



**OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY* PADA TRAFO 60  
MVA 150/20 KV DAN PENYULANG 20 KV GUMUL GARDU INDUK  
BANARAN BERBASIS *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

**SKRIPSI**

Oleh

**Yulia Setyaningrum  
NIM 161910201007**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**



**OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY* PADA TRAFO 60  
MVA 150/20 KV DAN PENYULANG 20 KV GUMUL GARDU INDUK  
BANARAN BERBASIS *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1) dan mencapai gelar sarjana

Oleh

**Yulia Setyaningrum**  
**NIM 161910201007**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan syukur, karunia dan rahmat-Nya yang telah memberikan kelancaran bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Nabi Muhammad SAW sebagai penuntun setiap umat manusia.
3. Kedua Orang Tua dan Keluargaku, dukungan kalian sungguh luar biasa.
4. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T, M.T dan Bapak Andi Setiawan, S.T, M.T selaku dosen pembimbing utama dan dosen pembimbing anggota yang dengan sabar telah memberikan saran, masukan serta bimbinganya.
5. Teruntuk kawan-kawan, kakak tingkat, dan adik tingkat Laboratorium Patrang Elektro, terutama Laboratorium Sistem Tenaga yang telah memberi dukunganya kepada penulis.
6. Teruntuk *good girl squad* , seluruh kawan-kawan INDUKTRO (Ikatan Dulur Elektro) 2016, Para Manusia Tenaga 2016, Robotika UNEJ, atas kebersamaan yang telah banyak berkontribusi semasa kuliah.
7. Segenap civitas akademika Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember atas dukungan, kerja sama, doa dan masukannya selama proses perkuliahan.
8. Almamaterku Universitas Jember yang aku cintai dan banggakan.

**MOTTO**

”Jika seseorang berpergian dengan tujuan mencari ilmu, maka Allah akan menjadikan perjalanannya seperti perjalanan menuju surga”

**(Nabi Muhammad SAW)**

“Agama tanpa ilmu adalah buta, ilmu tanpa agama adalah lumpuh”

**(Albert Einstein)**

“Adalah baik untuk merayakan kesuksesan, tapi hal yang lebih penting adalah untuk mengambil pelajaran dari kegagalan”

**(Bill Gates)**

“Tujuan dari belajar adalah terus tumbuh. Akal tidak sama dengan tubuh, akal terus bertumbuh selama kita hidup”

**(Mortimer Adler)**

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

nama : Yulia Setyaningrum

NIM : 161910201007

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* pada Trafo 60 MVA 150/20 kV dan Penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran Berbasis *Particle Swarm Optimization*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada industri manapun dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta mendapatkan sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 19 Oktober 2020

Yang menyatakan,

Yulia Setyaningrum  
NIM 161910201007

**SKRIPSI**

**OPTIMASI KOORDINASI *OVER CURRENT RELAY* PADA TRAFO 60  
MVA 150/20 KV DAN PENYULANG 20 KV GUMUL GARDU INDUK  
BANARAN BERBASIS *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Oleh

Yulia Setyaningrum

NIM 161910201007

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Andi Setiawan, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul "**Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* pada Trafo 60 MVA 150/20 kV dan Penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran Berbasis *Particle Swarm Optimization***" karya Yulia Setyaningrum telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Rabu, 2 Desember 2020

tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,



Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.  
NIP 197004041996011001

Anggota I,



Andi Setiawan, S.T., M.T.  
NIP 196910101997021001

Anggota II,



H.R.B. Moch Gozali, S.T., M.T.  
NIP 196906081999031002

Anggota III,



H. Samsul Bachri M., S.T., M.MT.  
NIP 196403171998021001

Mengesahkan  
Dekan,



  
Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.  
NIP 1970082619970210011

## RINGKASAN

**Optimasi Koordinasi *Over Current Relay* Pada Trafo 60 MVA 150/20 kV dan Penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran Berbasis *Particle Swarm Optimization***; Yulia Setyaningrum, 161910201007; 2020; 97 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada Gardu Induk Banaran Trafo 60 MVA 150/20 kV permasalahan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat terkadang menyebabkan Penyulang Gumul 20 kV mengalami pemadaman, sehingga pengaman *incoming* trafo juga terkena gangguan. Hal tersebut dikarenakan koordinasi *over current relay* yang kurang selektif dalam mengisolasi gangguan yang menyebabkan antar rele tidak *overlapping* (tidak tumpang tindih). Oleh karena itu untuk meningkatkan kinerja koordinasi OCR perlu dilakukan *setting* OCR yang optimal dengan menggunakan metode PSO. Tujuan penelitian untuk mengetahui perbandingan hasil optimasi TMS pada metode PSO dengan metode konvensional. Hasil penelitian ini diharapkan PSO menghasilkan *setting* OCR yang optimal agar antar rele dapat terkoordinasi cukup selektif.

Penelitian dilakukan dua tahap percobaan, sebelum melakukan percobaan tersebut dilakukan simulasi Etap 12.6 terlebih dahulu untuk memperoleh arus gangguan hubung singkat pada tiap titik lokasi gangguan. Percobaan pertama menggunakan metode konvensional, yaitu perhitungan *setting* OCR pada TMS dan PSM di rele penyulang Gumul dan rele *incoming* trafo untuk memperoleh waktu operasi rele. Kemudian percobaan kedua menggunakan metode PSO, yaitu mencari TMS yang optimal pada rele penyulang untuk menghasilkan waktu operasi rele yang minimum.

Perbandingan TMS penyulang perhitungan konvensional dan PSO diperoleh hasil PSO memiliki TMS sebesar 0.1197 s sedangkan hasil konvensional memiliki TMS sebesar 0.1453 s. Maka dapat dibandingkan bahwa waktu operasi rele hasil PSO sebesar 0.2471 s lebih cepat daripada waktu operasi rele hasil konvensional sebesar 0.300 s. Sedangkan perbandingan CTI (*Coordination Time Interval*) antara konvensional dan PSO yaitu nilai CTI pada PSO sebesar 0.3529 s, pada konvensional nilai CTI sebesar 0.300 s. Pada Jarak lokasi gangguan mempengaruhi waktu operasi rele dan CTI. Jadi semakin panjang jarak lokasi gangguan, semakin besar nilai waktu operasi rele dan CTI.

Hasil *setting* OCR menggunakan PSO menghasilkan TMS yang optimal sebesar 0.1197 s dengan waktu operasi rele OCR penyulang cukup cepat yang menghasilkan CTI yang semakin meningkat. Sehingga menghasilkan koordinasi OCR antar rele penyulang dengan rele *incoming* dapat bekerja cukup selektif dengan mengisolasi gangguan secara tepat.



## SUMMARY

**Optimization of Over Current Relay Coordination on 60 MVA 150/20 kV Transformers and 20 kV Gumul Feeders at Banaran Substation Based on Particle Swarm Optimization;** Yulia Setyaningrum, 161910201007; 2020; 97 pages; Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

At Banaran Transformer Substation 60 MVA 150/20 kV, the problem that often occurs is short circuit fault. Short circuit interruption sometimes causes the 20 kV Gumul Feeder to go out, so that the safety of the incoming transformer is also affected. This is because the overcurrent coordination between relays is not selective in isolating the disturbance which causes the relays not to overlap (not overlapping). Therefore, to improve the performance of OCR coordination, it is necessary to set optimal OCR using the PSO method. The research objective was to compare the results of TMS optimization on the PSO method with conventional methods. The results of this study are expected that the PSO will produce an optimal OCR setting so that inter-relays can be coordinated quite selectively.

The research was conducted in two stages of experiment, before carrying out the experiment, a simulation of Etap 12.6 was conducted to obtain short circuit fault currents at each fault location point. The first experiment used conventional methods, namely the calculation of the OCR setting on the TMS and PSM on the Gumul feeder relay and the relay incoming transformer to obtain the relay operation time. Then the second experiment uses the PSO method, which is looking for the optimal TMS on the feeder relay to produce a minimum relay operating time.

Comparison of conventional calculation feeder TMS and PSO results obtained that the PSO has a TMS of 0.1197 s, while the conventional results have a TMS of 0.1453 s. So it can be compared that the operation time of the PSO result relay is 0.2471 s faster than the conventional result relay operating time of 0.300 s. Meanwhile, the comparison of CTI (Coordination Time Interval) between conventional and PSO is that the CTI value for the PSO is 0.3529 s, in conventional the CTI value is 0.300 s. The distance to the location of the disturbance affects the operation time of the relay and the CTI. So the longer the distance to the location of the fault, the greater the value of the relay operation time and the CTI.

The results of the OCR setting using PSO resulted in an optimal TMS of 0.1197 s with the feeder OCR relay operating time quite fast which resulted in an increasing CTI. This results in OCR coordination between feeder relays and incoming relays that can work quite selectively by isolating disturbances appropriately.

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “ **Optimasi Koordinasi Over Current Relay Pada Trafo 60 MVA 150/20 kV dan Penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran Berbasis Particle Swarm Optimization**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember dan memperoleh gelar sarjana. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dalam proses penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dr. Bambang Sri Kalolo, S.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T, M.T selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Andi Setiawan, S.T, M.T selaku Dosen Pembimbing Anggota yang dengan sabar telah memberikan saran, masukan serta bimbinganya;
4. Bapak H.R.B. Moch Gozali, S.T., M.T. dan Bapak H. Samsul Bachri M., S.T., M.MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran untuk memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini;
5. Bapak Andi Prasetyo dan Mas Rio selaku pembimbing lapangan penulis selama penelitian di ULTG Kediri;
6. Bapak Puji Suprianto selaku pembimbing lapangan penulis selama penelitian di UP3 Kediri;
7. Keluarga Besar INDUKTRO ( Ikatan Dulur Elektro 2016) atas kebersamaanya dan dukungannya;
8. Teman-teman seperjuangan yang telah banyak memberikan masukan serta mengenalkan banyak hal yang baik, sukses selalu kawan-kawan.

Besar harapan penulis agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak jikapun ada kekurangan, saran serta kritik dari seluruh pembaca. Terima kasih.

Jember, 19 Oktober 2020

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL .....	i
HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	iii
HALAMAN MOTO .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN .....	v
HALAMAN PEMBIMBING .....	vi
HALAMAN PENGESAHAN .....	vii
RINGKASAN .....	viii
<i>SUMMARY</i> .....	ix
PRAKATA .....	x
DAFTAR ISI .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Manfaat</b> .....	<b>3</b>
<b>1.6 Sistematika Pembahasan</b> .....	<b>4</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Reduksi Kron</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3 Gangguan Hubung Singkat</b> .....	<b>7</b>
<b>2.4 <i>Over Current Relay (OCR)</i></b> .....	<b>8</b>
2.4.1 Jenis OCR Berdasarkan Karakteristik Waktu .....	9
2.4.2 <i>Setting Over Current Relay</i> .....	10
<b>2.5 Koordinasi Proteksi</b> .....	<b>11</b>

2.6 Metode Optimasi .....	14
2.6.1 <i>Partical Swarm Optimization</i> .....	15
2.7 <b>Setting Relay Menggunakan PSO</b> .....	17
2.7.1 Karakteristik Rele .....	18
2.7.2 Batasan Waktu Rele Beroperasi .....	18
2.7.3 Kriteria Waktu Interval Koordinasi Rele .....	18
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	19
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	19
3.2 Tahap Penelitian .....	19
3.3 Alat dan Bahan .....	20
3.4 Diagram Alir Penelitian .....	25
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	29
4.1 Pemodelan <i>Single Line Diagram Jaringan Listrik</i> .....	29
4.2 Simulasi Arus Gangguan Hubung Singkat .....	29
4.3 Perhitungan <i>Setting Over Current Relay</i> .....	31
4.3.1 Perhitungan <i>Setting</i> OCR di Sisi Penyulang Gumul .....	31
4.3.2 Perhitungan <i>Setting</i> OCR di Sisi <i>Incoming</i> Trafo .....	32
4.4 Perhitungan Waktu Operasi Rele OCR .....	35
4.4.1 Perhitungan Waktu Operasi Rele (t) OCR Pada Penyulang Gumul .....	35
4.4.2 Perhitungan Waktu Operasi Rele (t) OCR Pada <i>Incoming</i> Trafo .....	36
4.4.3 Koordinasi OCR Sebelum Menggunakan <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	38
4.5 <i>Setting</i> OCR Menggunakan Metode <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	39
4.5.1 Perumusan Masalah .....	40
4.5.2 Inialisasi Parameter PSO .....	40
4.5.3 Inialisasi Kecepatan .....	41
4.5.4 Inialisasi Posisi dan Kecepatan Awal .....	41
4.5.5 Evaluasi Nilai <i>Fitness</i> Partikel .....	42

4.5.6 Inisialisasi Posisi Terbaik lokal dan Global.....	42
4.5.7 <i>Update</i> Kecepatan dan Posisi Partikel .....	43
4.5.8 Pembatasan Pergerakan Partikel.....	44
4.5.9 Hasil dan Analisa <i>Setting</i> OCR dengan Menggunakan <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	45
4.6 Perbandingan Koordinasi OCR Antara Konvensional dengan PSO .....	51
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	<b>54</b>
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	<b>54</b>
<b>5.2 Saran</b> .....	<b>55</b>

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Matriks admitansi sistem ..... 7

Gambar 2. 2 Matriks admitansi setelah direduksi ..... 7

Gambar 2. 3 Kurva karakteristik waktu operasi rele (t)..... 10

Gambar 2. 4 Koordinasi antara trafo dan penyulang ..... 12

Gambar 3.1 *Single Line* Diagram Transmisi Gardu Induk Banaran PT. PLN (Persero) UIT JBTB UPT Madiun ULTG Kediri ..... 22

Gambar 3. 2 *Single Line* Diagram Penyulang Gumul 20 kV PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Kediri..... 23

Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian ..... 25

Gambar 4. 1 Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa di setiap lokasi gangguan..... 30

Gambar 4. 2 *Plug Setting Multiplier* (PSM) dan TMS ( *Time Multiplier Setting*) di setiap lokasi gangguan..... 34

Gambar 4. 3 Waktu operasi rele (t) menggunakan konvensional ..... 37

Gambar 4.4 CTI (*Coordination Time Interval*) pada OCR menggunakan konvensional ..... 39

Gambar 4. 5 Grafik hasil akhir iterasi dengan *BestCost* pada *Particel Swarm Optimization*..... 47

Gambar 4. 6 Grafik perbandingan waktu operasi rele (t) konvensional dan PSO 49

Gambar 4. 7 CTI (*Coordination Time Interval*) pada OCR menggunakan PSO . 50

Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan CTI (*Coordination Time Interval*) konvensional dengan PSO..... 51

**DAFTAR TABEL**

Tabel 3. 1 Spesifikasi transformator .....	24
Tabel 3. 2 Spesifikasi OCR ( <i>Over Current Relay</i> ).....	24
Tabel 3. 3 Data Penyulang Gumul 20 kV .....	24
Tabel 3. 4 Data impedansi tahanan (R) dan reaktansi ( $X_L$ ) penghantar A3C tegangan 20 kV .....	24
Tabel 4.1 Arus gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa di setiap lokasi gangguan .....	30
Tabel 4. 2 <i>Plug Setting Multiplier</i> (PSM) dan TMS ( <i>Time Multiplier Setting</i> ) di setiap lokasi gangguan .....	34
Tabel 4. 3 Waktu operasi rele (t) menggunakan konvensional .....	36
Tabel 4. 4 CTI ( <i>Coordination Time Interval</i> ) pada OCR menggunakan konvensional.....	38
Tabel 4. 5 Parameter PSO .....	45
Tabel 4. 6 <i>Fitness</i> minimum hasil iterasi .....	46
Tabel 4. 7 Hasil perbandingan waktu operasi rele konvensional dengan PSO .....	48
Tabel 4. 8 CTI ( <i>Coordination Time Interval</i> ) pada OCR menggunakan PSO .....	50
Tabel 4. 9 Perbandingan CTI ( <i>Coordination Time Interval</i> ) hasil konvensional dengan hasil PSO .....	51



**DAFTAR LAMPIRAN**

1. <i>Single line</i> diagram etap 12.6 .....	54
2. Etap 12.6 <i>report</i> arus hubung singkat .....	55
3. <i>Listing</i> program.....	56
4. Perhitungan <i>Plug Setting Multiplier</i> (PSM) OCR penyulang .....	60
5. Perhitungan <i>Plug Setting Multiplier</i> (PSM) OCR <i>incoming</i> trafo.....	62
6. Perhitungan waktu operasi OCR penyulang konvensional TMS 0.1453 s ..	64
7. Perhitungan waktu operasi OCR <i>incoming</i> trafo konvensional.....	66
8. Perhitungan CTI sebelum menggunakan PSO .....	68
9. Perhitungan waktu operasi OCR penyulang PSO TMS 0.1197 s.....	70
10. Perhitungan CTI menggunakan PSO .....	72
11. Grafik karakteristik <i>standard invers</i> pada OCR .....	74
12. Data gardu penyulang gumul.....	75

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan salah satu bagian terpenting dalam penyaluran tenaga listrik. Salah satu komponen penting pada sistem transmisi yaitu sistem proteksi yang berfungsi untuk melindungi sistem dari berbagai gangguan. Salah satu jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat. Gangguan tersebut menyebabkan kerusakan berbagai peralatan listrik, stabilitas daya akan berkurang dan mengganggu kontinuitas pelayanan listrik untuk konsumen karena harus dilakukan pemadaman listrik. Agar gangguan tidak menyebar luas pada daerah yang masih normal maka diperlukan perlindungan berupa pemasangan rele proteksi.

*Over current relay* (OCR) merupakan rele yang berfungsi untuk mendeteksi arus lebih pada gangguan hubung singkat fasa-fasa. Prinsip kerja OCR adalah rele akan mengirim perintah *trip* (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) setelah tunda waktu yang ditentukan oleh rele. OCR banyak dipasang pada sistem proteksi dikarenakan memiliki konstruksi sederhana dengan harga relatif murah. Oleh karena itu, *Over current relay* hanya digunakan pada sistem yang sederhana.

Pada Gardu Induk Banaran Trafo 60 MVA 150/20 kV permasalahan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat terkadang menyebabkan Penyulang Gumul 20 kV mengalami pemadaman, sehingga pengaman *incoming* trafo juga terkena gangguan. Hal tersebut dikarenakan koordinasi *overcurrent* antar rele yang kurang selektif dalam mengisolasi gangguan yang menyebabkan antar rele tidak *overlapping* (tidak tumpang tindih). Padahal Gardu Induk Banaran trafo 60 MVA 150/20 kV tersebut memiliki peran sangat penting dalam penyaluran energi listrik ke jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV berguna untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Oleh karena itu perlu dilakukan *setting* OCR yang optimal upaya untuk meningkatkan kinerja dari koordinasi OCR dari gangguan hubung singkat.

Ada beberapa penelitian menggunakan PSO sebagai teknik optimasi diantaranya “Simulasi Optimasi Daya Reaktif dan Tegangan Pada Sistem Jamali 500 kV Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization*” (Fahnani, Yuningtyastuti, & Handoko, 2013), pada penelitian tersebut membuktikan bahwa hasil simulasi optimasi PSO daya reaktif dapat mengurangi rugi daya aktif. Kelebihan utama algoritma PSO adalah mempunyai konsep sederhana, mudah diimplementasikan dan efisien dalam perhitungan. Teknik optimasi cerdas seperti yang dimiliki PSO dapat menyesuaikan pengaturan rele. Pada penelitian ini membahas tentang optimasi koordinasi *over current relay* pada trafo 60 MVA 150/20 kV dan penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran dengan menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO). Diharapkan dengan menggunakan metode PSO ini dapat menghasilkan *setting* OCR yang optimal agar antar rele dapat terkoordinasi secara selektif.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dapat diambil beberapa pokok permasalahan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menentukan optimasi koordinasi *over current relay* pada trafo 60 MVA 150/20 kV dan penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran dengan menggunakan metode *particle swarm optimization* ?
2. Bagaimana perbandingan antara hasil optimasi TMS (*Time Multiplier Setting*) OCR menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) dengan metode konvensional?

### 1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah diatas, adapun ruang lingkup yang akan dibatasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Transformator daya yang dijadikan objek dalam penelitian ini adalah trafo 5 TELK 60 MVA 150/20 kV di PT. PLN (Persero) UIT JBTB UPT Madiun ULTG Kediri dan Penyulang Gumul 20 kV PT. PLN Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Kediri.
2. Koordinasi antara OCR *incoming* trafo 5 Telk 60 MVA 150/20 kV dan OCR penyulang 20 kV Gumul.
3. Data yang digunakan yaitu *single line* diagram, impedansi, data konduktor saluran, data beban, data CT, spesifikasi transformator dan spesifikasi rele.
4. Pembahasan hanya pada penyulang Gumul 20 kV cukup di jaringan saluran udara tegangan menengah (SUTM).
5. Gangguan yang dibahas adalah gangguan hubung singkat 3 fasa dan 2 fasa.
6. Hanya membahas tentang *setting over current relay*.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang diuraikan, maka dapat dirumuskan beberapa tujuan utama dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui optimasi koordinasi *over current relay* pada trafo 60 MVA 150/20 kV dan penyulang 20 kV Gumul Gardu Induk Banaran dengan menggunakan metode *particle swarm optimization*.
2. Mengetahui perbandingan hasil optimasi TMS (*Time Multiplier Setting*) OCR menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) dengan metode konvensional.

### 1.5 Manfaat

Optimasi koordinasi *over current relay* pada trafo 60 MVA 150/20 kV dan penyulang 20 kV Gumul berbasis *particle swarm optimization* diharapkan dapat meningkatkan kinerja dari koordinasi OCR. Hasil koordinasi tersebut diperoleh dengan penentuan nilai *setting* TMS yang optimal pada OCR penyulang untuk

meminimalkan waktu operasi rele (t) agar mencegah dampak dari gangguan hubung singkat supaya tidak meluas, tidak *overlap* dan tidak menyebabkan pemadaman. Seperti yang telah diuraikan pada latar belakang yaitu perlu dilakukan *setting* OCR yang optimal. Tujuan dari latar belakang tersebut untuk mempertimbangkan selektivitas kerja dari OCR agar antar rele dapat mengisolasi gangguan secara tepat.

### **1.6 Sistematika Pembahasan**

Secara garis besar penyusunan laporan skripsi ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat, dan sistematika pembahasan.

#### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tentang penjelasan atau teori yang ada tentang pendapat penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

#### **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

Berisi tentang penjelasan metode kajian yang digunakan dalam menyelesaikan skripsi ini.

#### **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Tentang hasil penelitian yang dilakukan dan hasil analisis dari penelitian tersebut.

#### **BAB 5. PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dilakukan kepada peralatan-peralatan listrik yang terpasang pada suatu sistem tenaga misalnya generator, transformator, jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri. Kondisi abnormal itu dapat berupa hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah dan lain-lain.

Elemen-elemen yang membentuk suatu sistem proteksi yaitu CT/PT, rele pengaman, PMT, *power supply* dan pengawatan. Tujuan utama sistem proteksi adalah sebagai berikut :

1. Mendeteksi kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik
2. Memerintahkan *trip* pada PMT dan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem yang sehat, sehingga sistem dapat terus berfungsi.

Sistem proteksi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut (PT.PLN (Persero), 2013):

1. Sensitif

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi sekecil apapun gangguan dan beroperasi dibawah nilai minimum gangguan. Studi koordinasi sistem harus dilakukan untuk menentukan sensitivitas *setting* dan memastikan rele bekerja dengan benar.

2. Handal

Kemungkinan suatu sistem proteksi dapat bekerja benar sesuai fungsi yang diinginkan dalam kondisi dan jangka waktu tertentu (IEV 448-12-05). Proteksi diharapkan bekerja pada saat kondisi yang diharapkan terpenuhi dan tidak boleh bekerja pada kondisi yang tidak diharapkan (SPLN T5.0021: 2010).

Kehandalan sistem proteksi terbagi menjadi dua yaitu keterpercayaan dan keterjaminan.

- Keterpercayaan adalah kepastian suatu sistem proteksi tidak mengalami gagal kerja pada kondisi yang diperlukan dalam jangka waktu tertentu. Keterpercayaan dapat diperoleh dengan proteksi

utama/proteksi cadangan untuk mengantisipasi kegagalan proteksi utama.

- Keterjaminan adalah kepastian suatu sistem proteksi tidak mengalami kesalahan kerja pada kondisi yang ditentukan dalam jangka waktu tertentu.

### 3. Cepat

Elemen sistem proteksi harus mampu memberikan respon yang untuk meminimalisasi terjadinya gangguan meluas. Desain sistem proteksi harus mempertimbangkan kecepatan pemutusan gangguan untuk memisahkan sumber gangguan.

### 4. Selektif

Sistem proteksi harus mampu menentukan daerah kerjanya yang terganggu secara tepat. Peralatan dan sistem proteksi hanya memisahkan bagian dari jaringan yang sedang terganggu.

## 2.2 Reduksi Kron

Eliminasi variabel identik dengan jaringan saat reduksi mengarah ke urutan ekuivalen jaringan dengan urutan reduksi eliminasi node pada setiap langkah. Pada saat menggunakan bus sistem dengan selektif, dapat menerapkan eliminasi gaussian dari seluruh sistem sehingga dapat mengurangi Ybus. Matriks koefisien dalam rangkaian persamaan *reduced order* kemudian mewakili Ybus untuk jaringan ekuivalen yang hanya berisi bus yang harus dipertahankan. Semua bus dihilangkan dalam pengertian matematis bahwa tegangan pada bus dan diinjeksi arusnya tidak tampak secara eksplisit. Pengukuran ukuran seperangkat persamaan tersebut menyebabkan efisiensi perhitungan dan membantu untuk lebih fokus secara langsung pada porsi keseluruhan jaringan yang menjadi kepentingan utama (Grainger & Stevenson, Jr. , 1994). Berikut adalah contoh dari eliminasi Ybus (matrik admitansi).

$$\begin{matrix}
 & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{1} & Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\
 \textcircled{2} & Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\
 \textcircled{3} & Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\
 \textcircled{4} & Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44}
 \end{matrix}
 \begin{bmatrix}
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4
 \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 1 Matriks admitansi sistem  
 Sumber : ( Grainger & Stevenson, Jr. , 1994)

Dari matriks diatas akan mengeliminasi node 1, sehingga matriks admitansi menjadi 3x3.

$$\begin{matrix}
 & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{2} & Y_{22}^{(1)} & Y_{23}^{(1)} & Y_{24}^{(1)} \\
 \textcircled{3} & Y_{32}^{(1)} & Y_{33}^{(1)} & Y_{34}^{(1)} \\
 \textcircled{4} & Y_{42}^{(1)} & Y_{43}^{(1)} & Y_{44}^{(1)}
 \end{matrix}
 \begin{bmatrix}
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4
 \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 2 Matriks admitansi setelah direduksi  
 Sumber : ( Grainger & Stevenson, Jr. , 1994)

Untuk mengitung elemen-elemen bus yang baru direduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp} Y_{pk}}{Y_{pp}} \dots\dots\dots(2.1)$$

*j* merupakan kolom, *p* merupakan jumlah bus, sedangkan pada *k* merupakan jumlah baris. Dalam menentukan reduksi matriks menggunakan kron reduksi tentu saja harus menentukan bus admitansi sistem awal terlebih dahulu.

**2.3 Gangguan Hubung Singkat**

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan diakibatkan dari timbulnya arus yang jauh lebih besar dari pada arus normal. Sistem tenaga sangat rentan dengan kerusakan peralatan akibat suatu gangguan hubung singkat, baik yang bersifat temporer seperti penghantar udara terkena ranting patah atau layang-layang. Juga yang bersifat permanen seperti kawat penghantar yang putus dan petir. Gangguan



hubung singkat dapat diklasifikasikan berdasarkan kesimetrisannya antara lain :

1. Gangguan Asimetris (tidak simetris)

Gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari:

- a) Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah
- b) Gangguan hubung singkat dua fasa atau fasa-fasa
- c) Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

2. Gangguan Simetris

Gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari gangguan hubung singkat tiga fasa dan gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.

#### 2.4 Over Current Relay (OCR)

OCR (*Over Current Relay*) adalah rele arus lebih untuk mendeteksi gangguan hubung singkat fasa-fasa. Prinsip kerja OCR adalah rele akan bekerja bila arus gangguan yang mengalir melebihi nilai arus *setting* (Iset) kemudian memberikan perintah *trip* ke PMT atau CB untuk melepas gangguan atau mengisolasi gangguan yang sesuai dengan karakteristik waktunya. OCR diseting lebih besar dari kemampuan arus beban maksimum peralatan agar rele tidak bekerja pada arus beban maksimum dan dapat bekerja pada gangguan arus hubung singkat yang minimum. OCR dapat digunakan sebagai rele primer (utama) ataupun rele *back up* (cadangan).

$I_f > I_{set}$	Rele bekerja
$I_f < I_{set}$	Rele tidak bekerja

Keterangan:

If = Arus gangguan

Iset = Arus *setting*

#### 2.4.1 Jenis OCR Berdasarkan Karakteristik Waktu

Terdapat beberapa macam OCR berdasarkan karakteristik waktu, sebagai berikut (Dewangga, 2015):

1) OCR seketika (*instantaneous*)

Merupakan rele arus lebih yang tidak mempunyai waktu penundaan sehingga rele bekerja sangat singkat. Rele ini bekerja berdasarkan arus gangguan hubung singkat.

2) OCR waktu tertentu (*definite time*)

Merupakan rele yang mempunyai karakteristik waktu tertentu yang di *setting* pada rele yang hanya berdasarkan waktu kerjanya rele tersebut, dan tidak tergantung pada besarnya arus gangguan. Jika arus gangguan telah melebihi arus *setting* berapapun besarnya arus gangguan rele akan bekerja dengan waktu yang tetap.

3) OCR berbanding terbalik (*inverse time*)

Merupakan rele yang memiliki karakteristik waktu arus yang berbanding terbalik. Semakin besar arus gangguan maka waktu beroperasinya akan semakin cepat dan juga berlaku sebaliknya. Pada standar IEEE std 242-2001 terdapat beberapa karakteristik kurva *inverse* yaitu *long time inverse*, *very inverse*, *standard inverse* dan *extreme inverse*.

Adapun karakteristik waktu operasi rele ( $t$ ) *inverse* berdasarkan BS 142 adalah sebagai berikut :

a. *Standard Inverse* :

$$t = \frac{0.14 \times TMS}{PSM^{0.02} - 1}$$

b. *Very Inverse* :

$$t = \frac{13.5 \times TMS}{PSM - 1}$$

c. *Extremely Inverse*

$$t = \frac{80 \times TMS}{PSM^2 - 1}$$

d. *Long Inverse*

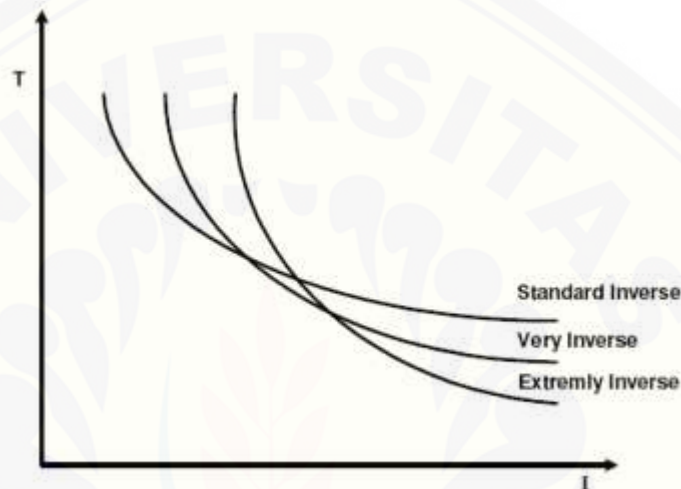
$$t = \frac{120 \times TMS}{PSM - 1}$$

Keterangan :

t = Waktu operasi rele (s)

PSM = *Plug Setting Multiplier*

TMS = *Time Multiplier Setting*



Gambar 2. 3 Kurva karakteristik waktu operasi rele (t)  
Sumber : (Dewangga, 2015)

#### 2.4.2 *Setting Over Current Relay*

Pada OCR terdapat dua parameter *setting* rele yaitu *setting* (PSM) dan *setting* waktu (TMS). Sedangkan arus *setting* atau arus *pick up* ( $I_p$ ) berfungsi sebagai arus maksimum untuk membatasi arus beban maksimum yang ada di peralatan. Sehingga untuk menentukan arus *pick up* ini, arus dari rele harus lebih besar dari arus beban maksimum. Menurut standar *British BS 142 - 1983* batas penyetelannya untuk arus *pick up* OCR adalah :

$$1.05 \times IFLA < I_p < 1.3 \times IFLA \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana IFLA merupakan arus beban maksimum dari peralatan.

PSM (*Plug Setting Multiplier*) adalah *setting* terhadap arus gangguan dan arus *pick up* rele yang diatur sedemikian sehingga rele tidak beroperasi untuk arus beban maksimum (IFLA) tetapi beroperasi untuk arus gangguan hubung singkat minimum (Asadi, Kouhsari, Member, & IEEE, 2009).

PSM dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut (Lakshmi, Ragul Deepak Narayanasamy, Banerjee, & Gnana Swathika, 2019) :

$$\text{PSM} = \frac{I_f}{I_p} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

$I_f$  = Arus gangguan hubung singkat (Ampere)

$I_p$  = Arus *pick up* rele (Ampere)

TMS (*Time Setting Multiplier*) berfungsi *setting* waktu sebagai penentu waktu operasi rele (t). Untuk menentukan TMS pada *setting* OCR dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{TMS} = \frac{(\text{PSM})^{\gamma-1}}{\lambda} \times t \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

TMS = *Time Multiplier Setting*

t = Waktu operasi rele (s)

PSM = *Plug Setting Multiplier*

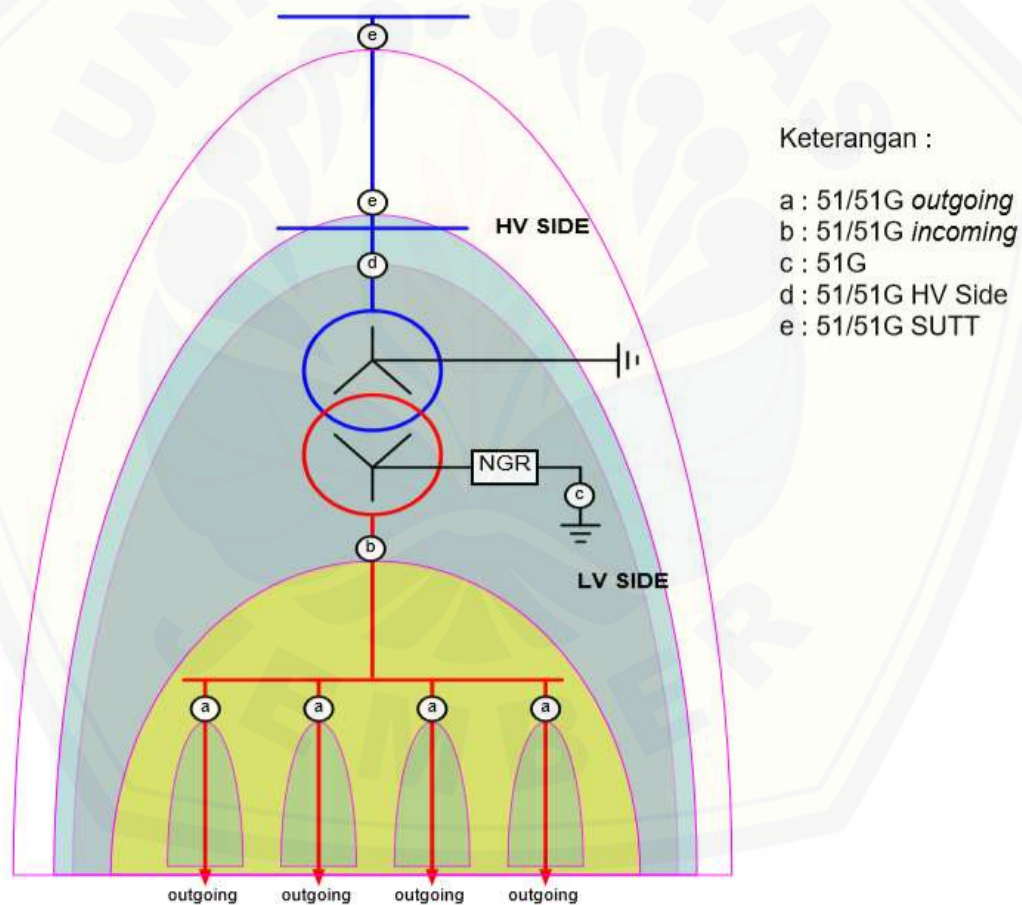
$\lambda$  = Koefisien karakteristik waktu

$\gamma$  = Koefisien karakteristik waktu

## 2.5 Koordinasi Proteksi

Filosofi pemasangan rele cadangan (*back up*) adalah untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat gangguan luar (gangguan eksternal). Gangguan eksternal pada trafo tidak dapat diisolasi oleh rele utama. Sehingga perlu dipasang rele lain yang bisa mengamankan trafo dari kerusakan. Pada trafo OCR dipilih sebagai rele cadangan. Jadi OCR pada transformator hanya berfungsi sebagai rele *back up* (rele cadangan) bagi *outgoing feeder* (penyulang) yang sebagai rele primer (rele utama) terhadap gangguan hubung singkat.

Tujuan dari koordinasi *over current relay* (OCR) adalah untuk menentukan karakteristik, urutan rele, dan *setting* OCR yang meminimalkan kerusakan dan gangguan peralatan korsleting secepat mungkin. Koordinasi OCR ini umumnya diterapkan jika terjadi kondisi gangguan hubung singkat, hanya sebagian kecil dari sistem tenaga yang terganggu. Sebuah studi koordinasi OCR adalah perbandingan dan pemilihan waktu operasi rele yang mencapai tujuan sistem proteksi di bawah sistem abnormal kondisi. Studi ini harus mencakup semua perangkat dari peralatan pemanfaatan hingga sumbernya (IEEE, 2001).



Gambar 2. 4 Koordinasi antara trafo dan penyulang  
Sumber : (PT.PLN (Persero), 2013)

Perangkat proteksi diterapkan ke sistem tenaga listrik sebagai rele primer dan *back up*. Pada dasarnya rele primer diatur untuk beroperasi lebih cepat dengan bekerja terlebih dahulu jika terjadi gangguan. Rele *back up* mengambil alih saat rele primer gagal beroperasi pada saat ada gangguan. Rele *back up* dipilih untuk beroperasi di beberapa yang telah ditentukan sebelumnya interval waktu setelah perangkat utama beroperasi. Dengan demikian rele *back up* harus mampu menahan kondisi gangguan untuk jangka waktu yang lebih lama dari perangkat rele utama agar dapat mengisolasi gangguan.

Koordinasi rele sangat mempertimbangkan urutan *trip* rele primer dan *back up*. Dalam urutan *trip* terdapat waktu tunda/*delay* agar tidak terjadi *malfunction* yaitu *trip* secara bersamaan. Waktu penundaan tersebut dikenal sebagai CTI (*Coordination Time Interval*) yang merupakan interval waktu operasi antara waktu operasi rele primer dan waktu operasi rele *back up*. Koordinasi harus mempertahankan interval waktu untuk memastikan rele dapat beroperasi secara selektif dengan benar agar tidak *overlapping* sehingga mengurangi *trip* gangguan. Tanpa CTI yang memadai, perangkat proteksi ini dapat *trip* secara tidak benar.

*Setting* arus lebih digunakan untuk mengkoordinasikan antara rele *primer* dan rele *back up* agar dapat beroperasi secara sensitivitas dan selektivitas dalam proteksi arus lebih. Prinsip waktu *setting* arus lebih adalah bahwa rele diterapkan dengan tepat di terminal zona, dan setiap rele kemudian diberi *setting pick up* dan *delay* waktu. *Pick up* menetapkan sensitivitas rele untuk menentukan kepekaan rele. *Setting* waktu pada *delay* waktu digunakan agar rele *back up* dapat beroperasi secara selektif. Rele yang paling dekat dengan gangguan memiliki *setting* waktu yang menghasilkan waktu operasi rele lebih cepat daripada rele yang lebih jauh. Oleh karena itu, rele primer yang paling dekat dengan gangguan akan *trip* terlebih dahulu, sementara rele *back up* yang lebih jauh menunggu, tetapi jika rele primer gagal beroperasi, rele *back up* akan beroperasi dengan memerintahkan *trip* ke pemutus sirkuit

Koordinasi selektif umumnya dicapai dengan menggunakan margin waktu antara *setting* rele dengan memperhitungkan tiga faktor sebagai berikut:

- Waktu operasi membuka *circuit breakers*. Pemutus tegangan menengah

modern dinilai untuk 5 siklus penundaan waktu, dan penyisihan waktu biasanya 0.08 detik.

- *Overtravel* merupakan dorongan rele untuk melanjutkan ke waktu setelah *circuit breakers* hilir melepaskan arus gangguan. *Overtravel* biasanya memiliki waktu 0.1 detik.
- Margin untuk memperhitungkan hal-hal yang tidak dapat dibayangkan seperti ketidakpastian dalam besaran arus gangguan, ketidakakuratan dalam trafo instrumen atau yang disebut toleransi dan *setting errors*. Nilai yang dimiliki berkisar dari 0.1 sampai 0.3 detik.

Tabel 2. 1 *Clearing Time Interval Relay*

Komponen	Elektromekanik
<i>Circuit breaker opening time (5 cycle)</i>	0.08 s
<i>Relay overtravel</i>	0.10 s
<i>Relay tolerance and setting errors</i>	0.12 s
<b>Total CTI</b>	<b>0.30 s</b>

Standar CTI *over current relay* berdasarkan IEEE 242 2001 pada umumnya berkisar antara 0.3 s - 0.4 s saat mengkoordinasikan OCR induksi rele satu sama lain. Koordinasi rele primer dan rele *back up* didefinisikan sebagai berikut (Boucekara, Zellagui, & Abido, 2017):

$$T_{back\ up} - T_{primer} \geq CTI \text{ (Coordination Time Interval) } \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada koordinasi terdapat koordinasi rele waktu dan arus (*Time and current grading*) dengan memilih karakteristik waktu rele, bahkan dengan hanya memilih PSM yang berbeda dengan *setting* TMS yang sama, maka akan diperoleh waktu operasi rele (t) yang berbeda.

## 2.6 Metode Optimasi

Pengaplikasian metode optimasi pada pemodelan sistem koordinasi OCR jaringan listrik bertujuan untuk mencari nilai optimum *setting* waktu pada OCR. Dengan memasukkan batasan parameter-parameter perhitungan *setting* OCR pada metode optimasi, kemudian metode optimasi mencari nilai yang paling optimum dari semua iterasi perhitungan. Dengan menggunakan metode optimasi diharapkan

akan menentukan *setting* waktu OCR yang optimum.

### 2.6.1 *Partical Swarm Optimization*

*Algoritma Particle Swarm Optimization* (PSO) didasarkan pada perilaku sosial sekawanan burung atau ikan. Seekor hewan dalam algoritma PSO akan dianggap sebagai partikel. Partikel ini akan dipengaruhi oleh perilaku individu hewan itu sendiri dan perilaku dari partikel lain dalam satu kelompok. Apabila satu partikel menemukan jalan yang tepat dan terpendek menuju ke suatu sumber makanan, maka yang terjadi adalah partikel-partikel lain tersebut akan mengikuti partikel yang telah menemukan jalan yang tepat dan terpendek tadi. Setiap partikel melakukan pencarian solusi yang optimum dengan melintasi ruang pencarian. Hal ini dilakukan dengan cara setiap partikel melakukan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari partikel tersebut (*local best*) dan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari seluruh kawanan (*global best*). Masing-masing partikel diberi fungsi objektif yang sesuai untuk menyelesaikan suatu permasalahan.

Beberapa istilah umum yang digunakan dalam PSO dapat didefinisikan sebagai berikut:

1. *Swarm* : Populasi dari suatu algoritma
2. *Particle* : Anggota (individu) pada suatu *swarm*. Setiap *particle* mempresentasikan suatu solusi yang potensial pada permasalahan yang diselesaikan. Posisi dari suatu *particle* adalah ditentukan oleh representasi solusi saat itu.
3. *Pbest (Personal Best)* : posisi *Pbest* suatu *particle* yang menunjukkan posisi *particle* yang dipersiapkan untuk mendapatkan suatu solusi yang terbaik.
4. *Gbest (Global Best)* : posisi terbaik *particle* pada *swarm* atau posisi terbaik diantara *Pbest* yang ada.
5. *Velocity* (kecepatan) : kecepatan atau vektor yang menggerakkan proses optimisasi yang menentukan arah dimana suatu *particle* diperlukan untuk berpindah (*move*) untuk memperbaiki posisinya semula.
6. *Inertia Weight* ( $\theta$ ) : parameter yang digunakan untuk mengontrol dampak dari adanya *velocity* yang diberikan oleh suatu *particle*.



7. *Learning* ( $c_1$  dan  $c_2$ ) : Suatu konstanta untuk menilai kemampuan partikel ( $c_1$ ) dan kemampuan sosial *swarm* ( $c_2$ ) yang menunjukkan bobot dari partikel.

Berikut ini merupakan formulasi matematika yang menggambarkan posisi dan kecepatan partikel pada suatu dimensi ruang tertentu (Santosa, 2011):

$$X_i(t) = x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iN}(t) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$V_i(t) = v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iN}(t) \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

X = Posisi partikel

V = Kecepatan partikel

i = Indeks partikel

t = Iterasi ke-t

N = Ukuran dimensi ruang

Berikut ini merupakan model matematika yang menggambarkan mekanisme *updating* status partikel ( Kheshti, Tekpeti, & Kang , 2016):

$$(V_i^{it+1}) = w^{it} \cdot V_i^{it} + c_1 \cdot r \cdot (Pbest.i - X_i^{it}) + c_2 \cdot r \cdot (Gbest.i - X_i^{it}) \dots\dots(2.8)$$

$$X_i^{it+1} = X_i^{it} + V_i^{it+1} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$w^{it} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{in})it}{it_{max}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

$X_i^{it}$  : Posisi partikel ke-i, iterasi saat ini

$V_i^{it}$  : Kecepatan partikel ke-i, iterasi saat ini

$X_i^{it+1}$  : Posisi partikel ke-i, iterasi selanjutnya maka  $X_i = [X_i^1 \cdot X_i^2 \cdot \dots \cdot X_i^n]$

$V_i^{it+1}$  : Kecepatan partikel ke-i, iterasi selanjutnya maka  $V_i = [V_i^1 \cdot V_i^2 \cdot \dots \cdot V_i^n]$

$c_1$  : Cognitive constant (*learning rate*)

$c_2$  : Social constant (*learning rate*)

r : Nilai random 0 sampai 1

$Pbest.i$  : Posisi terbaik dari partikel ke-i maka  $P_i = [P_i^1 \cdot P_i^2 \cdot \dots \cdot P_i^n]$

$Gbest$  : Posisi terbaik dari seluruh populasi  $G = [G_i^1 \cdot G_i^2 \cdot \dots \cdot G_i^n]$

$w^{it}$  : Koefisien *inertia* iterasi saat ini

$w_{max}$  : Koefisien *inertia* maksimal

$w_{min}$  : Koefisien *inertia* minimal

$it$  : Iterasi yang selalu berubah dari 1, 2, 3.....  $it_{max}$

$it_{max}$  : Nilai iterasi maksimal yang di tentukan

Prosedur PSO dapat dijabarkan dengan langkah-langkah sebagai berikut (Santosa, 2011):

1. Inisialisasi awal pada parameter-parameter PSO yaitu jumlah partikel (jumlah *swarm*), iterasi maksimal, jumlah variabel, batas minimum dan maksimum variabel, *inertia weight* ( $w$ ), *personal leaning coefficient* ( $c1$ ), *global leaning coefficient* ( $c2$ ), kecepatan awal partikel, posisi awal partikel, evaluasi *fitness* setiap partikel,  $Pbest$ ,  $Gbest$ .
2. *Update* kecepatan setiap partikel pada Persamaan 2.8.
3. *Update* posisi setiap partikel pada Persamaan 2.9.
4. Menghitung *fitness* berdasarkan fungsi objektif partikel baru.
5. Tentukan partikel  $Pbest$  terbaik dengan membandingkan posisi sekarang dengan  $Pbest$  dari iterasi sebelumnya , kemudian  $Pbest$  terbaik ditetapkan sebagai  $Gbest$  terbaik. Maka  $Gbest$  terbaik sebagai *fitness* terbaik.
6. Proses iterasi berhenti ketika sudah konvergen, jika posisi semua partikel menuju ke satu nilai yang sama, maka ini disebut konvergen.

### 2.7 Setting Relay Menggunakan PSO

Masalah koordinasi rele dari OCR, dimana fungsi objektif adalah untuk meminimalkan waktu operasi rele primer di penyulang. Melalui dua jenis *setting* rele yaitu *setting* waktu TMS dan *setting* PSM. Fungsi objektif menjadi tujuan utama optimalisasi. Pada tugas akhir ini fungsi objektif nya adalah sebagai berikut (Lakshmi, Ragul Deepak Narayanasamy, Banerjee, & Gnana Swathika, 2019) :

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n t_{opi} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

$t_{opi}$  = Waktu operasi rele primer untuk gangguan pada  $i$

2.7.1 Karakteristik Rele

Karakteristik pada rele adalah *standard inverse relay* dengan koefisien  $\lambda$  adalah 0.14 dan  $\gamma$  adalah 0.02.

$$\alpha = \frac{\lambda}{(PSM)^{\gamma-1}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Adapun untuk memperoleh nilai PSM menggunakan Persamaan 2.3. Sehingga untuk memperoleh fungsi objektif waktu operasi rele ( $t_{opi}$ ) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Min Z = \sum_{i=1}^n \alpha_i * TMS_i \dots\dots\dots(2.13)$$

Jadi TMS (*Time Multiplier Setting*) dihasilkan menggunakan metode PSO.

2.7.2 Batasan Waktu Rele Beroperasi

Adapun untuk mengetahui batasan waktu rele beroperasi sebagai berikut ( Kheshti, Tekpeti, & Kang , 2016) :

$$Min t_{opi} \leq t_{opi} \leq Max t_{opi} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$0.1 \leq TMS \leq 1.1 \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

$Min t_{opi}$  = waktu minimum yang diperlukan untuk operasi rele primer

$Max t_{opi}$  = waktu maksimum yang diperlukan untuk operasi rele primer

2.7.3 Kriteria Waktu Interval Koordinasi Rele

Ada batasan untuk mempertahankan *Coordination Time Interval* (CTI) antara rele. Perbedaan antara waktu operasi dari rele *primer* dan rele *back up* lebih besar dari atau sama dengan CTI seperti dalam persamaan berikut :

$$t_{opib} - t_{opi} \geq CTI \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

$t_{opib}$  = waktu operasi rele *back up* untuk gangguan pada  $i$

$t_{opi}$  = waktu operasi rele *primer* untuk gangguan pada  $i$

CTI = *Coordination Time Interval* ( 0.3 – 0.4 s)

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode pelaksanaan penelitian menjelaskan bagaimana kegiatan penelitian akan dilaksanakan. Metode Pelaksanaan Penelitian meliputi waktu dan tempat kegiatan, ruang lingkup kegiatan, jenis dan sumber data dan metode pengumpulan data.

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat penelitian, pengujian dan analisis dilakukan secara umum dilakukan di:

Tempat : PT. PLN (Persero) UIT JBTB UPT Madiun ULTG Kediri GI Banaran  
dan PT. PLN Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Kediri

Waktu : Januari – Agustus 2020

Adapun pengerjaan penulisan skripsi dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Sistem Tenaga Universitas Jember

Waktu : November 2019 - selesai

#### 3.2 Tahap Penelitian

Langkah-langkah yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Tahap awal dari penelitian ini yaitu mempelajari literatur tentang koordinasi *over current relay* pada trafo dan penyulang serta mempelajari optimasi *setting* OCR menggunakan metode *particle swarm optimization*.

2. Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang digunakan untuk penelitian antara lain *single line* diagram yang digunakan untuk *single line* diagram transmisi Gardu Induk Banaran dan Penyulang Gumul 20 kV. Serta diperlukan spesifikasi trafo, spesifikasi OCR, data konduktor saluran (impedansi, panjang saluran) dan data beban.

### 3. Tahap Pengolahan Data dan Analisis Data

Dalam analisis data menggunakan simulasi *software* ETAP 12.6 untuk mensimulasikan *single line* diagram yang berfungsi untuk mengetahui nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap titik lokasi gangguan. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari *setting* OCR pada TMS PSM di penyulang dan di *incoming* trafo. Setelah memperoleh *setting* rele dengan menggunakan metode konvensional, kemudian mencari nilai *setting* rele pada TMS penyulang menggunakan metode PSO. Hasil optimasi *setting* OCR pada TMS menggunakan *particle swarm optimization* akan dibandingkan dengan menggunakan metode konvensional. Pada metode *particle swarm optimization* menggunakan *software* MATLAB R2013a.

### 4. Tahap Penulisan Laporan

Tahap ini berisi pembahasan hasil dari simulasi dan perhitungan, analisis data hingga pembahasan mengenai rumusan kesimpulan akhir dari penelitian ini.

## 3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian antara lain:

#### 1. *Personal Computer (PC)*

Pada penelitian ini, simulasi dan penulisan laporan dilakukan menggunakan *Personal Computer*.

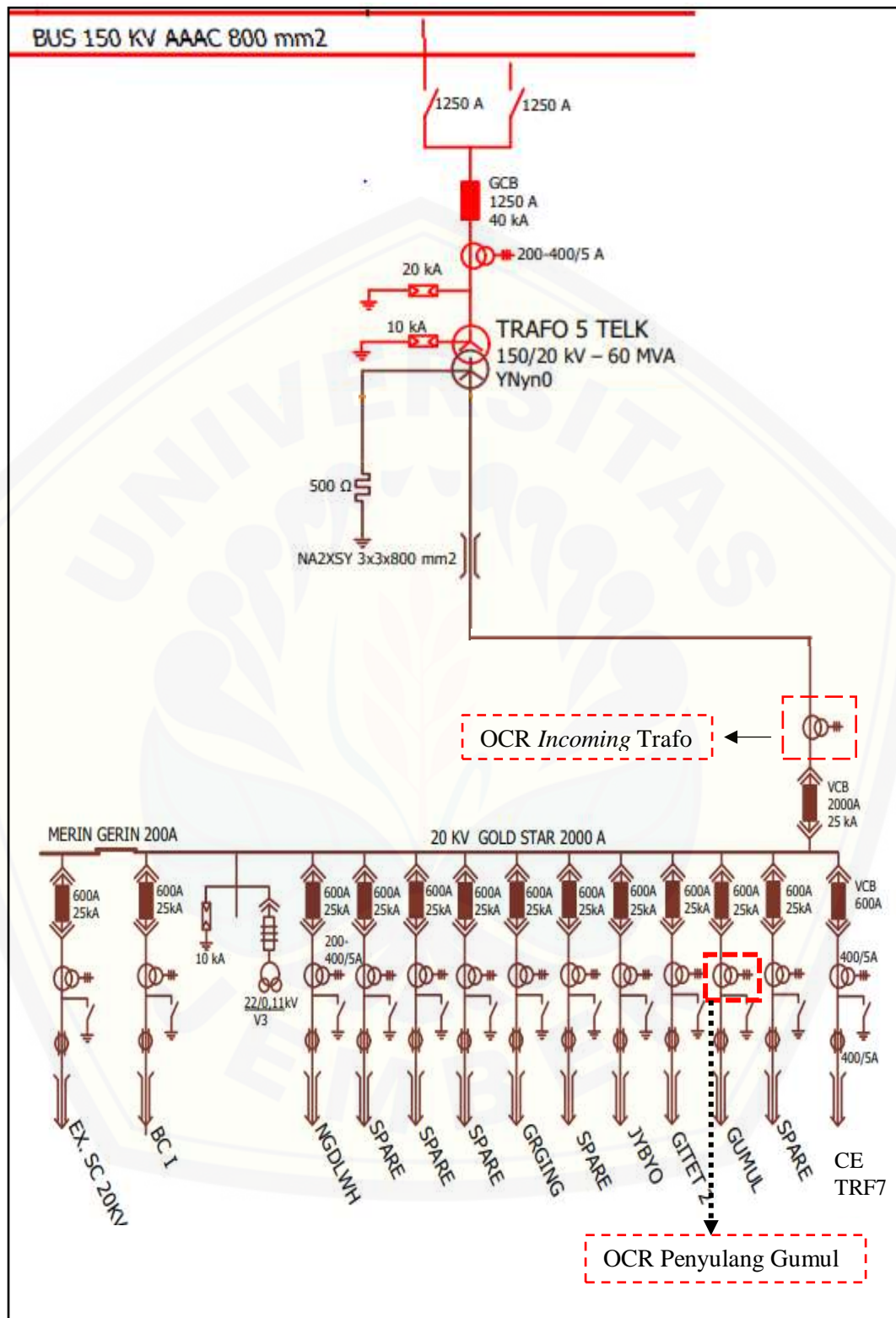
#### 2. *Software* ETAP 12.6

*Software* ETAP 12.6 digunakan untuk simulasi gangguan hubung singkat pada setiap titik lokasi gangguan. Pada penyulang memiliki panjang saluran dan jenis kabel yang memiliki impedansi.

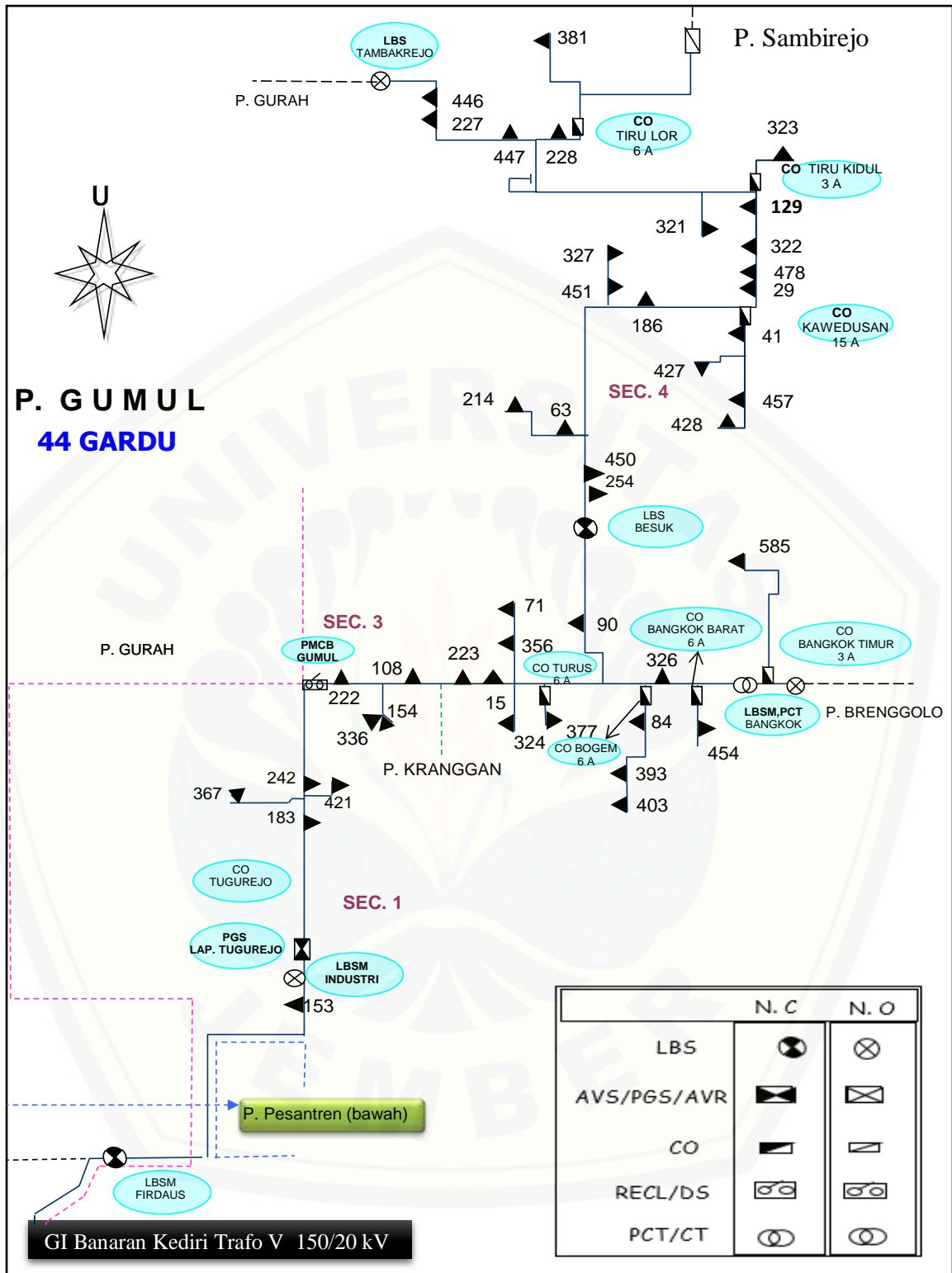
#### 3. *Software* MATLAB

*Software* MATLAB yang digunakan untuk penelitian kali ini adalah MATLAB versi R2013a. Simulasi ini untuk mencari nilai *setting* OCR pada TMS dengan menerapkan metode *Particle Swarm Optimization*.

4. Data Transmisi Gardu Induk Banaran 150/20 kV dan Penyulang Gumul 20 kV  
Data yang akan digunakan pada penelitian kali ini didapat dari transmisi Gardu Induk Banaran dan Penyulang Gumul 20 kV. Gardu Induk Banaran terdiri dari 7 trafo antara lain Trafo 1 Fuji, Trafo 2 Meiden, Trafo 3 Takaoka, Trafo 4 CG Power, Trafo 5 Telk, Trafo 6 Pauwels dan Trafo ABB. Objek penelitian yang digunakan adalah jenis trafo 5 dengan kapasitas 60 MVA dengan tegangan *step down* 150/20 kV. Pada trafo 5 terhubung dengan penyulang 20 kV yang terdiri dari beberapa penyulang diantaranya penyulangg Ngadiluwih, Pare, Gringging, Joyoboyo, GITET 2 dan Gumul. Letak koordinasi yang digunakan pada trafo 5 dan penyulang 20 kV Gumul. Pada Penyulang Gumul 20 kV terdapat 44 gardu yang terhubung dari trafo 5 jaringan 150/20 kV Gardu Induk Banaran.



Gambar 3. 1 Single Line Diagram Transmisi Gardu Induk Banaran PT. PLN (Persero) UIT JBTB UPT Madiun ULTG Kediri



Gambar 3. 2 Single Line Diagram Penyulang Gumul 20 kV PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Kediri



Tabel 3. 1 Spesifikasi transformator

No.	Data	Keterangan
1.	No. Trafo	5
2.	Merk	TELK
3.	Type	SALOCR
4.	No Seri	130105-3
5.	Vektor Grup	Ynyno d1
6.	Arus	231 / 1732
7.	Tegangan Kerja	150/20 KV
8.	Daya	60 MVA
9.	Impedansi	12.3%

Tabel 3. 2 Spesifikasi OCR (*Over Current Relay*)

No.	Data	Incoming Trafo	Penyulang
1.	Merk	Areva	Areva
2.	Type	MiCOM P122	MiCOM P127
3.	Karakteristik	<i>Standard Invers</i>	<i>Standard Invers</i>
4.	Arus Nominal	5 A	5 A
5.	Rasio CT	2000/5 A	800/5 A
6.	Iset / Ip	1.2 x FLA	1.2 x FLA
7	t	-	0.3 s

Tabel 3. 3 Data Penyulang Gumul 20 kV

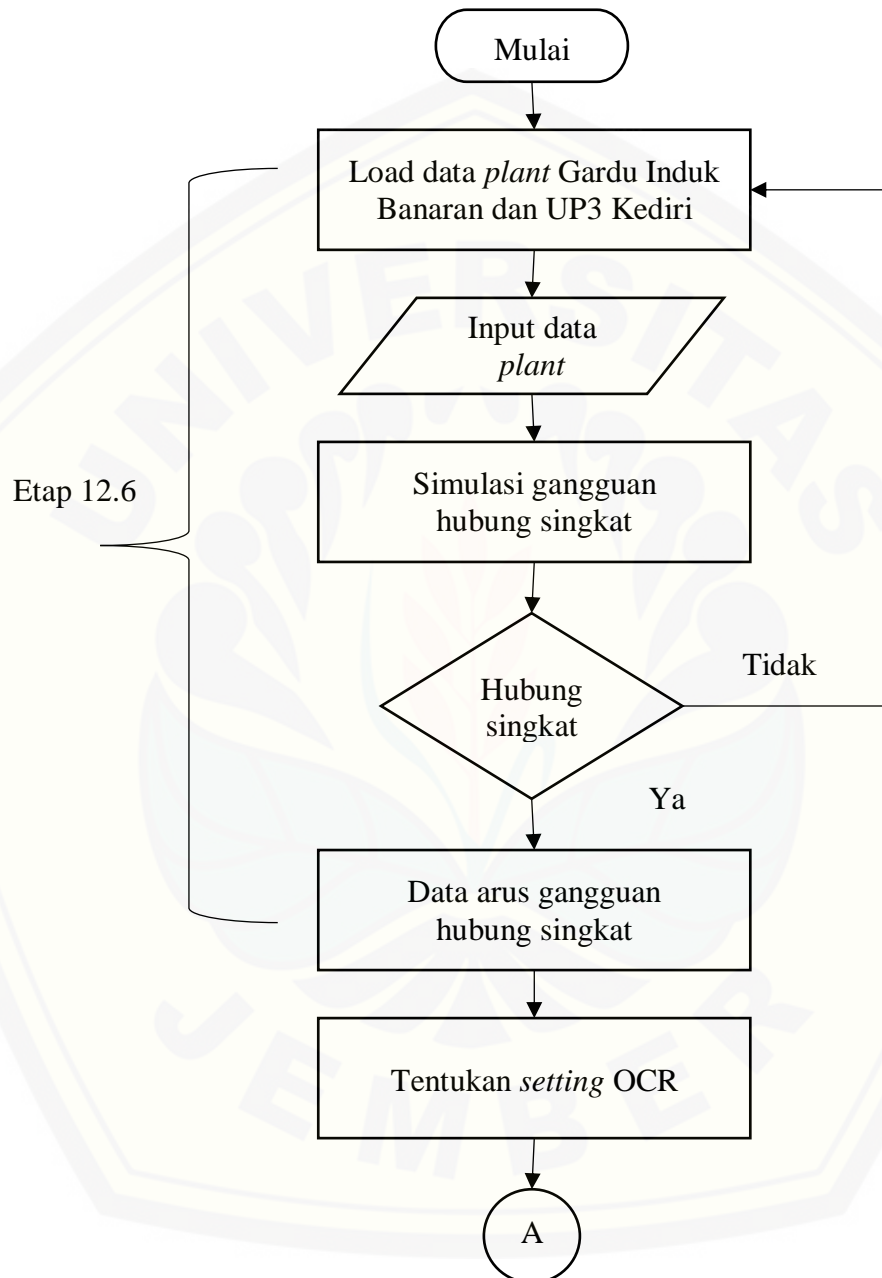
No.	Data	Keterangan
1.	Jenis Kabel	A3C
2.	Panjang Penghantar	41.537 km

Tabel 3. 4 Data impedansi tahanan (R) dan reaktansi ( $X_L$ ) penghantar A3C tegangan 20 kV (SPLN 64: 1985)

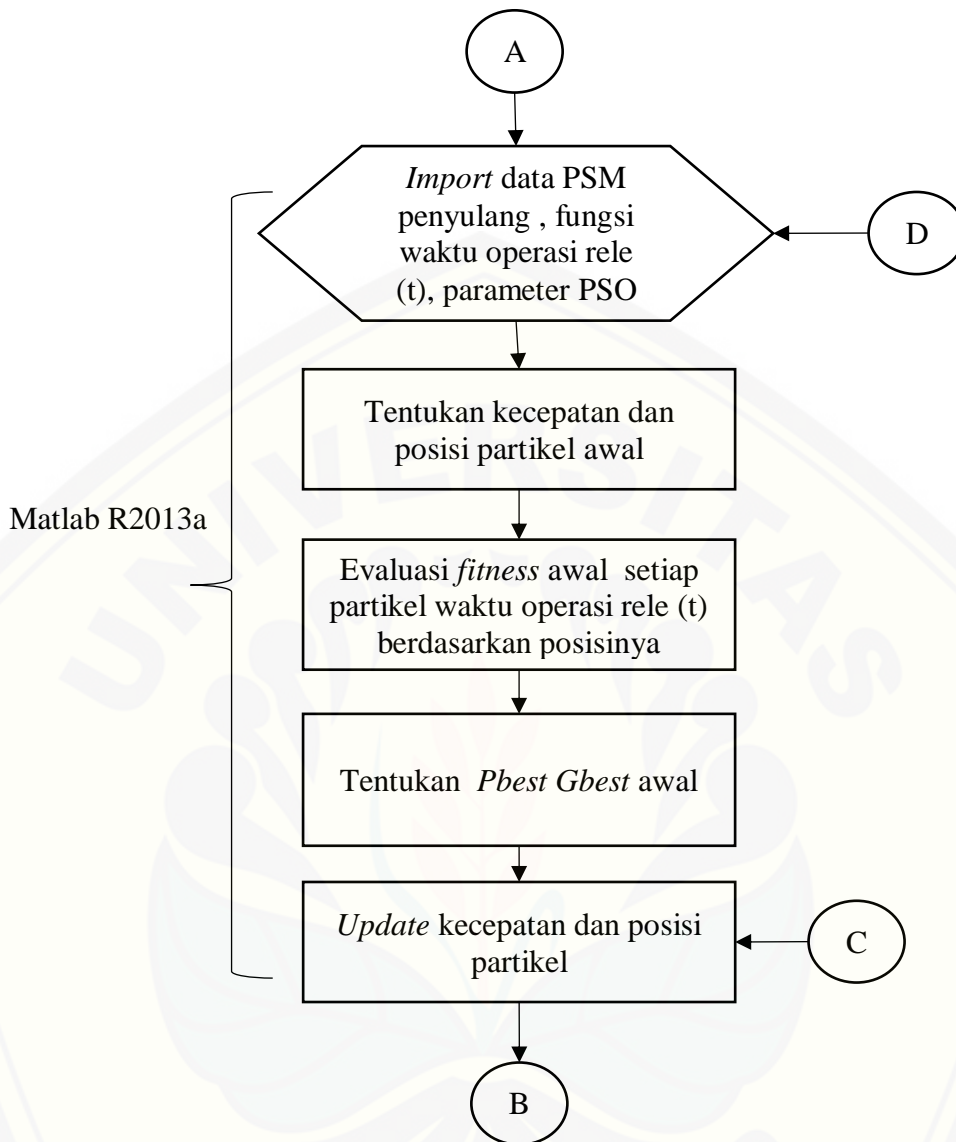
No.	Luas Penampang (mm <sup>2</sup> )	Impedansi Urutan Positif (ohm/km)	Impedansi Urutan Negatif (ohm/km)
1.	150	0.2162 + j0.3305	0.3651 + j1.6180

### 3.4 Diagram Alir Penelitian

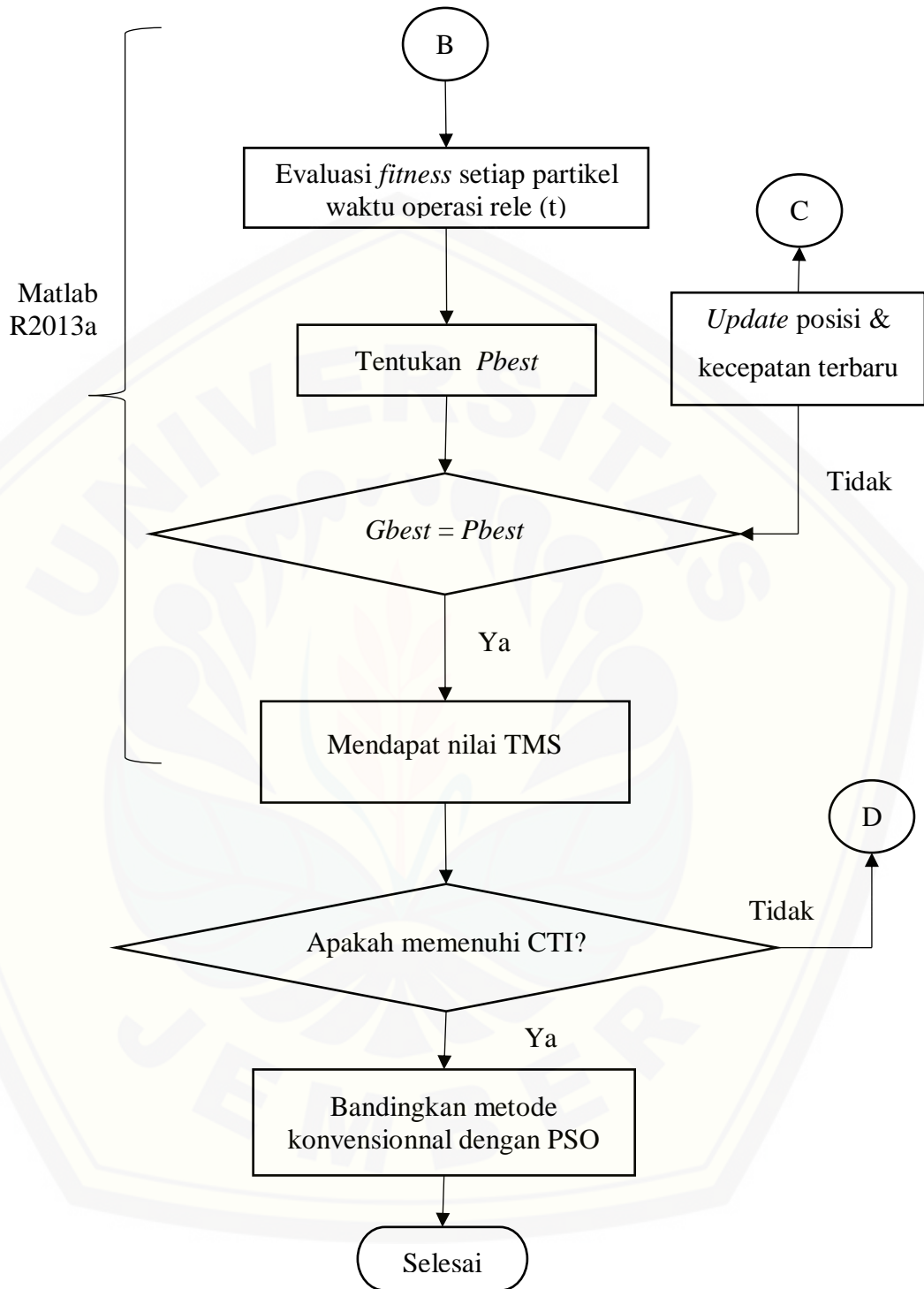
Penelitian ini dilakukan sesuai dengan diagram alir dibawah ini:



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian (lanjutan)



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian (lanjutan)

Berdasarkan gambar 3.3 diatas dapat dijelaskan tentang alur kerja dalam sistem yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Memodelkan *single line diagram* Gardu Induk Banaran dengan Penyulang Gumul 20 kV menggunakan *software* Etap 12.6.
2. Simulasi gangguan hubung singkat ditentukan berdasarkan lokasi gangguan pada penghantar penyulang Gumul. Jadi, gangguan akan ditentukan pada lokasi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari panjang penghantar.
3. Setelah ditentukan arus gangguan hubung singkat, maka arus gangguan hubung singkat digunakan untuk menghitung *setting* pada *Over Current Relay* dengan metode konvensional. *Over Current Relay* yang digunakan sebanyak 2 buah OCR yaitu OCR di penyulang dan OCR *incoming* trafo. Pada perhitungan ini mencari PSM dan TMS pada OCR di *incoming* trafo dan Penyulang Gumul. Setelah diperoleh TMS dan PSM maka selanjutnya menghitung waktu operasi rele pada penyulang dan *incoming* trafo. Perbedaan waktu operasi rele (t) *incoming* trafo dan Penyulang Gumul ditentukan berdasarkan *grading time* sebesar 0.3 sekon.
4. Mencari *setting* OCR pada TMS (*Time Multiplier Setting*) penyulang dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimzation* (PSO).
5. Membandingkan TMS menggunakan PSO dan konvensional.
6. Menentukan koordinasi rele antara *incoming* trafo dan Penyulang Gumul 20 kV apakah sesuai dengan standar CTI (*Coordination Time Interval*) 0.3 – 0.4 (s).
7. Membandingkan CTI (*Coordination Time Interval*) TMS pada PSO dan konvensional.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penentuan optimasi koordinasi OCR dengan PSO didasarkan pada parameter-parameter PSO yaitu PSM penyulang sebesar 26.6, batasan TMS antara 0.1 sampai 1.1 s, koefisien karakteristik waktu *standard invers* 0.14 dan 0.02, iterasi sebanyak 100, jumlah partikel sebanyak 50,  $c_1$  dan  $c_2$  sebesar 0.045 dan 0.5, *inertia weight*  $W_{max}$  dan  $W_{min}$  adalah 0.4 dan 0.9.
2. *Setting* waktu OCR pada TMS penyulang pada hasil PSO diperoleh nilai TMS sebesar 0.1197 s dengan waktu operasi rele (t) sebesar 0.2471 s, sedangkan hasil dari metode konvensional diperoleh nilai TMS sebesar 0.1453 s dengan waktu operasi rele (t) yaitu sebesar 0.3 s. Maka *setting* waktu OCR pada TMS penyulang dengan metode PSO menghasikan waktu operasi rele (t) lebih cepat daripada waktu operasi rele (t) dengan metode konvensional.
3. Koordinasi OCR antara rele penyulang dengan rele *incoming* trafo hasil PSO menghasilkan CTI yang meningkat sebesar 0.3529 s, sedangkan hasil dari metode konvensional diperoleh CTI sebesar 0.300 s. Jadi, semakin cepat waktu operasi rele (t) dari hasil PSO, semakin meningkat pula CTI.
4. Jarak lokasi gangguan pada OCR mempengaruhi waktu operasi rele dan CTI. Hasil PSO pada bus 1 (lokasi gangguan 0 km) gangguan 3 fasa memiliki waktu operasi rele sebesar 0.2471 s dan CTI sebesar 0.3529 s, sedangkan pada bus 15 (lokasi gangguan 10.111 km) gangguan 3 fasa memiliki waktu operasi rele sebesar 0.3150 s dan CTI sebesar 0.6602 s. Maka semakin panjang jarak lokasi gangguan, semakin meningkat waktu operasi rele dan CTI.

## 5.2 Saran

Dengan harapan penelitian ini memiliki hasil yang lebih baik dan dapat dikembangkan penelitian selanjutnya, penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Perlu dibandingkan dengan menggunakan metode selain PSO (*Particle Swarm Optimization*), agar didapat metode yang lebih efisien terhadap kasus optimasi koordinasi proteksi.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Asadi, M., Kouhsari, S., Member, & IEEE. (2009). *Optimal Overcurrent Relays Coordination Using*.
- Badaruddin, & Wirawan, B. (2014). *Setting Koordinasi Over Current Relay Pada Trafo 60 MVA 150/20 Kv Dan Penyulang 20 KV. SINERG*, 134.
- Bouчекara, H., Zellagui, M., & Abido, M. (2017). *Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays Using A Modified Electromagnetic Field Optimization Algorithm. ELSEVIER*.
- Dermawan, E., & Nugroho, D. (n.d.). *Analisa Koordinasi Over Current Relay Dan Ground Fault Relay Di Sistem Proteksi Feeder Gardu Induk 20 Kv Jababeka. Jurnal Elektum*, 14.
- Dewangga, A. S. (2015). *Studi Koordinasi Proteksi Rele Arus Lebih, Diferensial Dan Ground Fault Pada Pt. Linde Indonesia, Cilegon . Surabaya*.
- Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational Intelligence*. University of Pretoria South Africa: John Wiley & Sons, Ltd.
- Fahnani, G., Yuningtyastuti, & Handoko, S. (2013). *Simulasi Optimasi Daya Reaktif Dan Tegangan Pada Sistem Jamali 500 Kv Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization. Transient*, 2.
- Grainger, J., & Stevenson, Jr., W. (1994). *Power System Analysis*.
- IEEE. (2001). *Practice For Protection And Coordination Of Industrial And Commercial Power Systems*. United States of America.
- Kheshti, M., Tekpeti, B. S., & Kang, X. (2016). *The Optimal Coordination Of Over-Current Relay Protection In Radial Network Based On Particle Swarm Optimization. IEEE PES*.
- Lakshmi, M., Ragul Deepak Narayanasamy, R. D., Banerjee, N., & Gnana Swathika, O. V. (2019). *Optimum Coordination Of Overcurrent Relays Using Genetic Algorithm And Particle Swarm Optimization . SUSCOM*.
- Mahaputra, Y., Wibowo, R., & Aryani, N. (2016). *Dynamic Optimal Power Flow Mempertimbangkan Carbon Capture And Storage Plants Menggunakan Metode Multi-Objective Particle Swarm Optimization . JURNAL TEKNIK*



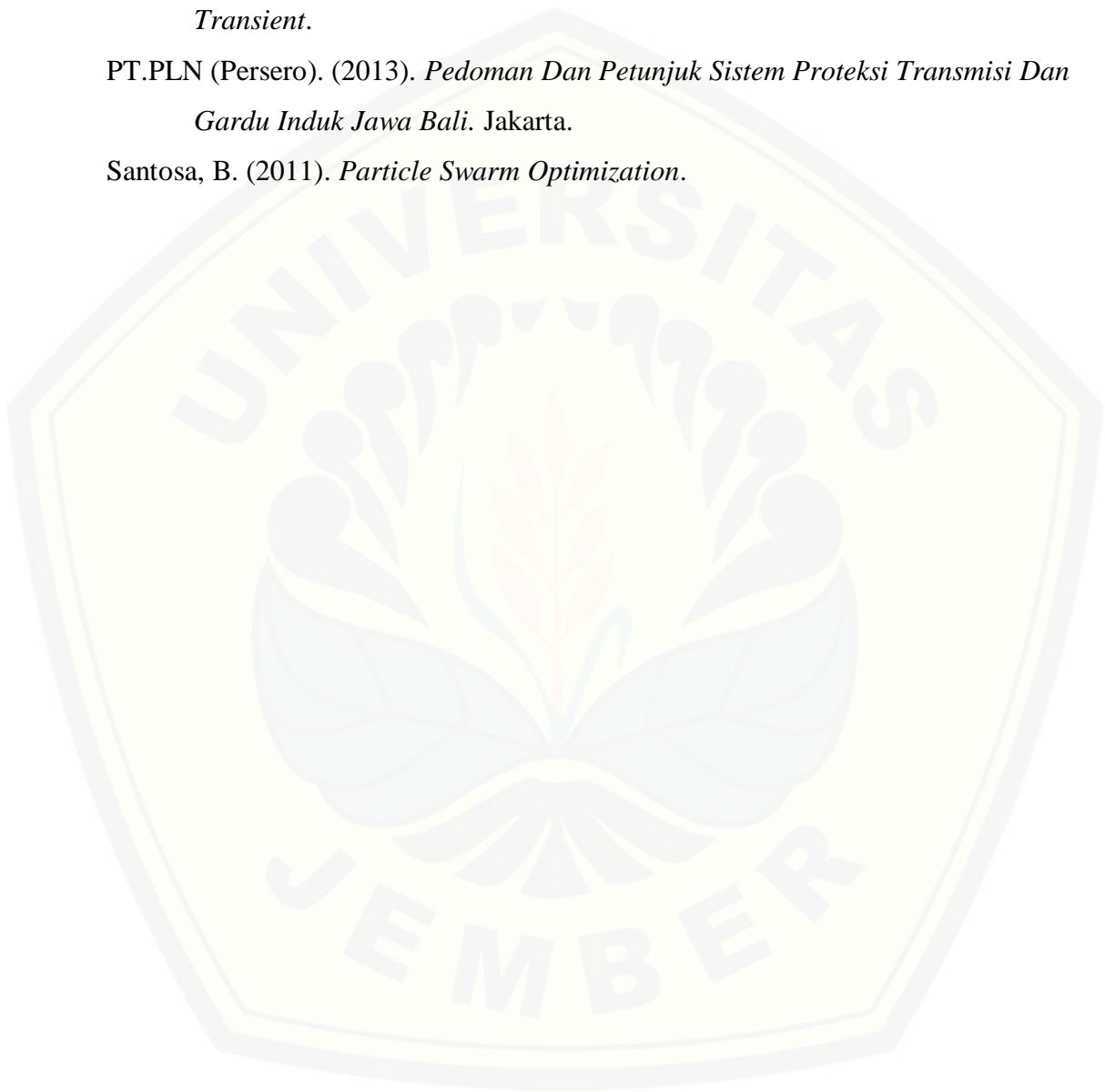
*ITS*, 252.

MULTILIN. (1998). *Relay Selection Guide*. USA.

Putra, A. I., Karnoto, & Winardi, B. (2017, September). *Evaluasi Setting Relay Arus Lebih Dan Setting Relay Gangguan Tanah Pada Gardu Induk 150kv Bawen. Transient*.

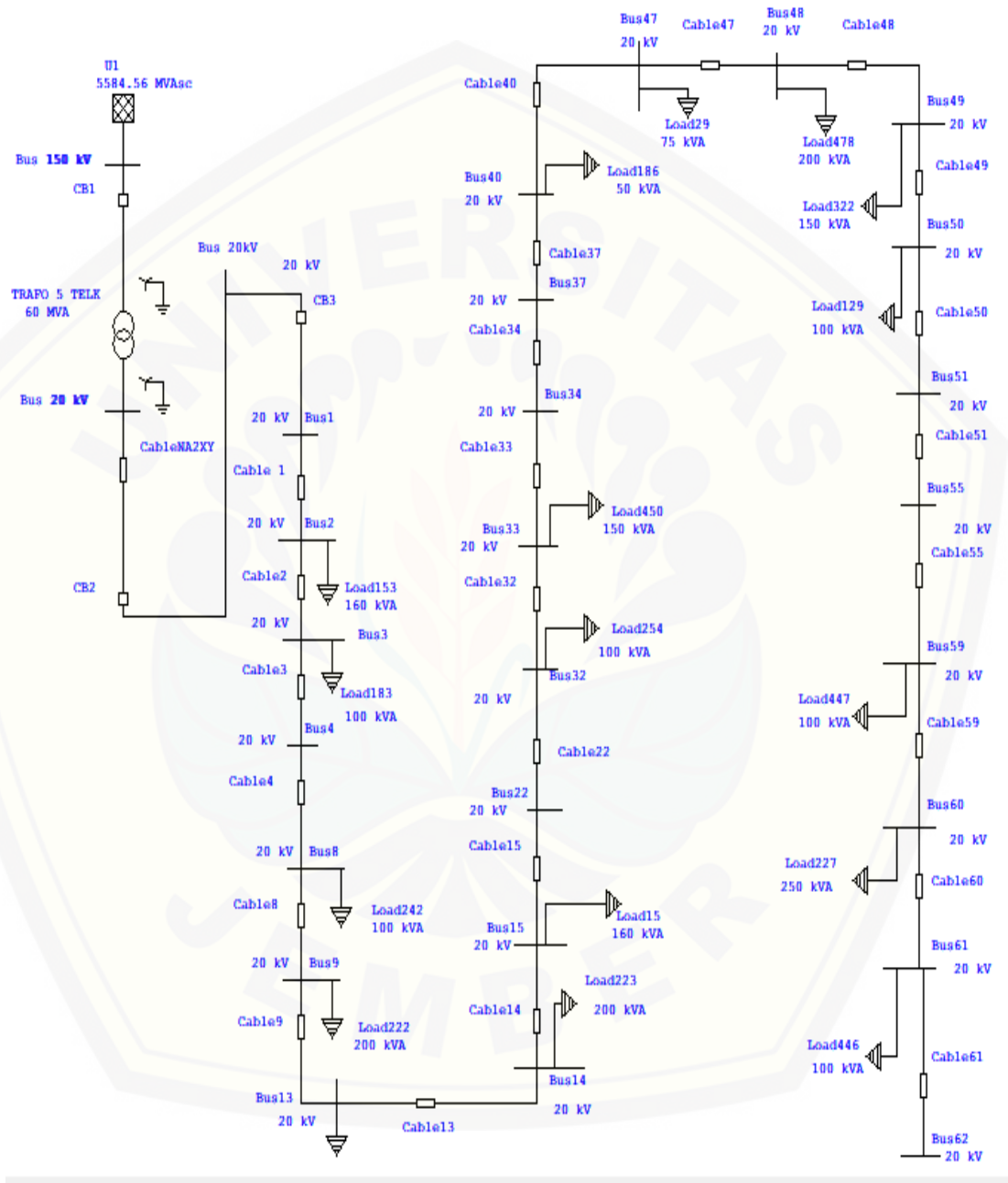
PT.PLN (Persero). (2013). *Pedoman Dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi Dan Gardu Induk Jawa Bali*. Jakarta.

Santosa, B. (2011). *Particle Swarm Optimization*.



LAMPIRAN

1. Single Line Diagram Etap 12.6



Gambar 1 Single line diagram incoming trafo dan penyulang gumul 20 kv

2. Etap 12.6 Report Arus Hubung Singkat

Project: **ETAP**  
 Location: 12.6.0H  
 Contract:   
 Engineer:   
 Filename: simulasi etap

Page: 1  
 Date: 18-10-2020  
 SN:   
 Revision: Base  
 Config.: Normal

Study Case: SC

Short-Circuit Summary Report

1/2 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus	ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			# Line-to-Line-to-Ground		
			Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.
Bus1		20.00	0.362	-12.737	12.762	0.352	-12.989	12.993	11.048	0.313	11.052	10.878	6.928	12.896
Bus15		20.00	1.974	-6.083	6.396	0.972	-3.932	4.070	5.268	1.710	5.539	4.962	3.168	5.886
Bus34		20.00	1.938	-5.537	5.885	0.937	-3.623	3.747	4.812	1.678	5.096	4.510	3.016	5.425
Bus55		20.00	1.863	-4.927	5.268	0.861	-3.126	3.242	4.267	1.613	4.562	4.003	2.751	4.857
Bus61		20.00	1.483	-3.198	3.525	0.579	-1.905	1.991	2.770	1.284	3.033	2.605	1.954	3.237

All fault currents are symmetrical momentary (1/2 Cycle network) values in rms kA

Gambar 2 Etap report arus hubung singkat



```
% Velocity Limits
VelMax=0.1*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;

%% Initialization
empty_particle.Position=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];

particle= repmat(empty_particle, nPop, 1);

GlobalBest.Cost=inf;

for i=1:nPop

    % Initialize Position
    particle(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);

    % Initialize Velocity
    particle(i).Velocity=zeros(VarSize);

    % Evaluation
    particle(i).Cost=CostFunction(particle(i).Position);

    % Update Personal Best
    particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

    % Update Global Best
    if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost
        GlobalBest=particle(i).Best;
    end
end
end
```

```
BestCost=zeros (MaxIt,1);

%% PSO Main Loop
for it=1:MaxIt
    for i=1:nPop

        % Update Velocity
        particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
            +c1*rand(VarSize).*(particle(i).Best.Position-
particle(i).Position) ...
            +c2*rand(VarSize).*(GlobalBest.Position-
particle(i).Position);

        % Apply Velocity Limits
        particle(i).Velocity = max(particle(i).Velocity,VelMin);
        particle(i).Velocity = min(particle(i).Velocity,VelMax);

        % Update Position
        particle(i).Position = particle(i).Position +
particle(i).Velocity;

        % Velocity Mirror Effect
        IsOutside=(particle(i).Position<VarMin |
particle(i).Position>VarMax);
        particle(i).Velocity(IsOutside)=-
particle(i).Velocity(IsOutside);

        % Apply Position Limits
        particle(i).Position = max(particle(i).Position,VarMin);
        particle(i).Position = min(particle(i).Position,VarMax);

        % Evaluation
        particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);

        % Update Personal Best
        if particle(i).Cost<particle(i).Best.Cost
```

```
particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

% Update Global Best
if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

    GlobalBest=particle(i).Best;
end
end
end

BestCost(it)=GlobalBest.Cost;
disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(BestCost(it))]);
w=w*wdamp;

end
BestSol = GlobalBest;
%% Results
figure;
%plot(BestCost,'LineWidth',2);
semilogy(BestCost,'LineWidth',2);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Cost');
grid on;
```

**4. Perhitungan Plug Setting Multiplier (PSM) OCR Penyulang**

a) Gangguan 3 fasa

1) PSM di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{12762}{480} \\ &= 26.6 \end{aligned}$$

2) PSM di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{6396}{480} \\ &= 13.3 \end{aligned}$$

3) PSM di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5885}{480} \\ &= 12.3 \end{aligned}$$

4) PSM di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5268}{480} \\ &= 11 \end{aligned}$$

5) PSM di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{3525}{480} \\ &= 7.3 \end{aligned}$$



## b) Gangguan 2 fasa

- 1) PSM di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{11052}{480} \\ &= 23 \text{ A} \end{aligned}$$

- 2) PSM di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= 5539 \\ &= 11.5 \end{aligned}$$

- 3) PSM di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5096}{480} \\ &= 10.6 \end{aligned}$$

- 4) PSM di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{4562}{480} \\ &= 9.5 \end{aligned}$$

- 5) PSM di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{3257}{480} \\ &= 6.8 \end{aligned}$$

**5. Perhitungan Plug Setting Multiplier (PSM) OCR Incoming Trafo**

a) Gangguan 3 fasa

1) PSM di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{12762}{2078.4} \\ &= 6.1 \end{aligned}$$

2) PSM di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{6396}{2078.4} \\ &= 3.1 \end{aligned}$$

3) PSM di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5885}{2078.4} \\ &= 2.8 \end{aligned}$$

4) PSM di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5268}{2078.4} \\ &= 2.5 \end{aligned}$$

5) PSM di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{3525}{2078.4} \\ &= 1.7 \end{aligned}$$

## b) Gangguan 2 fasa

- 1) PSM di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{11052}{2078.4} \\ &= 5.3 \end{aligned}$$

- 2) PSM di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= 5539 \\ &= 2.7 \end{aligned}$$

- 3) PSM di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{5096}{2078.4} \\ &= 2.5 \end{aligned}$$

- 4) PSM di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{4562}{2078.4} \\ &= 2.2 \end{aligned}$$

- 5) PSM di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{PSM} &= \frac{I_f}{I_p(\text{primer})} \\ &= \frac{3257}{2078.4} \\ &= 1.6 \end{aligned}$$

**6. Perhitungan Waktu Operasi OCR Penyulang Konvensional TMS 0.1453 s**

a) Gangguan 3 fasa

1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{26.6^{0.02} - 1} \\ &= 0.3 \text{ s}\end{aligned}$$

2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{13.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.3827 \text{ s}\end{aligned}$$

3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{12.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.3957 \text{ s}\end{aligned}$$

4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{11.0^{0.02} - 1} \\ &= 0.4145 \text{ s}\end{aligned}$$

5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{7.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.500 \text{ s}\end{aligned}$$

## b) Gangguan 2 Fasa

- 1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{23^{0.02} - 1} \\ &= 0.3142 \text{ s}\end{aligned}$$

- 2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{11.5^{0.02} - 1} \\ &= 0.4058 \text{ s}\end{aligned}$$

- 3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{10.6^{0.02} - 1} \\ &= 0.4205 \text{ s}\end{aligned}$$

- 4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{9.5^{0.02} - 1} \\ &= 0.4416 \text{ s}\end{aligned}$$

- 5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{6.8^{0.02} - 1} \\ &= 0.5211 \text{ s}\end{aligned}$$

## 7. Perhitungan Waktu Operasi OCR *Incoming* Trafo Konvensional

### a) Gangguan 3 fasa

- 1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{6.1^{0.02} - 1} \\ &= 0.6 \text{ s}\end{aligned}$$

- 2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{3.1^{0.02} - 1} \\ &= 0.9755 \text{ s}\end{aligned}$$

- 3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{2.8^{0.02} - 1} \\ &= 1.0544 \text{ s}\end{aligned}$$

- 4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{2.5^{0.02} - 1} \\ &= 1.1813 \text{ s}\end{aligned}$$

- 5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{1.7^{0.02} - 1} \\ &= 2.0881 \text{ s}\end{aligned}$$

## b) Gangguan 2 Fasa

- 1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{5.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.6526\text{s}\end{aligned}$$

- 2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{2.7^{0.02} - 1} \\ &= 1.1203 \text{ s}\end{aligned}$$

- 3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{2.5^{0.02} - 1} \\ &= 1.2254 \text{ s}\end{aligned}$$

- 4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{2.2^{0.02} - 1} \\ &= 1.3995 \text{ s}\end{aligned}$$

- 5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.145}{1.6^{0.02} - 1} \\ &= 2.4576 \text{ s}\end{aligned}$$

## 8. Perhitungan CTI Sebelum Menggunakan PSO

### a) Gangguan 3 fasa

- 1) CTI di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.600 - 0.300 \\ &= 0.300 \text{ s} \end{aligned}$$

- 2) CTI di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.9755 - 0.3827 \\ &= 0.5928 \text{ s} \end{aligned}$$

- 3) CTI di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.0544 - 0.3957 \\ &= 0.6587 \text{ s} \end{aligned}$$

- 4) CTI di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.1813 - 0.4145 \\ &= 0.7668 \text{ s} \end{aligned}$$

- 5) CTI di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 2.0881 - 0.500 \\ &= 1.588 \text{ s} \end{aligned}$$



## b) Gangguan 2 Fasa

- 1) CTI di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.6526 - 0.3142 \\ &= 0.3384 \text{ s} \end{aligned}$$

- 2) CTI di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.1203 - 0.4058 \\ &= 0.7145 \text{ s} \end{aligned}$$

- 3) CTI di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.2254 - 0.425 \\ &= 0.8049 \text{ s} \end{aligned}$$

- 4) CTI di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.3995 - 0.4416 \\ &= 0.9579 \text{ s} \end{aligned}$$

- 5) CTI di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 2.4576 - 0.5211 \\ &= 1.9365 \text{ s} \end{aligned}$$

**9. Perhitungan Waktu Operasi OCR Penyulang PSO TMS 0.1197 s**

a) Gangguan 3 fasa

1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{26.6^{0.02} - 1} \\ &= 0.2471 \text{ s}\end{aligned}$$

2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{13.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.3153 \text{ s}\end{aligned}$$

3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{12.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.3260 \text{ s}\end{aligned}$$

4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{11.0^{0.02} - 1} \\ &= 0.3415 \text{ s}\end{aligned}$$

5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{7.3^{0.02} - 1} \\ &= 0.4119 \text{ s}\end{aligned}$$

## b) Gangguan 2 Fasa

- 1) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{23^{0.02} - 1} \\ &= 0.2588 \text{ s}\end{aligned}$$

- 2) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{11.5^{0.02} - 1} \\ &= 0.3343 \text{ s}\end{aligned}$$

- 3) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{10.6^{0.02} - 1} \\ &= 0.3464 \text{ s}\end{aligned}$$

- 4) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{9.5^{0.02} - 1} \\ &= 0.3638 \text{ s}\end{aligned}$$

- 5) Waktu operasi rele di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.14 \times \text{TMS}}{\text{PSM}^{0.02} - 1} \\ &= \frac{0.14 \times 0.1197}{6.8^{0.02} - 1} \\ &= 0.4293 \text{ s}\end{aligned}$$

**10. Perhitungan CTI Menggunakan PSO**

a) Gangguan 3 fasa

1) CTI di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.600 - 0.2471 \\ &= 0.3529 \text{ s} \end{aligned}$$

2) CTI di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.9755 - 0.3153 \\ &= 0.6602 \text{ s} \end{aligned}$$

3) CTI di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.0544 - 0.3260 \\ &= 0.7284 \text{ s} \end{aligned}$$

4) CTI di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.1813 - 0.3415 \\ &= 0.8398 \text{ s} \end{aligned}$$

5) CTI di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 2.0881 - 0.4119 \\ &= 1.6761 \text{ s} \end{aligned}$$

## b) Gangguan 2 Fasa

- 1) CTI di lokasi gangguan 0% (0 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 0.6526 - 0.2588 \\ &= 0.3938 \text{ s} \end{aligned}$$

- 2) CTI di lokasi gangguan 25% (10.111 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.1203 - 0.3343 \\ &= 0.7860 \text{ s} \end{aligned}$$

- 3) CTI di lokasi gangguan 50% (20.462 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.2254 - 0.3464 \\ &= 0.8790 \text{ s} \end{aligned}$$

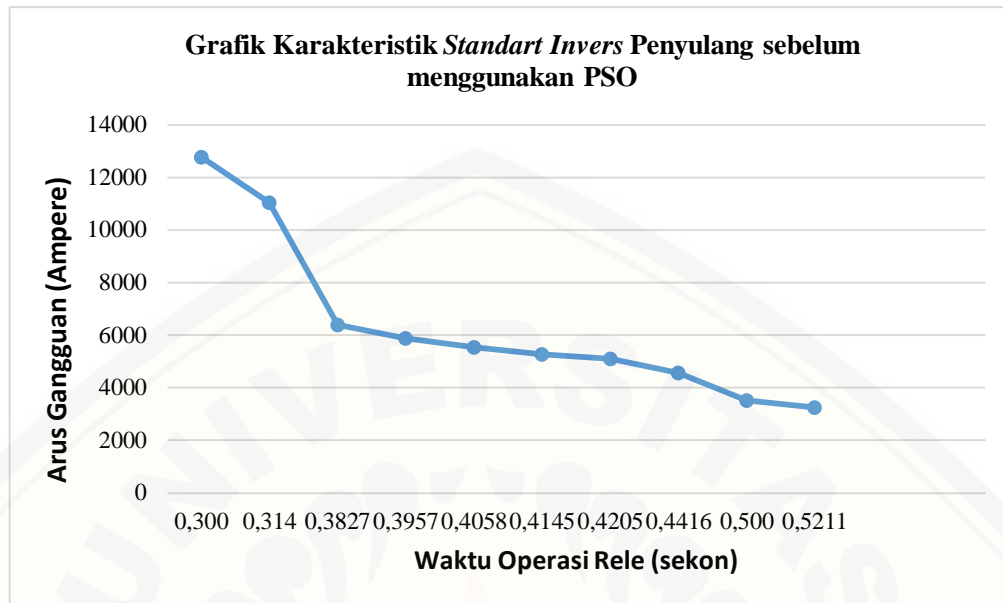
- 4) CTI di lokasi gangguan 75% (31.105 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 1.3995 - 0.3638 \\ &= 1.0357 \text{ s} \end{aligned}$$

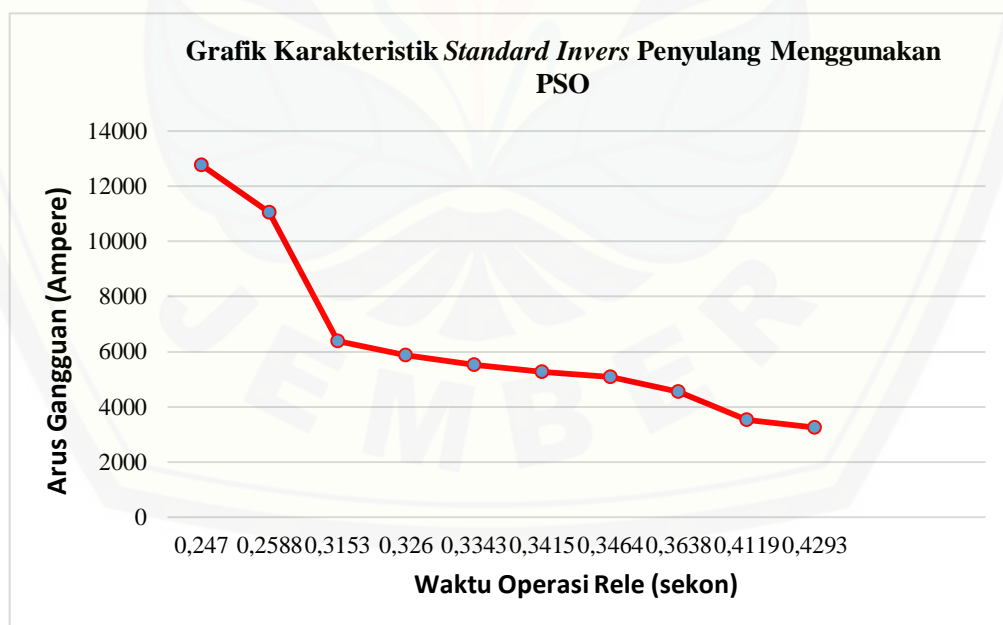
- 5) CTI di lokasi gangguan 100% (41.537 km)

$$\begin{aligned} \text{CTI} &= t_{\text{incoming}} - t_{\text{penyulang}} \\ &= 2.4576 - 0.4293 \\ &= 2.0283 \text{ s} \end{aligned}$$

### 11. Grafik Karakteristik *Standard Invers* pada OCR



Gambar 3 Grafik karakteristik *standard invers* penyulang sebelum menggunakan PSO



Gambar 4 Grafik karakteristik *standard invers* penyulang menggunakan PSO

## 12. Data Gardu Penyulang Gumul

Data Gardu			
No	Gardu	Alamat	Kapasitas (kVA)
1	Ea015	Ds Gabru	160
2	Ea029	Ds Kawedusan Kec Ploso Klaten (3x25)	75
3	Ea041	Ds Klenderan Kec Ploso Klaten	250
4	Ea063	Dn Sumber Cangkring Ds Besuk	100
5	Ea071	Ds Banyuanyar	160
6	Ea084	Ds. Bangkok	160
7	Ea090	Ds Besuk	100
8	Ea108	Ds Wonojoyo	160
9	Ea129	Ds Tiru Kidul	100
10	Ea153	Ds Tugurejo	160
11	Ea154	Ds Kranggan Gurah	200
12	Ea183	Ds Tugurejo	100
13	Ea186	Ds Sumber Cangkring	50
14	Ea214	Dn Sumber Cangkring Ds Besuk (Gedung Baru Gontor)	160
15	Ea222	Ds Kranggan Gurah	200
16	Ea223	Ds Wonojoyo	200
17	Ea227	Ds Tambak Rejo	250
18	Ea228	Ds Tambakrejo Kec Gurah	250
19	Ea242	Pr Tugurejo Asri	100
20	Ea254	Ds Baron	100
21	Ea321	Ds Tiru Kidul (3x50)	150
22	Ea322	Ds Tiru Kidul (3x50)	150
23	Ea323	Ds Tiru Lor	100
24	Ea324	Ds Banyuanyar	160
25	Ea326	Ds Bangkok	160
26	Ea327	Ds Sumber Cangkring	100
27	Ea336	Ds Kranggan Gurah	100
28	Ea356	Ds Banyuanyar	200
29	Ea367	Ds Tugurejo	2000
30	Ea377	Ds Turus	160
31	Ea381	Ds Tiru Lor Kec. Gurah	160
32	Ea393	Ds Bogem	200
33	Ea403	Ds Bogem	100
34	Ea421	Ds Tugurejo	100
35	Ea427	Ds Kawedusan Kec Ploso Klaten	160
36	Ea428	Ds Klenderan Kec Ploso Klaten	200

<b>37</b>	Ea446	Ds Tambak Rejo	100
<b>38</b>	Ea447	Ds Tambakrejo Kec Gurah	100
<b>39</b>	Ea450	Ds Baron	160
<b>40</b>	Ea451	Ds Sumber Cangkring	160
<b>41</b>	Ea454	Desa Bangkok	160
<b>42</b>	Ea457	Ds Klanderan Kec Ploso Klaten	100
<b>43</b>	Ea478	Ds Kawedusan Kec Ploso Klaten	200
<b>44</b>	Ea585	Ds Kawedusan Kec Ploso Klaten	100

Tabel 1 Data gardu penyulang gumul

