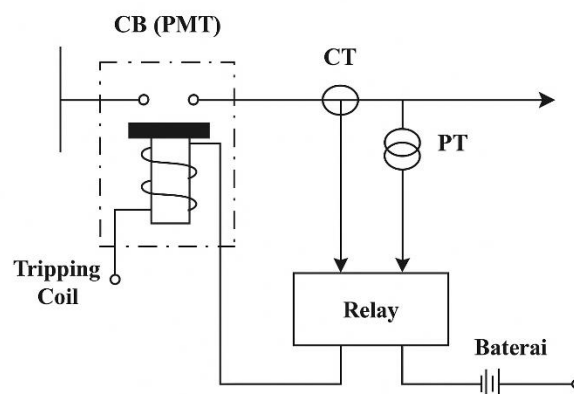
Dalam bab ini memuat kesimpulan berdasarkan hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Proteksi

Salah satu peran penting dalam menjaga keandalan distribusi tenaga listrik adalah sistem proteksi, yang melindungi komponen listrik seperti generator, transformator, jaringan transmisi, dan jaringan distribusi. Fungsi sistem proteksi adalah untuk mencegah dan membatasi kerusakan yang disebabkan oleh gangguan pada peralatan listrik yang terkena dampak, memastikan bahwa gangguan tidak mempengaruhi bagian lain sistem yang tidak terkena gangguan, dan mencegah gangguan menyebar ke bagian lain sistem.

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan bagian integral dari sistem tenaga yang berfungsi untuk mendeteksi gangguan dan mengambil tindakan korektif secara otomatis guna menjaga keamanan, keandalan, dan stabilitas sistem. Dalam jaringan tenaga listrik modern, sistem proteksi harus mampu bekerja dengan cepat, tepat, dan selektif untuk mencegah kerusakan peralatan dan pemadaman sistem yang meluas. Menurut Prakash dan Kumar [6], sistem proteksi terdiri dari beberapa komponen utama seperti rele proteksi, pemutus sirkuit (*circuit breaker*), CT (*current transformer*), dan VT (*voltage transformer*), yang bekerja secara terkoordinasi untuk mendeteksi serta mengisolasi bagian sistem yang terganggu



Gambar 1. Komponen Sistem Proteksi

Sumber: <https://www.carailmu.com/2021/06/komponen-sistem-proteksi.html>

Waktu pemutusan gangguan merupakan waktu total yang dibutuhkan peralatan proteksi sampai terbukanya pemutus tenaga atau disebut juga *fault clearing time*

$$T_C = T_p + T_d + T_a \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

T_C = *Clearing Time*

T_p = *Comparison Time*

T_d = *Decision Time*

T_a = *Action Time, including circuit breaker operating time*

Karena peralatan perlindungan harus *sinkron* dengan peralatan perlindungan lainnya secara bersamaan, sehingga hanya peralatan perlindungan yang berada paling dekat dengan gangguan yang bekerja sesuai dengan prinsip *selektivitas*, waktu pemutusan gangguan sangat penting untuk skema perlindungan yang efektif.

Adapun komponen-komponen sistem proteksi terdiri dari:

a) *Circuit Breaker* (PMT)

Pemutus tenaga (PMT) atau *circuit breaker* (CB) merupakan peralatan yang memiliki kapasitas rating untuk menghubungkan atau memutuskan aliran arus listrik. PMT dapat memutuskan arus beban dan mengatasi arus gangguan hubung singkat pada tegangan tinggi dengan sangat cepat. Ketika PMT berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan arus listrik, terjadi pembentukan busur api; untuk memadamkannya, CB menggunakan udara, minyak, dan gas. Energi mekanik yang diperlukan untuk membuka kontak utama biasanya diperoleh dari gaya pegas, tekanan hidrolik, tekanan pneumatik, atau kombinasi dari metode ini.

b) Rele

Rele adalah alat yang dapat menunjukkan kondisi abnormal ketika diberi energi oleh besaran sistem yang sesuai. Ketika kontak-kontak relae tertutup, rangkaian-rangkaian *trip* pemutus tenaga yang terhubung menerima energi, yang menyebabkan kontak-kontak breaker terbuka, yang menghilangkan bagian yang mengalami gangguan dari sistem.

c) Trafo Arus (CT)

Trafo arus, juga dikenal sebagai *current transformer*, biasanya digunakan untuk menghasilkan nilai arus yang sebanding dengan arus yang ada dalam sistem, yang kemudian dapat digunakan dalam peralatan kontrol, rele proteksi, dan peralatan instrumen lainnya. Mereka mengambil input arus dari sistem dan mengubahnya menjadi tingkat yang lebih rendah yang dapat digunakan untuk peralatan proteksi, pengukuran, dan kontrol. Fungsi trafo arus meliputi:

1. Mengurangi jumlah arus listrik (*ampere*) pada sistem listrik menjadi jumlah arus untuk sistem pengukuran dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian *sekunder* dari rangkaian *primer*, yang berarti bahwa *instalasi* pengukuran dan proteksi terpisah dari sistem tegangan tinggi. Beberapa rele proteksi menggunakan arus *sekunder* CT sebagai input. Rele jarak, arus lebih, dan rele *differensial* adalah beberapa contoh rele yang menggunakan arus *sekunder* CT sebagai input.

d) Trafo Tegangan (PT)

Aplikasi trafo dalam sistem tenaga listrik menentukan jenis dan konstruksinya. Untuk aplikasi peralatan proteksi sistem tenaga listrik, khususnya rele, trafo berfungsi untuk mengukur besarnya kuantitas tegangan dan kemudian mentransformasikannya ke level yang lebih rendah. Rele terdiri dari trafo tegangan (*voltage* atau *potential transformer*) dan trafo arus (*current transformer*).

Ada dua jenis perlindungan berdasarkan besaran ukur, yaitu:

- a) Proteksi *Primer* merupakan sistem proteksi yang secara langsung menangani besaran ukuran atau skala yang sesuai.
- b) Proteksi *Sekunder* yang tidak langsung mengolah besar ukurnya disebut proteksi *sekunder*.

Adapun klasifikasi skema proteksi ialah:

- a) Proteksi arus lebih (*Over Current Protection*)
- b) Proteksi jarak (*Distance Protection*)
- c) Proteksi arus pembawa (*Carrier Current Protection*)
- d) Proteksi *diferensial* (*Differential Protection*)

2.2. Fungsi Sistem Proteksi

Fungsi utama dari sistem proteksi adalah memberikan perlindungan terhadap peralatan dan menjaga kontinuitas pasokan listrik. Sistem ini juga melindungi keselamatan manusia dan lingkungan dari bahaya listrik. Menurut Gupta dan Singh [7], fungsi sistem proteksi meliputi:

1. Mendeteksi gangguan secepat mungkin,
2. Mengisolasi bagian sistem yang terganggu,
3. Menjaga stabilitas sistem, dan
4. Meminimalkan kerugian operasional.

Dalam sistem distribusi dan transmisi yang kompleks, sistem proteksi berperan sebagai lapisan pertahanan utama untuk menghindari gangguan merambat ke seluruh jaringan. Untuk menghasilkan sistem proteksi yang efektif, pengoprasian sistem harus mempertimbangkan akibat yang ditimbulkan oleh berbagai jenis gangguan pada suatu lokasi. Jika terjadi gangguan pada pengoprasian sistem, para operator diharapkan dapat mengoperasikan bagian yang tepat segera untuk mengeluarkan sistem dari jaringan yang mengalami gangguan. Untuk mencapai tujuan ini, diperlukan alat yang dapat mendeteksi keadaan yang tidak normal dan kemudian memberi tahu komponen mana yang harus bekerja untuk menghentikan rele, sebuah rangkaian sistem yang terganggu. Proteksi harus memiliki kemampuan untuk menghentikan arus gangguan sebelum arus tersebut naik ke tingkat yang berbahaya. Selain itu, proteksi harus memiliki kemampuan untuk menghentikan gangguan tanpa merusak peralatan yang dilindunginya sendiri.

2.3. Syarat pada Sistem Proteksi

Sistem proteksi yang efektif harus memenuhi beberapa syarat utama. Menurut Alam [8], syarat-syarat tersebut meliputi:

1. selektivitas, yaitu kemampuan sistem proteksi untuk hanya memutus bagian yang terganggu.

2. kecepatan, yaitu waktu respons yang cepat dalam mendeteksi dan menangani gangguan.
3. keandalan, yaitu jaminan bahwa sistem proteksi akan bekerja saat dibutuhkan.
4. sensitivitas, yaitu kemampuan sistem mendeteksi gangguan bahkan dengan besaran arus yang relatif kecil.

Kinerja proteksi sangat bergantung pada akurasi pengaturan parameter dan koordinasi antar perangkat proteksi. Fungsi sistem proteksi adalah untuk mencegah dan membatasi kerusakan yang disebabkan oleh gangguan pada peralatan listrik yang terkena dampak, memastikan bahwa gangguan tidak mempengaruhi bagian lain sistem yang tidak terkena gangguan, dan mencegah gangguan menyebar ke bagian lain sistem.

2.4. Prinsip dan Karakteristik Operasi *Relay*

Prinsip kerja *relay* proteksi didasarkan pada pengukuran parameter listrik seperti arus, tegangan, atau frekuensi yang kemudian dibandingkan dengan nilai ambang tertentu. Jika nilai parameter melebihi ambang batas, maka *relay* akan mengirim sinyal *trip* ke pemutus sirkuit. Menurut Raza [9], karakteristik waktu operasi *relay* dibedakan menjadi beberapa jenis kurva seperti *inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*. Pemilihan karakteristik ini bergantung pada jenis sistem dan koordinasi proteksi yang diinginkan agar *selektif* dan *efektif*.

Bagaimana suatu peralatan terhubung atau terbuka bekerja tergantung pada mekanisme operasinya. Saat rele berfungsi, *relay* akan terhubung dan terbuka. Sebagian besar rele dilengkapi dengan pegas kendali. Dalam situasi ini, kontak yang bekerja terhubung disebut "*closed*" dan kontak yang bekerja terbuka disebut "*open*". Selain itu, standar istilah lain yang digunakan adalah penggunaan simbol huruf, misalnya "a" untuk kontak yang bekerja terbuka dan "b" untuk kontak yang bekerja terbuka. Pada rele proteksi ada indikator yang menunjukkan kinerja rele untuk *mentripkan* pemutus tenaga. Untuk menghasilkan sistem proteksi yang efektif, pengoprasian sistem harus mempertimbangkan akibat yang ditimbulkan oleh berbagai jenis gangguan pada

suatu lokasi. Setiap kali *relay* menerima sinyal yang melebihi pengaturannya, ia dapat berfungsi. Sinyal yang diterima termasuk arus, tegangan, impedansi, daya, arah daya, pemanasan, pembentukan gas, frekuensi, dan gelombang *eksplosi*. Apabila kontak-kontak rele bergerak membuka dan menutup dari kondisi awalnya, *relay* dikatakan bekerja (operasi). Jika *relay* menerima satu atau lebih sinyal input sehingga mencapai harga *pick-up* tertentu, maka *relay* bekerja dengan menutup kontak-kontaknya. Setelah itu, *relay* akan tertutup sehingga *coil tripping* bekerja untuk memutuskan beban.

Relay proteksi adalah kumpulan peralatan yang dirancang untuk merasakan atau mengukur adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan secara otomatis mengatur dan memberikan informasi untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian sistem yang terganggu dan memberikan isyarat bahwa telah terjadi gangguan. Beberapa *relay* memiliki waktu tunda yang dapat diatur, sementara yang lain disebut sebagai "*relay* seketika (*instantaneous*)" atau "*relay* kecepatan tinggi (*high speed*)."
Relay seketika (*instantaneous*) beroperasi tanpa penundaan yang disengaja selama kurang dari 0,1 detik, biasanya 0,05 detik atau lebih. Dalam *relay* kecepatan tinggi, waktu operasi diukur dalam siklus yang didasarkan pada frekuensi sistem tenaga, seperti "satu siklus", yang setara dengan 1/60 detik dalam sistem frekuensi 60 Hz. Meskipun pada dasarnya hanya digunakan istilah "seketika (*instantaneous*)", istilah "kecepatan tinggi (*high speed*)" digunakan untuk membedakan rele yang lebih cepat dari yang lebih lambat.

2.5. Jenis-Jenis *Relay*

Relay proteksi diklasifikasikan berdasarkan parameter yang dideteksi dan metode kerjanya. Beberapa jenis *relay* yang umum digunakan meliputi: *relay* arus lebih (OCR), *relay* gangguan tanah (GFR), *relay* tegangan lebih atau kurang, *relay* frekuensi, *relay* diferensial, dan *relay* jarak. Menurut Zhang [10], setiap jenis *relay* memiliki peran spesifik yang disesuaikan dengan karakteristik sistem dan jenis gangguan yang mungkin terjadi. Pemilihan dan koordinasi

antar *relay* menjadi faktor penting dalam mendesain sistem proteksi yang handal.

a) *Relay arus lebih (Over Current Relay)*

relay arus lebih atau *relay* arus lebih (OCR) adalah peralatan yang dapat mendeteksi adanya arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat atau *overload*, yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Hampir seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik menggunakan rele arus lebih ini. *Relay* ini dapat digunakan sebagai pengaman utama atau sebagai pengaman cadangan. *Relay* arus lebih akan memberikan sinyal kepada PMT (Pemutus Tenaga) jika terjadi gangguan hubung singkat agar rangkaianannya terbuka sehingga kerusakan pada alat yang mampu disebabkan oleh gangguan dapat dihindari. Keuntungan dari penggunaan *relay* arus lebih adalah mampu mengamankan arus lebih yang diakibatkan oleh hubung singkat atau beban lebih, dapat berfungsi sebagai pengaman utama serta pengaman cadangan dan harganya relatif murah.

b) *Relay tegangan jatuh (Under Voltage Relay)*

Tegangan jatuh, juga dikenal sebagai tegangan jatuh, adalah besarnya penurunan atau kehilangan tegangan pada suatu penghantar dari nilai normalnya. Ini juga disebut sebagai tegangan jatuh, yaitu perbedaan antara tegangan pangkal (sumber) dan tegangan ujung (beban) suatu jaringan listrik. Beberapa faktor memengaruhi tegangan jatuh, yang juga dikenal sebagai tegangan jatuh:

1. Panjang Kabel Penghantar

Semakin panjang kabel penghantar yang digunakan, semakin banyak tegangan jatuh atau kerugian yang terjadi.

2. Besar Arus

Semakin banyak arus listrik yang mengalir melalui penghantar, semakin banyak tegangan jatuh atau kerugian yang terjadi.

3. Tahanan Jenis (*Rho*)

Kerugian tegangan atau tegangan jatuh berkorelasi positif dengan tahanan jenis bahan penghantar yang digunakan. *Impedansi*, yang diwakili dalam satuan *ohm*, merupakan gabungan dari *resistansi* dan *reaktansi*.

4. Luas Penampang Penghantar

Semakin besar luas penampang penghantar yang digunakan, semakin sedikit kerugian tegangan atau tegangan jatuh.

Jatuh tegangan pada saluran bolak-balik tergantung pada impedansi, beban, dan jarak. Jatuh tegangan pada saluran distribusi dihitung sebagai perbedaan antara tegangan pada ujung pengirim dan tegangan pada ujung penerima. Pengaruh tahanan dan *reaktansi* saluran serta perbedaan sudut fasa antara arus dan tegangan menyebabkan jatuh tegangan.

c) *Relay Impedansi (Impedance Relay)*

Apabila *relay* arus lebih tidak memberikan perlindungan yang cukup atau memuaskan, rele impedansi digunakan. Selama arus hubung singkat relatif rendah, *relay* ini tetap berfungsi. Laju operasi tidak tergantung pada arus yang besar. *Relay* impedansi melacak tekanan antara lokasi rele dan gangguan. Jika tekanan jatuh di dalam *setting relay*, *relay* akan berfungsi. Balok keseimbangan adalah struktur dasar *relay* impedansi yang prinsip operasinya mudah dipahami. Balok keseimbangan adalah bagian dari *relay*. Balok keseimbangan memiliki kumparan pada tiap ujungnya yang mengerahkan gaya pada balok di ujungnya. Trafo arus (CT) menghubungkan satu kumparan ke arus, dan trafo *potensial* menghubungkan kumparan lainnya. Kumparan arus berfungsi sebagai kumparan operasi, sedangkan kumparan tegangan berfungsi sebagai kumparan pengendali. Kontak *relay* biasanya tetap terbuka. Tegangan turun dan arus naik selama gangguan. *Torsi* yang terjadi pada kumparan arus lebih besar dari pada yang terjadi pada kumparan tegangan, sehingga *relay* menutup kontakannya.

d) *Relay Frekuensi Jatuh (Under Frequency Relay)*

Ketika terjadi penurunan frekuensi atau nilai frekuensi yang ditetapkan, *relay* frekuensi di bawah (UFR) bekerja. UFR digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk menjaga kestabilan frekuensi dan berfungsi sebagai pelepas beban jika terjadi penurunan frekuensi. Mereka juga sering menyebut *relay* UFR dengan Digunakan untuk mendeteksi perubahan frekuensi yang *signifikan*. Kisaran toleransi untuk frekuensi berkisar antara $\pm 3\%$ dan $\pm 7\%$ dari nilai frekuensi nominal. Penurunan frekuensi dapat disebabkan oleh kerusakan *regulator* frekuensi atau kelebihan permintaan daya aktif jaringan. Pada generator, arus magnetisasi meningkat sebagai akibat dari penurunan frekuensi, yang mengakibatkan peningkatan suhu. Ini akan mengurangi umur *blade rotor* pada turbin uap. Penurunan permintaan daya aktif jaringan atau kerusakan *regulator* frekuensi dapat menyebabkan kenaikan frekuensi. Jika frekuensi naik, nilai arus magnetisasi generator akan turun, yang berarti kurang medan penguat. Setiap fasa yang keluar dari generator memiliki sensor *relay* frekuensi yang dipasang di sana. Untuk mengidentifikasi penurunan frekuensi yang disebabkan oleh beban yang lebih besar pada generator, rele frekuensi dipasang pada pembangkit. *Relay* frekuensi ini biasanya dipasang pada pembangkit dan dikenal sebagai UFR (*under frequency relay*). Jika ada beban yang lebih besar, *relay* ini biasanya bekerja sama dengan *relay under voltage*, dan juga ada OFR (*over frekuensi relay*) untuk mengidentifikasi kecepatan yang berlebihan dari turbin. Selain itu, biasanya dipasang sebagai penyebaran beban (UFR) di *feeder*.

Seperti kebanyakan *relay* proteksi, yang terdiri dari sensor *potensial transformer* (PT), informasi frekuensi sistem diambil dari PT. Kemudian, *relay* membandingkan frekuensi yang diatur dengan frekuensi yang sebenarnya dari PT. Jika frekuensi yang diatur lebih kecil atau sama dengan frekuensi Proteksi Sistem Tenaga: *Relay Frekuensi Rendah (Under Frequency 5 Relay)* diatur dalam waktu yang ditentukan, *circuit breaker* akan diminta untuk mengurangi beban.

e) *Relay Arah (Directional Relay)*

Relay directional biasanya digunakan pada jaringan *loop* atau jaringan paralel untuk melindungi saluran udara dari gangguan antara fasa atau tiga fasa. *Relay* ini hanya beroperasi dalam satu arah karena mereka dapat mengidentifikasi arah arus gangguan dan merupakan varian *relay* arus lebih dengan tambahan elemen arah. *Relay* ini dapat menjadi lebih *selektif* daripada *relay over current*. Ini disebabkan oleh fakta bahwa *magnitude* arus untuk dua sumber dapat sama besar, dan oleh karena itu diperlukan *relay* arah untuk menentukan sumber mana yang akan merespons arus gangguan tersebut. Perlu diingat bahwa *magnitude* arus dapat berubah di berbagai daerah gangguan.

Dua besaran listrik digunakan pada rele arah ini. Yang pertama adalah besaran tegangan, yang berfungsi sebagai patokan untuk sudut fasa yang tetap. Yang kedua adalah besaran arus, yang berfungsi sebagai besaran kerja karena fasa tergantung pada lokasi gangguan.

Relay arah ini terdiri dari dua bagian sebagai berikut.

1. Elemen arah (*directional element*) Arah kerja *relay* ditentukan dengan menggunakan elemen arah.
2. Elemen kerja (*operating element*) Elemen kerja mendeteksi arus gangguan yang besar.

2.6. *Relay* Proteksi

Relay proteksi merupakan komponen utama dalam sistem proteksi yang bertugas mendeteksi kondisi abnormal dan mengaktifkan pemutus sirkuit. *Relay* modern saat ini banyak menggunakan teknologi digital atau numerik yang memungkinkan pengaturan lebih fleksibel dan akurasi lebih tinggi. Menurut Bakar [11], rele numerik juga memungkinkan komunikasi antar panel proteksi serta integrasi dengan sistem SCADA untuk monitoring dan kontrol *real-time*.

Berdasarkan teknologinya, *relay* proteksi dikategorikan menjadi:

a) *Relay Electromagnetic*

Jenis *relay electromagnetic* dapat bekerja dengan bolak-balik atau sumber arus searah sebagai penginduksi kumparan. Ini akan membentuk magnet pada kumparan, yang akan menggerakkan anak kontak untuk memutuskan rangkaian. Selain mengubah tegangan dan arus menjadi gaya magnet dan listrik, rele ini menghasilkan *torsi* yang menekan tegangan pegas. *Relay electromagnetic* biasanya digunakan untuk mengontrol motor, untuk aplikasi otomotif seperti pompa bahan bakar listrik, untuk aplikasi industri yang membutuhkan kontrol tegangan dan arus tinggi, dan sebagainya. Energi listrik atau daya dapat menggerakkan saklar relai ini secara mekanis.

b) *Relay Static*

Relay static terdiri dari rangkaian elektronika tertentu yang berfungsi sebagai saklar elektronik. *Transistor, diode, dan thyristor* adalah contoh komponen elektronik yang berfungsi dalam rele proteksi ini. Tidak seperti rele biasa yang menggunakan arus medan magnet untuk menggerakkan saklar mekanis, *relay* statik menggunakan prinsip *optocoupler* yang terisolasi antara dioda cahaya dengan TRIAC atau SCR sebagai output. Akibatnya, tidak ada bagian yang bergerak pada relai statik seperti pada *relay* konvensional. Salah satu keunggulan *relay static* adalah bahwa mereka lebih cepat pensaklaran dari pada rele yang menggunakan prinsip saklar mekanis.

c) *Relay Digital*

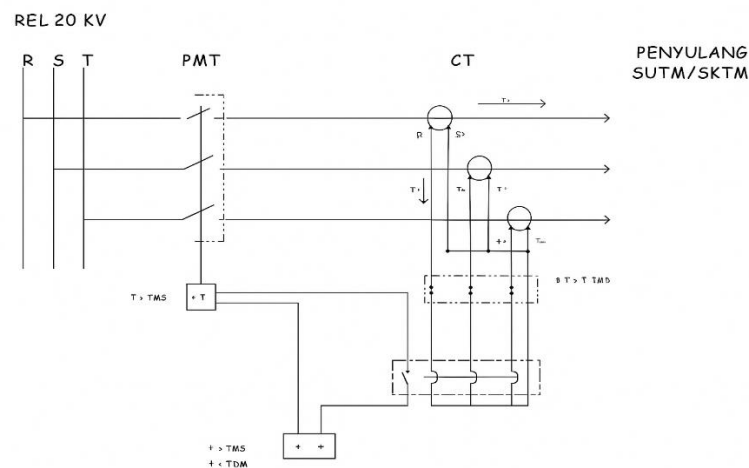
Digital Counter Relay, juga dikenal sebagai *Electronic Counter Relay*, adalah alat kontrol semi-digital yang banyak digunakan pada mesin produksi ringan, terutama mesin yang membutuhkan jumlah produk yang tepat, terutama mesin yang bergantung pada gerak putar untuk mengemas barangnya. Saat digunakan, *counter relay* ini harus selalu menggunakan sensor *proximity* sebagai masukan untuk menghasilkan keluaran NO dan NC yang diinginkan. Fungsi pengontrol sensor serupa dengan ini, sehingga dapat digunakan untuk berbagai rangkaian otomatis.

d) *Relay Numerik*

Sistem *relay* numerik menggunakan *algoritme* perlindungan perangkat lunak untuk mendeteksi gangguan listrik. Jenis relai ini juga dikenal sebagai *relay* perlindungan elektromekanis dan dapat melakukan berbagai tugas untuk melindungi dalam satu unit. Mereka juga dapat melakukan pengukuran, berkomunikasi, dan melakukan uji sendiri. Pusat pengatur beban memiliki kemampuan untuk menghubungkan *relay* ini ke SCADA yang sudah ada.

2.7. *Relay Arus Lebih (Over Current Relay)*

OCR digunakan untuk mendeteksi gangguan arus lebih akibat hubungan singkat atau beban lebih. *Relay* ini biasanya dilengkapi dengan pengaturan *pickup current* dan *time dial setting* (TDS) untuk menentukan ambang dan waktu kerja. Menurut Singh dan Kumar [12], pengaturan OCR yang tepat sangat penting untuk menjamin *selektivitas* dan menghindari *overlap* kerja antar *relay*, terutama pada sistem dengan banyak cabang distribusi.



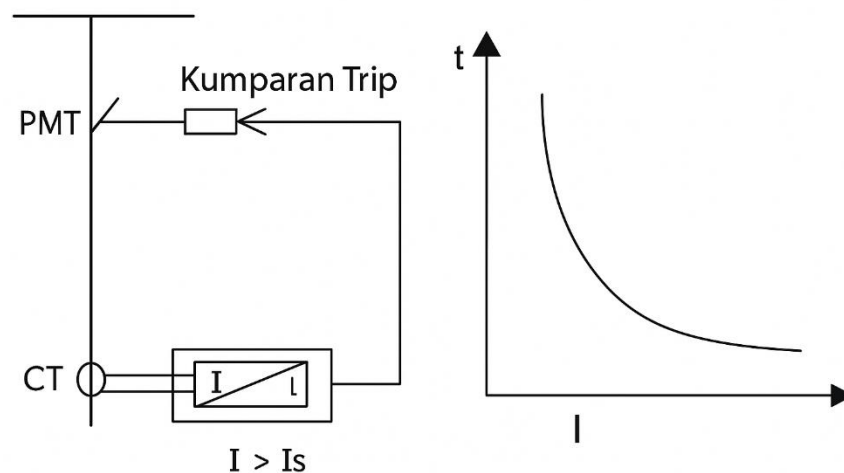
Gambar 2. Rangkaian Pengawat OCR

Sumber: <https://123dok.com/document/qvx6jg1y-evaluasi-koordinasi-relay-gangguan-tanah-gardu-garuda-pekanbaru.html>

Menurut cara kerjanya, waktu kerja *relay* terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

- a. *Over Current Relay* (OCR) dengan waktu kerja terbalik (*invers*)

Saat ada gangguan, rele akan memerintah PMT. Jika arus gangguan lebih besar dari penyetelannya (I_s), jangka waktu *relay* mulai meningkat hingga besarnya arus atau berbanding terbalik. Tidak seperti waktu *setting* (t_s), *relay* ini memiliki waktu kerja yang berbeda. Ini karena arus kerja *relay* semakin besar seiring dengan kecepatan waktu kerja (t_{trip}).



Gambar 3. Karakteristik *Over Current Relay Inverse Time*

Sumber: <https://dunia-listrik.blogspot.com/2009/07/relay-arus-lebih.html>

Relay jenis ini dapat dibagi lagi menjadi empat kelompok, yaitu:

- a. *Standard Inverse*
- b. *Very Inverse*
- c. *Extremely Inverse*
- d. *Long Time Inverse*

Tabel 1. Konstanta karakteristik waktu arus lebih

No	Deskripsi	k	c	α
1	<i>Standard Inverse</i>	0,14	0	0.02
2	<i>Very Inverse</i>	13,5	0	1
3	<i>Extremely Inverse</i>	80	0	2
4	<i>Long Time Inverse</i>	120	0	1

Hubungan antara arus terhadap waktu dapat ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut;

$$t = \frac{K \times TMS}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

T = Waktu dalam detik (s)

K, α = Konstanta

TMS = *Time Multiplier Setting*

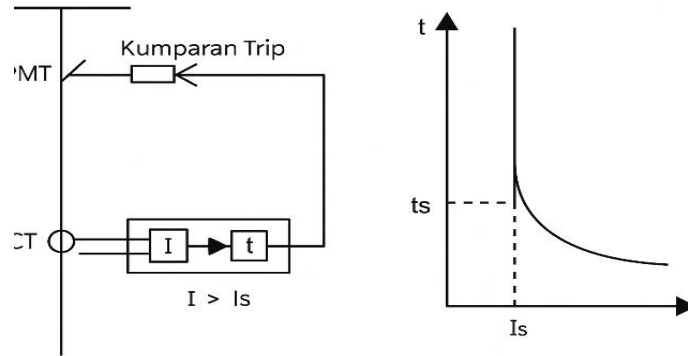
I = Arus gangguan (A)

I_s = Arus *setting* (A)

b. *Over Current Relay* (OCR) dengan waktu tertentu (*Definite Time Relay*)

Ketika arus gangguan relai melebihi penyetelannya (I_s), *relay* ini memberikan perintah PMT. Waktu kerja *relay* mulai meningkat dengan waktu tertentu, tidak tergantung pada arus lebih. Jika arus gangguan *relay* melebihi besarnya arus *setting* (I_s), sifat *relay* baru bekerja. Selain itu, waktu yang diperlukan *relay* untuk memberikan perintah *tripping* sesuai dengan waktu *setting* (T_s), yang diinginkan.

Selama waktu *relay*, waktu bekerjanya ($T_{tripping} = T_s$) tetap konstan, tidak terpengaruh oleh besarnya arus yang dilakukan *relay*.

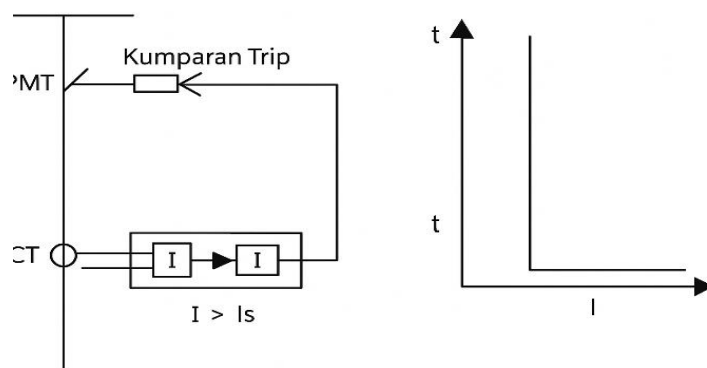


Gambar 4. Karakteristik *Over Current Relay Definite Time*

Sumber: <https://dunia-listrik.blogspot.com/2009/07/relay-arus-lebih.html>

c. *Over Current Relay* (OCR) dengan waktu seketika (*Instantaneous Relay*)

Relay jenis ini mampu bekerja seketika, yaitu pada saat arus mengalir melebihi nilai *settingnya*, *relay* bekerja dalam waktu *milidetik* (10-20) *ms* dan dapat digunakan secara mandiri atau bersama rele arus lebih dengan fitur lainnya.

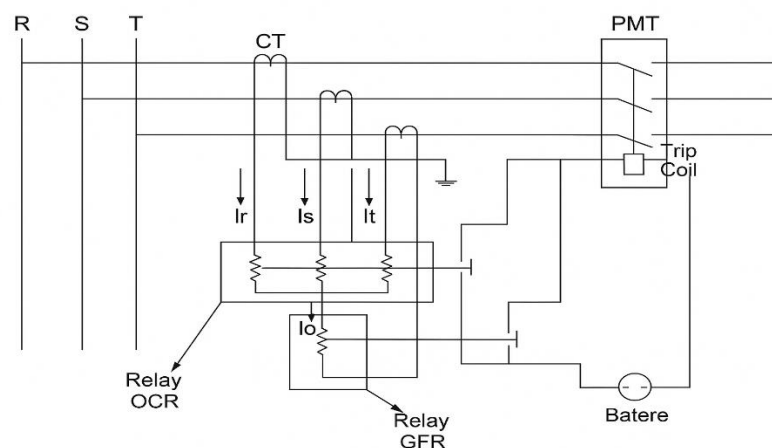


Gambar 5. Karakteristik *Over Current Relay Instantaneous*

Sumber: <https://dunia-listrik.blogspot.com/2009/07/relay-arus-lebih.html>

2.8. Ground Fault Relay (GFR)

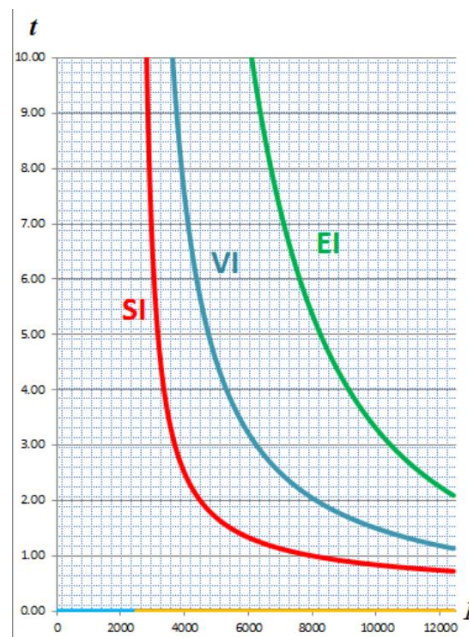
Relay gangguan tanah digunakan untuk mendeteksi arus bocor ke tanah akibat gangguan satu fasa ke tanah. GFR sangat efektif dalam sistem distribusi menengah dan rendah yang tidak memiliki titik netral terhubung langsung ke tanah. Menurut Hamid [13], GFR bekerja berdasarkan prinsip pengukuran arus netral atau arus residual, dan memainkan peran penting dalam mencegah kebakaran dan kerusakan akibat arus bocor yang tidak terdeteksi oleh OCR. *Ground Fault Relay* (GFR) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan *relay* arus lebih (OCR) namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. GFR mendeteksi melalui *binary input* yang ada pada rele sehingga memerintahkan *binary output* agar memberikan perintah jika adanya hubungan singkat ke tanah.



Gambar 6. Rangkaian Pengawat GFR

Sumber: <https://123dok.com/document/qvx6jgly-evaluasi-koordinasi-relay-gangguan-tanah-gardu-garuda-pekanbaru.html>

Pada kondisi normal beban seimbang I_r , I_s , I_t , sama besar, sehingga pada kawat netral tidak timbul arus dan rele hubung tanah tidak di aliri arus. Bila terjadi ketidakseimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral, sehingga rele hubung tanah akan bekerja.



Gambar 7. Kurva Karakteristik GFR

Sumber: <https://direktorilistrik.blogspot.com/2016/12/standar-idmt-untuk-relay-overcurrent.html>

Kurva karakteristik *ground fault relay* (GFR) adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara arus gangguan tanah (*ground fault current*) dan waktu yang dibutuhkan rele untuk memutuskan sirkuit (*trip time*). Kurva ini membantu dalam memahami bagaimana rele merespons terhadap berbagai tingkat arus gangguan dan berapa lama waktu yang dibutuhkan sebelum rele mengaktifkan pemutus sirkuit.

Kurva itu sendiri menunjukkan hubungan antara arus dan waktu. Ada beberapa jenis kurva, seperti *inverse*, *very inverse*, *extremely inverse*, dan *definite time*:

- *Inverse Time Characteristic*: Semakin besar arus gangguan, semakin cepat waktu *trip relay*. Artinya, rele akan bereaksi lebih cepat saat mendeteksi arus gangguan yang lebih tinggi.
- *Very Inverse Time Characteristic*: Lebih *sensitif* terhadap arus gangguan yang sangat tinggi dan memutuskan sirkuit lebih cepat dibandingkan dengan kurva *inverse*.
- *Extremely Inverse Time Characteristic*: Merespon sangat cepat terhadap arus gangguan yang jauh melebihi batas aman.

- *Definite Time Characteristic*: Memiliki waktu *trip* yang konstan, terlepas dari besar arus gangguan. Jika arus gangguan melebihi ambang batas tertentu, rele akan memutuskan sirkuit setelah periode waktu yang telah ditentukan.

Arus *setting* untuk rele OCR baik pada sisi *primer* maupun pada sisi *sekunder* transformator tenaga adalah:

$$I_{set} (Prim) = 10\% \times I_{nominal} \text{trafo} \dots \dots \dots (3)$$

Untuk menghitung *setting* arus untuk sisi *sekunder* yaitu:

$$I_{set} (Sek) = I_{set} (Prim) \times \frac{1}{Ratio CT} \dots \dots \dots (4)$$

2.9. Jenis Gangguan

Gangguan dalam sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi gangguan *simetris* dan tidak simetris. Gangguan *simetris* seperti tiga fasa ke tanah jarang terjadi, namun sangat berbahaya. Sementara itu, gangguan tidak simetris seperti satu fasa ke tanah, dua fasa, atau dua fasa ke tanah lebih sering terjadi. Menurut Li [14], identifikasi jenis gangguan penting untuk menentukan jenis proteksi yang dibutuhkan agar sistem tetap aman dan andal. Gangguan dapat didefinisikan sebagai semua keadaan tidak normal yang mengganggu aliran normal arus ke beban. Ketidaknormalan dalam sistem tenaga listrik yang menyebabkan aliran arus tidak seimbang disebut gangguan. Tujuan melakukan pemeriksaan gangguan adalah:

- 1) Penyelidikan terhadap unjuk rele proteksi
- 2) Untuk mengetahui kapasitas *rating* maksimum pemutus tenaga
- 3) Untuk mengetahui distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan sistem pada saat terjadinya gangguan.

Adapun klasifikasi gangguan ialah:

- a) Berdasarkan Kesimetrisannya

1. Gangguan *Asimetris*

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan dua fasa ke tanah termasuk gangguan *asimetris*, yang menyebabkan arus yang mengalir pada setiap fasanya tidak seimbang.

2. Gangguan *Simetris*

Gangguan *simetris* adalah gangguan yang terjadi di semua fasa dan menyebabkan arus dan tegangan pada setiap fasa tetap seimbang. Ini termasuk gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah dan gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

b) Berdasarkan lama terjadi gangguan

1. Gangguan *Transient (temporer)*

Gangguan *transien* terjadi pada saat pemutus tenaga (PMT) telah terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan kemudian dihubungkan kembali.

2. Gangguan Permanen

Apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan kemudian dihubungkan kembali, maka pada saat itulah gangguan permanen terjadi.

Selain klasifikasi gangguan yang telah disebutkan diatas, terbukanya pemutus tenaga tidak selalu disebabkan terjadinya gangguan pada sistem itu sendiri, namun dapat juga disebabkan oleh adanya kerusakan pada rele, kabel kontrol atau adanya pengaruh dari luar seperti induksi atau *interfensi*. Gangguan seperti ini disebut dengan gangguan *non-sistem*.

2.10. Gangguan Hubung Singkat

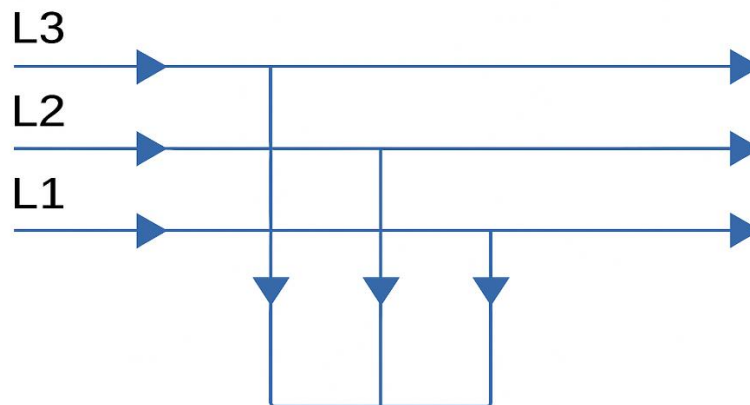
Gangguan hubung singkat merupakan kondisi ketika dua atau lebih konduktor bertegangan saling bersentuhan langsung atau melalui impedansi rendah, menyebabkan arus sangat tinggi dalam waktu singkat. Gangguan ini dapat merusak peralatan dan menimbulkan risiko keselamatan jika tidak segera diisolasi. Menurut Tran dan Park [15], sistem proteksi harus mampu mendeteksi dan memutus arus gangguan sebelum mencapai nilai kritis yang merusak sistem.

Untuk melindungi sistem tenaga listrik, sangat penting untuk mengetahui distribusi arus dan tegangan yang terjadi karena gangguan di berbagai lokasi. Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena kesalahan

antara bagian yang bertegangan. *Isolasi* yang tembus atau rusak dapat menyebabkan gangguan hubung singkat. Ini karena *isolasi* tidak tahan terhadap tegangan lebih besar dari dalam maupun dari luar (akibat sambaran petir). Gangguan hubung singkat dapat terjadi satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau tiga fasa ke tanah. Ini dapat dibagi menjadi dua kelompok: gangguan hubung singkat *simetris* dan gangguan hubung singkat tak *simetri* (*asimetris*). Gangguan ini dapat menyebabkan arus yang lebih besar pada fasa yang terganggu dan tegangan yang lebih tinggi pada fasa yang tidak terganggu.

1. Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Dalam kategori dan klasifikasi gangguan *simetris*, gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi ketika arus dan tegangan stiap fasa tetap seimbang setelah gangguan terjadi. sehingga hanya urutan positif yang dapat digunakan untuk menganalisis sistem seperti ini.

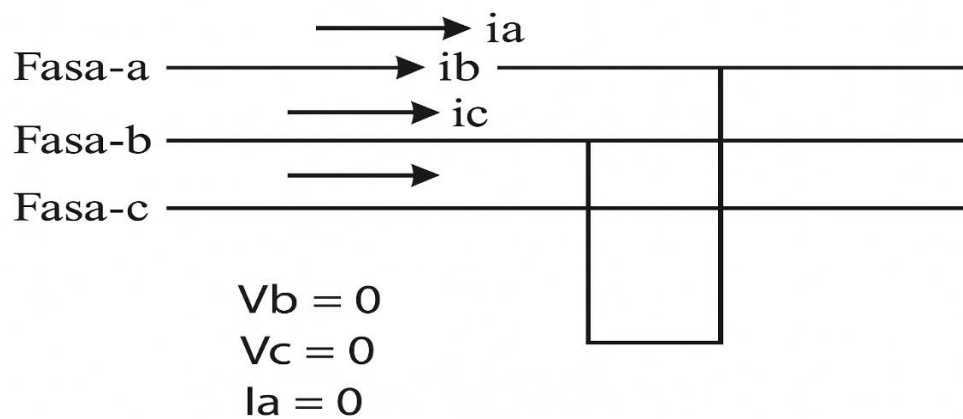


Gambar 8. Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Sumber: <https://www.omazaki.co.id/studi-analisis-hubung-singkat/>

2. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Gangguan hubung singkat dua fasa, juga dikenal sebagai gangguan hubung singkat fasa ke fasa, adalah ketika fasa ke fasa saling terhubung singkat. Karena tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah, arus saluran tidak memiliki komponen urutan nol.

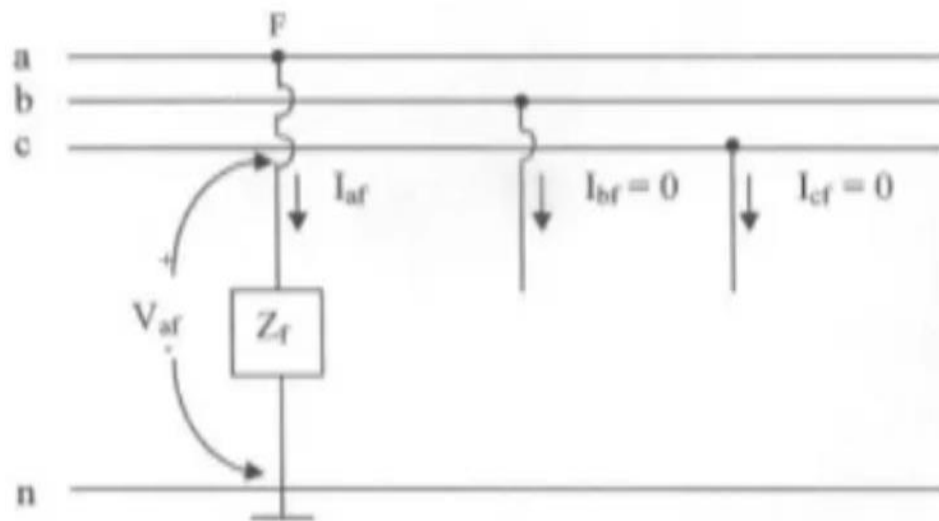


Gambar 9. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Sumber: <https://123dok.com/id/docs/grafik-arus-gangguan-hubung-singkat.10549088>

3. Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah

Sebagai gangguan *asimetris*, metode komponen *simetris* diperlukan untuk memeriksa tegangan dan arus saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Menghubungkan semua sumber tegangan yang ada di sistem dan mengganti titik gangguan (atau *node*) dengan sumber tegangan yang besarnya sama dengan tegangan yang terjadi sesaat sebelum gangguan di titik gangguan tersebut memungkinkan untuk menganalisis gangguan yang terjadi. Metode ini dapat digunakan untuk menunjukkan sistem tiga fasa yang tidak seimbang. Sistem ini dapat digambarkan dengan menggunakan teori komponen *simetris*, yang melibatkan elemen urutan positif, negatif, dan nol. Hubung singkat merupakan hubung yang tidak normal yang terjadi pada impedansi yang rendah, terjadi secara kebetulan maupun disengaja diantara dua titik dengan potensial yang berbeda pada setiap titiknya.



Gambar 10. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Sumber: <https://123dok.com/document/zw94g4gy-studi-gangguan-hubung-singkat-fasa-tanah-pada-aplikasi.html>

2.11. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan salah satu algoritma optimasi berbasis populasi yang dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, terinspirasi dari perilaku sosial kawanan burung dan ikan dalam mencari makanan secara kolektif. PSO telah berkembang menjadi metode yang efisien dan populer untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi non-linear, termasuk dalam bidang teknik elektro seperti optimasi pengaturan rele proteksi pada sistem tenaga listrik. Menurut Ahmed [16], PSO bekerja dengan memanfaatkan sejumlah partikel (solusi kandidat) yang bergerak dalam ruang pencarian dan saling memperbarui posisi berdasarkan pengalaman individu dan kolektif. Setiap partikel memiliki kecepatan dan posisi yang disesuaikan berdasarkan dua komponen utama, yaitu pengalaman terbaiknya sendiri (*personal best*) dan pengalaman terbaik kawanan (*global best*).

Dalam aplikasi proteksi sistem tenaga, PSO digunakan untuk mengoptimasi parameter-parameter penting seperti *time dial setting* (TDS) dan *pickup current* pada *over current relay* (OCR) dan *ground fault relay* (GFR). Tujuan utama adalah meminimalkan total waktu operasi sistem proteksi sekaligus mempertahankan koordinasi selektif antar rele. Penelitian oleh Tiwari dan Rout [17] menunjukkan bahwa PSO mampu menghasilkan pengaturan rele yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional, dengan mengurangi waktu operasi total dan mencegah *overlap* antar karakteristik rele. Selain itu, metode ini unggul karena kemampuannya beradaptasi dengan berbagai kendala teknis seperti batasan arus *pickup*, margin waktu koordinasi (Δt), serta karakteristik *inverse time*.

Modifikasi pada algoritma PSO juga telah dilakukan untuk meningkatkan performa dan keakuratan dalam proses optimasi. Misalnya, Amin [18] mengembangkan constrained PSO yang mampu mempertimbangkan batasan koordinasi selektif secara lebih ketat dalam sistem distribusi multi-layer. Sementara itu, Shaheen dan El-Dabah [19] menerapkan *adaptive inertia weight* PSO yang memberikan keseimbangan lebih baik antara eksplorasi dan eksploitasi solusi, sehingga menghasilkan konvergensi yang lebih cepat dalam pencarian setting TDS yang optimal.

Dengan demikian, PSO merupakan pendekatan yang sangat relevan dan menjanjikan dalam pengembangan sistem proteksi modern, khususnya dalam pengaturan koordinasi rele yang kompleks dan dinamis. Keunggulan utamanya terletak pada kesederhanaan implementasi, efisiensi komputasi, serta fleksibilitas dalam menangani berbagai macam fungsi objektif dan batasan teknis sistem tenaga.

III. METODELOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak April 2025 dan selesai pada September 2025, bertempat di Jalan Prof Sumantri Bojonegoro No 1, Bandar Lampung, laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL), Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dan berikut jadwal penelitian seperti pada table 2. Berikut:

Tabel 2. Jadwal Penelitian Tugas Akhir

Agenda	Bulan					
	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September
Studi Literatur dan Studi Bimbingan						
Pembuatan Proposal						
Seminar Proposal						
Pengumpulan Data						
Pengolahan Data						
Simulasi Program						
Analisis Hasil						
Seminar Hasil						
Ujian Komprehensif						

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi; AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.10 GHz, RAM 8 GB System type 64-bit operating system x64-based processor.
2. *Software Visual Studio Code* sebagai perangkat utama yang digunakan untuk menganalisis sistem.
3. *Software Microsoft Excel* untuk validasi perhitungan dan grafik.
4. *Software python* yang digunakan untuk menganalisis *time dial setting* (TDS) dari sistem dalam bentuk pemodelan, pemrograman, dan visualisasi.

5. Data-data sistem pada Gardu Induk Tegineneng yang dibutuhkan guna membantu penelitian tugas akhir ini.

3.3. Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan Langkah-langkah sebagai berikut;

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang terkait dengan tugas akhir, yaitu mengenai metode analisis koordinasi rele OCR dan GFR dengan cara memodelkan data analisis dan cara mengoperasikannya perhitungan di *software*. Literatur tersebut di ambil berbagai sumber, seperti pada jurnal ilmiah dan laporan-laporan yang terkait dengan penelitian.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan-persoalan selama penelitian Bersama dosen pembimbing. Diskusi dilakukan secara berskala,, mulai dari diskusi terkait dasar dari sistem proteksi, hingga metode yang digunakan dalam penulisan ini untuk melakukan analisis menggunakan *software*. Dengan adanya studi bimbingan, penulis banyak mendapatkan pengetahuan dan juga arahan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini.

3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengumpulan data berasal dari data eksisting proteksi di Gardu Induk Tegineneng. Adapun data-data yang dibutuhkan untuk penelitian ini meliputi:

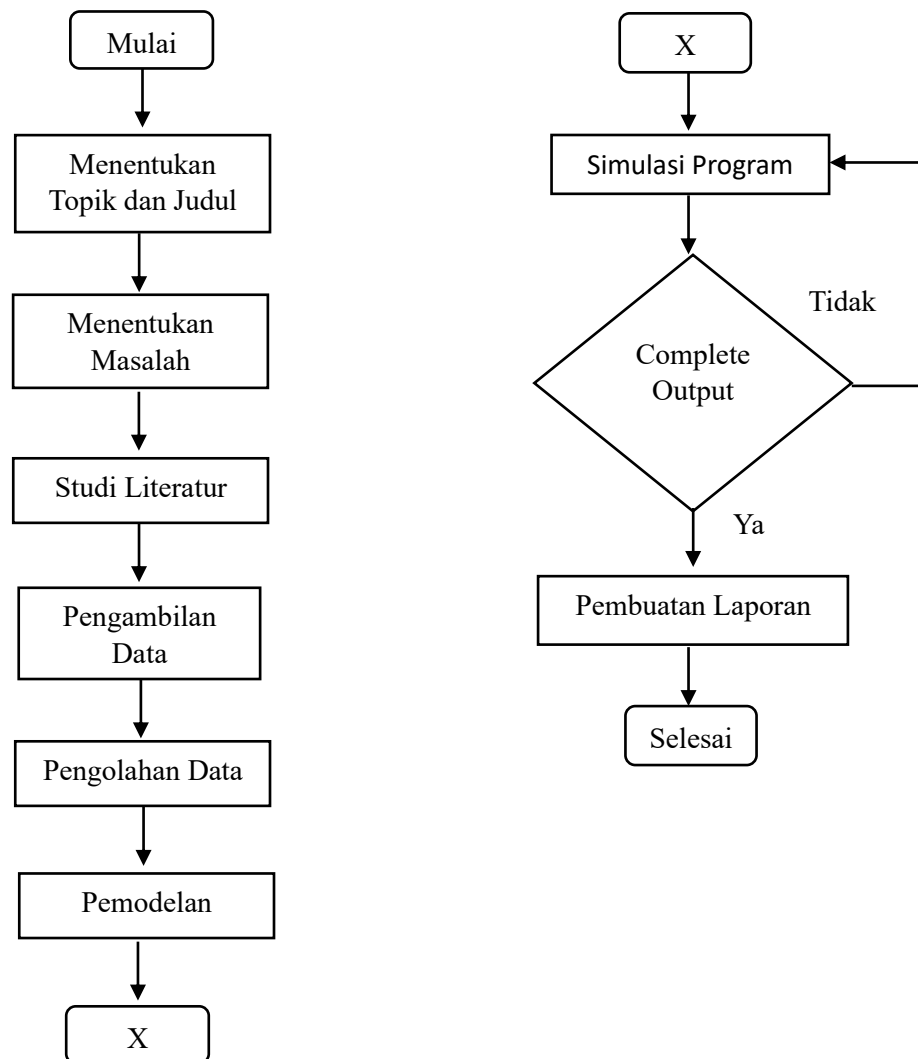
- a. Data arus setting pada setiap rele baik pada rele OCR maupun GFR.
- b. Data arus gangguan pada kedua rele.
- c. Data waktu operasi dari setiap rele, baik pada rele OCR maupun GFR.
- d. Data hasil *time dial setting* (TDS) pada rele eksisting sebagai acuan pembandingan hasil akhir.

4. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian ini di tuangkan ke dalam sebuah laporan proposal penelitian terlebih dahulu. Kemudian, hasil penelitian ini dituangkan ke dalam sebuah laporan akhir penelitian. Laporan ini merupakan salah satu dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggung jawabkan sebagaimana mestinya.

3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian

Berikut merupakan tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian tugas akhir ini seperti pada Gambar



Gambar 11. Diagram Alir Penelitian

3.5. Pemodelan Analisa Penelitian

Berikut merupakan pemodelan optimasi *time dial setting* (TDS), *pick up current*, dan waktu operasi *relay* dengan metode *particle swarm optimization* (PSO):

1. Fungsi objektif penelitian ini adalah:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m (t_{cact,i} (TDS_i, I_{psi}) - t_{target,i})^2 \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan

TDS_i = *Time Dial Setting* rele ke- i (s)

I_{psi} = *Arus pick up setting* rele ke- i (A)

$t_{cact,i}$ = Waktu operasi karakteristik rele ke- i (s)

$t_{target,i}$ = Waktu operasi rele ke- i (s)

m = Jumlah rele

Fungsi objektif $F(x)$ digunakan untuk meminimalkan selisih antara $t_{cact,i}$ merupakan waktu operasi hasil perhitungan rele ke- i , yang bergantung pada variabel keputusan optimasi, yaitu *Time Dial Setting* (TDS) dan arus *pick-up* I_{psi} , $t_{target,i}$ merupakan waktu operasi target yang diinginkan untuk rele ke- i , sesuai dengan koordinasi proteksi. Dengan meminimalkan nilai $F(x)$, maka waktu operasi yang dihitung dari hasil optimasi akan mendekati waktu operasi target yang sudah ditetapkan.

2. Sedangkan untuk *equality constraint* pada penelitian ini adalah:

$$t_i = \frac{\alpha}{\left(\frac{I_f}{I_{psi}}\right)^\beta - 1} TDS_i \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan

t_i	= Waktu operasi rele ke- i	(s)
I_{psi}	= Arus <i>pick up setting</i> rele ke- i	(A)
I_f	= Arus gangguan pada titik tertentu	(A)
α	= Konstanta <i>standard inverse</i> (0.14)	
β	= Konstanta <i>standard inverse</i> (0.02)	

Persamaan ini merupakan bentuk umum dari kurva karakteristik waktu-invers (*Inverse Time Characteristics*) sesuai standar IEC 60255 yang digunakan pada pengaturan *relay* arus lebih (*Over Current Relay / OCR*) dan *Ground Fault Relay* (GFR).

3. Dan untuk *Inequality constraint* pada penelitian ini adalah:

a. Koordinasi waktu kerja rele

$$t_{backup} - t_{utama} \geq \Delta t_{min} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan :

t_{utama} : waktu operasi *relay* yang paling dekat dengan titik gangguan (*primary/main*).

t_{backup} : waktu operasi *relay* cadangan yang melindungi area yang sama bila *relay* utama gagal.

Δt_{min} : *margin* koordinasi minimum (*Coordination Time Interval/CTI*) yang wajib dipenuhi agar *relay* cadangan tidak mendahului *relay* utama.

Margin Δt_{min} mengakomodasi waktu buka PMT, *overshoot/operating time relay*, ketidak pastian pengukuran (CT, toleransi kurva), dan *margin* keselamatan. Dengan margin ini, *selektivitas* terjaga *relay* utama *trip* dulu dan *relay* cadangan baru bekerja bila utama gagal. t_{utama} disini dimaksudkan untuk *relay* diposisi terdekat dengan titik gangguan terletak di level tegangan 20 KV dan t_{backup} disini dimaksudkan untuk *relay* diposisi terjauh dari titik gangguan yakni terletak di level tegangan 150 KV.

b. Batasan arus *pick up* dan *time dial setting*

$$I_{psmin} \leq I_{psi} \leq I_{psmax} \dots \dots \dots (8)$$

$$TDS_{min} \leq TDS_i \leq TDS_{max} \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan

I_{psi} = Arus *pick up setting* rele ke-*i* (A)

I_f = Arus gangguan pada titik tertentu (A)

Batas I_{psi} jika batas terlalu rendah menjadikan *relay* rawan salah operasi pada arus beban atau *starting*. Jika batas terlalu tinggi menjadikan *relay* bisa tidak peka terhadap gangguan. Batas atas–bawah ditetapkan dari arus beban maksimum (ditambah *margin*), rasio CT, dan level gangguan terendah yang harus terdeteksi. Batas TDS digunakan untuk menjaga waktu operasi tetap dalam rentang yang diizinkan pabrikan atau standar serta memudahkan koordinasi berjenjang (penyulang < 20 kV < 150 kV sesuai target penelitian).

c. Koordinasi OCR dan GFR

Guna membuat GFR tidak bekerja lebih cepat di bandingkan OCR

$$t_{ocr} \leq t_{gfr} - \Delta t \dots \dots \dots (10)$$

Keterangan

t_{ocr} = Waktu operasi *relay* OCR (s)

t_{gfr} = Waktu operasi *relay* GFR (s)

Δt = Margin koordinasi *relay* OCR dan *relay* GFR (s)

Dengan pertidaksamaan ini, OCR selalu lebih cepat dari GFR untuk gangguan yang terdeteksi keduanya. Skema ini dipilih ketika desain menuntut pemutusan oleh OCR lebih dahulu (misalnya pada sistem ini menginginkan GFR sebagai cadangan atau pengawas agar tidak mudah memutus pada kondisi *transien* tanah yang cepat hilang).

3.6. Matriks

Sebelum membuat program maka dibuat terlebih dahulu matriksnya untuk dapat memetakan fungsi objektif dan Batasan-batasannya.

Rumus dasar:

$$t_i = \frac{\alpha}{\left(\frac{I_f}{I_{psi}}\right)^\beta - 1} TDS_i \dots \dots \dots (11)$$

Keterangan

t_i = Waktu operasi rele ke- i (s)

I_{psi} = Arus *pick up setting* rele ke- i (A)

I_f = Arus gangguan pada titik tertentu (A)

α = Konstanta *standard inverse* (0.14)

β = Konstanta *standard inverse* (0.02)

Tabel 3. Data Matriks Pemetaan

Problem Variable	TDS		Ipu (A)		t (s)		tpenyulang (s)		TDS		Ipu (A)		t (s)		t_utama (s)		TDS		Ipu (A)		t (s)		t_backup (s)		Constraint unit													
LP Variable	x1	y1	x2	y2	x3	y3	x4	y5	x5	y5	x6	y6	x7	y7	x8	y8	x9	y9	x10	y10	x11	y11	x12	y12														
Constraint 1	1 1																										y1 - 0.025 (x2=350) (y2=30) 0.5 (x8 - x4) (y8 - x4) y5 - 0.025 (x6=2025) (y6=100) 1.5 (x12 - x8) (y12 - x8) y9 - 0.3 (x10=270) (y10=90) 1.5											
2			1 1																																			
3					1 1																																	
4							1 1										1 1																					
5									1 1																													
6											1 1																											
7													1 1																									
8															1 1										1 1													
9																	1 1																					
10																			1 1																			
11																					1 1																	
Variable min	0.1	0.1	300	25	0.45	0.45	0.1	0.1	0.2	0.2	1500	50	0.9	1.45	0.9	1.45	0.3	0.6	200	50	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45													
Variable max	0.2	0.2	400	35	0.55	0.55	0.2	0.2	0.3	0.3	2500	150	1.1	1.55	1.1	1.55	0.4	0.7	300	100	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55													
Penyulang									20 KV								150 KV																					

Data matriks pemetaan fungsi objektif diatas merupakan representasi matematis dari permasalahan optimasi pengaturan *relay* proteksi, yang terdiri dari *Over Current Relay* (OCR) yang disimbolkan dengan variabel x , dan *Ground Fault Relay* (GFR) yang disimbolkan dengan variabel y . Pengaturan ini dilakukan pada tiga level sistem tenaga, yaitu sisi penyulang, 20 kV, dan 150 kV. Masing-masing rele memiliki beberapa parameter yang dioptimasi, yaitu waktu kerja rele (t), arus *pickup* (I_{ps}), *time dial setting* (TDS), dan total waktu operasi rele (t_{total}). Dalam tabel ini, setiap pasangan OCR dan GFR di setiap level memiliki batasan nilai minimum dan maksimum, yang dirancang agar sesuai dengan standar teknis sistem proteksi.

Pada tabel juga menunjukkan keterkaitan antar variabel melalui sejumlah *constraint* (kendala), yang dituliskan dalam bentuk persamaan atau pertidaksamaan. *Constraint* tersebut mencerminkan prinsip koordinasi *selektif* dalam sistem proteksi, yaitu memastikan bahwa rele pada level tegangan lebih tinggi harus bekerja lebih lambat dibanding rele di bawahnya, dengan selang waktu tertentu (misalnya minimal 0,5 detik). Sebagai contoh, waktu kerja OCR pada level 20 kV (x_8) harus lebih besar dari OCR penyulang (x_4) minimal 0,5 detik, sedangkan OCR 150 kV (x_{12}) harus memiliki waktu kerja yang lebih besar dari OCR 20 kV minimal 1 detik. Hal serupa juga berlaku untuk GFR, yang diatur agar waktu operasinya meningkat secara bertingkat dari penyulang ke 150 kV.

Selain itu, terdapat nilai-nilai tetap (*fixed values*) pada beberapa variabel, seperti arus *pickup* GFR penyulang ($y_2 = 30$ A) atau OCR 150 kV ($x_{10} = 270$ A), yang mungkin telah ditentukan berdasarkan karakteristik sistem atau spesifikasi alat. Tujuan dari keseluruhan pemodelan ini adalah untuk memperoleh kombinasi nilai parameter rele (t , I_{ps} , dan TDS) yang optimal, di mana sistem proteksi dapat bekerja secara cepat dan *selektif*, serta tetap memenuhi seluruh batasan teknis dan koordinasi antar *relay*. Model seperti ini digunakan dalam penerapan algoritma optimasi seperti *Particle Swarm*

Optimization (PSO) untuk menyelesaikan masalah pengaturan koordinasi proteksi secara efisien dan akurat.

3.7. Perhitungan *Time Dial Setting* (TDS)

Untuk mengoptimalkan *time dial setting* (TDS) atau waktu tunda minimum pada rele *over current relay* (OCR) dan *ground fault relay* (GFR) sebelum aktif maka, harus menentukan setting arus *pickup*, dapat dilakukan dengan persamaan

$$t_i = \frac{\alpha}{\left(\frac{I_f}{I_{psi}}\right)^\beta - 1} TDS_i \dots \dots \dots (12)$$

Sehingga,

$$TDS_i = \frac{t_i \left[\left(\frac{I_f}{I_{psi}}\right)^\beta - 1 \right]}{\alpha} \dots \dots \dots (13)$$

Dengan membatasi nilai pada *time dial setting* (TDS) sebagai berikut :

$$TDS_{min} \leq TDS_i \leq TDS_{max} \dots \dots \dots (14)$$

Keterangan

t_i	= Waktu operasi rele ke- i	(s)
I_{psi}	= Arus <i>pick up setting</i> rele ke- i	(A)
I_f	= Arus gangguan pada titik tertentu	(A)
α	= Konstanta <i>standard inverse</i> (0.14)	
β	= Konstanta <i>standard inverse</i> (0.02)	

3.8. Perhitungan *Setting Arus Pickup*

Perhitungan arus *pickup* merupakan tahap penting dalam menentukan *setting relay* arus lebih (*Over Current Relay/OCR*). Arus *pickup* adalah nilai arus minimum yang menyebabkan *relay* mulai bekerja ketika terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik. Tujuan dari penentuan arus *pickup* ini adalah untuk memperoleh *setting* yang optimal, sehingga *relay* dapat memberikan proteksi secara andal tanpa mengganggu kontinuitas pelayanan sistem. Secara umum, arus *pickup* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I_{pickup} = \frac{I_{set}}{RasioCT} \dots\dots\dots(15)$$

dimana:

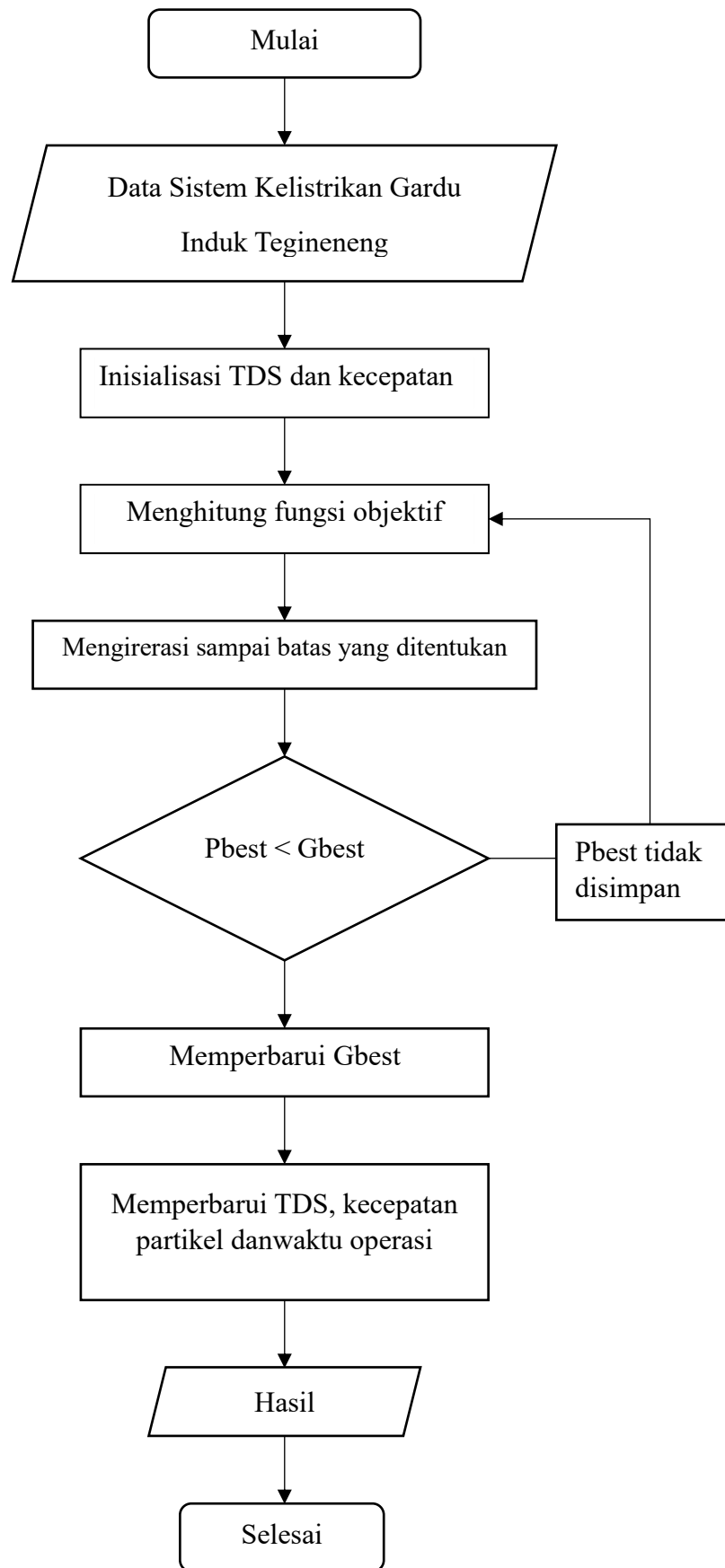
- I_{set} = merupakan arus yang ditentukan berdasarkan arus beban maksimum atau arus gangguan tertentu,
- $RasioCT$ = merupakan perbandingan arus pada *Current Transformer* (CT) yang digunakan untuk mengubah arus besar di sistem menjadi arus kecil yang aman bagi *relay*.

Agar *setting relay* tidak terlalu rendah (sehingga *relay* sering salah bekerja) maupun terlalu tinggi (sehingga *relay* tidak peka terhadap gangguan), maka nilai arus *pickup* perlu dibatasi dalam rentang tertentu. Hal ini dinyatakan dengan batasan matematis:

$$I_{psmin} \leq I_{psi} \leq I_{psmax} \dots\dots\dots(16)$$

3.9. Perhitungan Optimasi *Particle Swarm Optimization* (PSO)

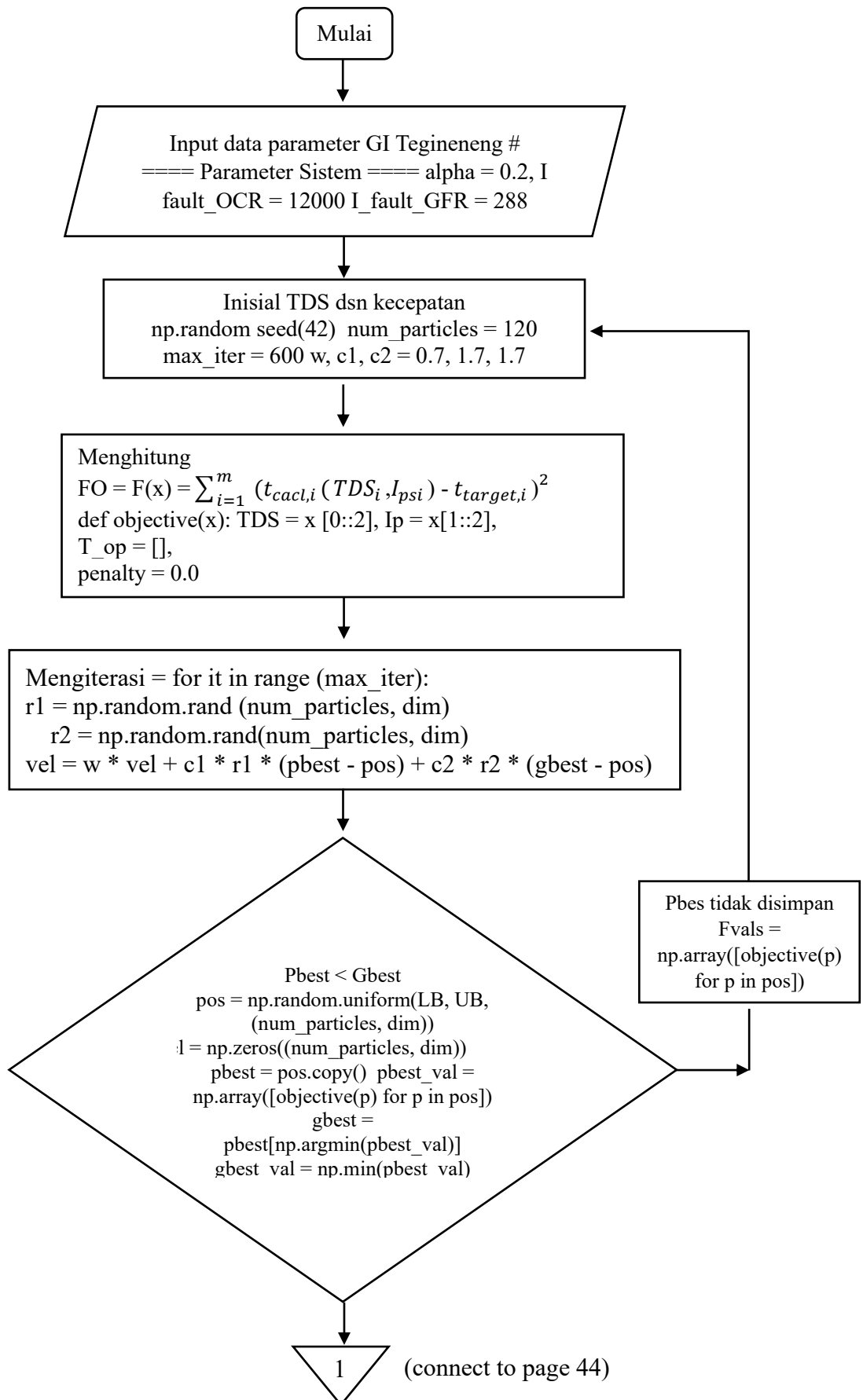
Penelitian ini menggunakan metode *Particle swarm optimization* (PSO) untuk mendapatkan hasil peluang optimasi yang lebih baik. Dan berikut merupakan tahapan-tahapan penelitiannya dapat di lihat dari *flowchart* di bawah.

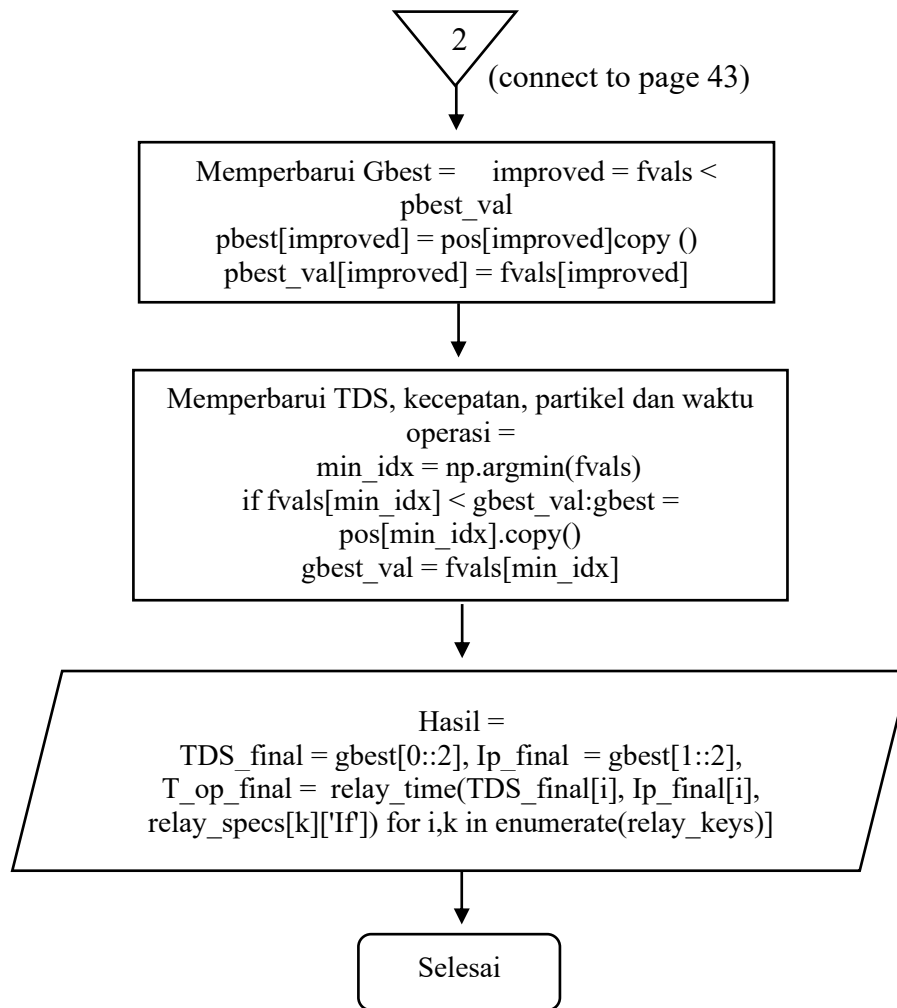


Gambar 12. Diagram Alir PSO

Diagram alir yang ditampilkan menggambarkan tahapan pelaksanaan optimasi pengaturan *time dial setting* (TDS) pada sistem proteksi menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) di Gardu Induk Tegineneng. Proses dimulai dari pengumpulan data sistem kelistrikan yang mencakup parameter relevan seperti arus gangguan, arus beban, dan pengaturan proteksi eksisting. Setelah data terkumpul, proses dilanjutkan dengan inisialisasi partikel PSO, yaitu memberikan nilai awal TDS dan kecepatan untuk masing-masing partikel dalam populasi. Selanjutnya, fungsi objektif dihitung berdasarkan kriteria optimasi, misalnya meminimalkan waktu operasi total rele dengan tetap menjaga koordinasi *selektif* antar tingkatan rele (penyulang, 20 kV, dan 150 kV).

Setelah fungsi objektif dihitung, algoritma melakukan iterasi hingga mencapai batas maksimum yang telah ditentukan. Dalam setiap iterasi, nilai *personal best* (*Pbest*) dibandingkan dengan *global best* (*Gbest*). Jika *Pbest* lebih baik dari *Gbest*, maka *Gbest* akan diperbarui dengan nilai *Pbest* tersebut. Jika tidak, *Gbest* tetap dipertahankan. Proses ini dilanjutkan dengan memperbarui nilai TDS, kecepatan, dan posisi partikel (representasi solusi) berdasarkan formula PSO yang melibatkan komponen inersia, pengaruh pribadi (*Pbest*), dan pengaruh sosial (*Gbest*). Iterasi terus berlanjut hingga kriteria konvergensi tercapai atau jumlah iterasi maksimum terpenuhi. Akhir dari proses ini adalah keluarnya nilai TDS dan parameter lainnya yang optimal, yang ditampilkan sebagai hasil akhir optimasi. Dengan alur ini, sistem proteksi diharapkan memiliki pengaturan TDS yang lebih cepat, *selektif*, dan *efisien* dibandingkan dengan pengaturan *existing*.





Gambar 13. Diagram Alir Program PSO

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan terhadap perbandingan *setting over current relay* (OCR) dan *ground fault relay* (GFR) antara kondisi eksisting dapat disimpulkan dan saran dalam beberapa hal sebagai berikut:

5.1. Kesimpulan

1. Metode PSO berhasil mengoptimasi *setting relay* OCR dan GFR dengan menghasilkan nilai *Time Dial Setting* (TDS) dan arus *pickup* (I_{pickup}) yang optimal. Hasil optimasi mampu menjaga *selektivitas* dan koordinasi antar *relay* pada setiap level proteksi (penyulang, 20 kV, dan 150 kV).
2. Untuk *Over Current Relay* (OCR) nilai TDS hasil optimasi pada penyulang berkisar 0.142 s – 0.157 s, dengan waktu operasi tercepat sekitar 0.146 s – 0.161 s. Pada sisi 20 kV, nilai TDS sebesar 0.297 s dengan waktu operasi 0.895 s, sedangkan sisi 150 kV memiliki TDS sebesar 0.399 s dengan waktu operasi 0,365 s. Urutan kerja *relay* OCR sesuai standar IEEE C37.112-1996, yaitu OCR penyulang < OCR 20 kV < OCR 150 kV. Hal ini menunjukkan bahwa *relay* penyulang bekerja paling cepat, diikuti *relay* distribusi 20 kV, dan terakhir *relay* transmisi 150 kV sebagai proteksi cadangan dengan rindician *grading time* yang didapat pada sisi penyulang ke sisi 20 KV didapatkan *grading time* sebesar 0.734 s dan pada sisi 20 KV ke sisi 150 KV didapatkan *grading time* sebesar 0.53 s.
3. Untuk *Ground Fault Relay* (GFR) nilai TDS pada penyulang diperoleh sekitar 0,118 – 0,131 , dengan waktu operasi tercepat 0,20 s – 0,24 s. Pada sisi 20 kV, diperoleh TDS sebesar 0,218 s dengan waktu operasi 0,99 s, sedangkan sisi 150 kV memiliki TDS sebesar 0,589 s dengan waktu operasi 1,53 s. Urutan kerja GFR juga telah memenuhi prinsip *selektivitas*, yaitu GFR penyulang < GFR 20 kV < GFR 150 kV. *Relay* penyulang bekerja lebih dahulu kemudian diikuti *relay* 20 kV dengan selisih waktu (*grading time*) yang dihasilkan

sebesar 0.7 s, pada sisi *relay* 20 kV dan *relay* 150 kV mendapatkan nilai *grading time* sebesar 0.54 s. Dengan konfigurasi ini, proteksi gangguan tanah dapat dilakukan secara cepat, tepat, dan tidak mengganggu kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

4. Perbandingan hasil optimasi PSO dengan kondisi *existing* menunjukkan adanya peningkatan kinerja sistem proteksi waktu operasi *relay* menjadi lebih singkat pada gangguan di level bawah (penyulang). *Margin selektivitas* antar *relay* semakin jelas, sehingga meminimalkan kemungkinan terjadinya *overlap* dan *mal-operation*. Sistem proteksi menjadi lebih andal, cepat, dan *efektif* dalam mengisolasi gangguan.
5. Simulasi *Single Line Diagram* (SLD) pada *DIgSILENT PowerFactory* membuktikan bahwa hasil optimasi PSO menghasilkan kurva *Time Current Characteristic* (TCC) yang lebih baik dibandingkan kondisi *existing*. Kurva menunjukkan adanya *time grading margin* (TGM) yang cukup antar *relay*, sehingga sistem proteksi bekerja *selektif*, *responsif*, dan sesuai standar proteksi modern.

5.2. Saran

1. Hasil *setting* OCR dan GFR yang diperoleh melalui metode PSO dapat dijadikan acuan untuk memperbarui *setting relay* pada Trafo 4 Gardu Induk Tegineneng. Namun, sebelum implementasi, perlu dilakukan uji *verifikasi* secara langsung pada perangkat *relay* dan sistem jaringan nyata.
2. Untuk memperoleh hasil yang lebih optimal, disarankan melakukan perbandingan metode optimasi lain seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Artificial Bee Colony* (ABC), atau *Differential Evolution* (DE). Hal ini dapat membantu mengevaluasi keunggulan relatif PSO dan memilih metode terbaik untuk sistem proteksi.
3. Penelitian ini lebih fokus pada optimasi koordinasi *relay* pada satu trafo. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan simulasi pada berbagai titik gangguan dan beragam kondisi operasi untuk memastikan keandalan *setting relay* pada skenario yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kumar, P., Sharma, A., & Singh, J. (2020). "A review on coordination of overcurrent relays using optimization techniques." *Electric Power Systems Research*, 180, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106172>
- [2] Bashir, A., & Ahmad, M. (2022). "Coordination of Overcurrent Protection Relays Using Modified Metaheuristic Algorithms." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00728-9>
- [3] Rahman, M. M., Islam, S., & Ghosh, A. (2021). "Optimal Overcurrent Relay Coordination Using Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Review." *Energies*, 14(3), 528. <https://doi.org/10.3390/en14030528>
- [4] Al-Fatlawi, M. H., & Hasan, S. S. (2018). "A Comparative Study of Overcurrent Relay Coordination using Metaheuristic Techniques." *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(6), 4729–4737. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i6.pp4729-4737>
- [5] Reddy, P. N., Kumar, R., & Sahu, B. K. (2023). "An Intelligent Adaptive Relay Coordination using Hybrid PSO-Fuzzy Logic for Distribution System." *Journal of Engineering Research*, 11(2), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.01.006>
- [6] Prakash, P., & Kumar, R. (2018). Power system protection: A comprehensive review. *International Journal of Electrical Engineering*, 25(2), 45–52.
- [7] Gupta, R., & Singh, A. (2017). Functions and challenges of power system protection. *Journal of Energy Systems*, 12(1), 33–40.
- [8] Alam, M., Hasan, M., & Rahman, F. (2019). Criteria for effective protection system design. *Electrical Engineering Letters*, 9(3), 122–128.
- [9] Raza, M., Tanvir, M., & Iqbal, A. (2020). Relay operating characteristics in modern power grids. *Electric Power Systems and Research*, 185, 106356.
- [10] Zhang, T., Liu, Y., & Zhao, H. (2016). Classification of protective relays and their applications. *Power Engineering Transactions*, 31(1), 23–30.

- [11] Bakar, A. H. A., Khalid, N. A., & Hussain, M. (2017). Advances in digital protection relays. *International Conference on Smart Grid Technologies*.
- [12] Singh, R., & Kumar, A. (2018). Analysis and coordination of overcurrent relays in distribution systems. *Electrical Power Components and Systems*, 46(5), 470–478.
- [13] Hamid, S., Nor, R. M., & Aziz, M. A. (2021). Ground fault protection techniques for distribution networks. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 18(2), 98–105.
- [14] Li, J., Sun, Q., & Zhou, Y. (2022). Fault classification and protection strategy in smart grids. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 11(1), 56–64.
- [15] Tran, N. T., & Park, J. (2017). Analysis of short-circuit faults in power systems. *Korean Journal of Electrical Engineering*, 34(4), 295–301.
- [16] Ahmed, A., Mohammed, I., & Sulaiman, S. (2020). Optimal coordination of protective relays using particle swarm optimization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100712.
- [17] Tiwari, A., & Rout, P. K. (2021). Application of PSO in Optimal Relay Coordination in Smart Distribution Networks. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(2), 2367–2375.
- [18] Amin, M., Hossain, M. J., & Bakar, A. H. A. (2019). Modified PSO for Multi-Constraint Protection Coordination. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 17, 100179.
- [19] Shaheen, S., & El-Dabah, M. A. (2022). Improved particle swarm optimization algorithm for overcurrent relay coordination. *Alexandria Engineering Journal*, 61(7), 5603–5612.