



**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**ANALISIS KOORDINASI PENGAMANAN DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API PADA PT. PJB  
UBJOM PLTU REMBANG**

A'raaf Aji Setiyawan  
NRP 07111745000014

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





***FINAL PROJECT - EE 184801***

***ANALYSIS OF COORDINATION PROTECTION  
BY CONSIDERING BUSUR API IN PT. PJB  
UBJOM PLTU REMBANG***

A'raaf Aji Setiyawan  
NRP 07111745000014

*Supervisor*  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

***ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019***



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Analisis Koordinasi Pengamanan Dengan Mempertimbangkan Busur Api Pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2019



A'raaf Aji Setiyawan  
Nrp.07111745000014



**ANALISIS KOORDINASI PENGAMANAN  
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API  
PADA PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG**


**TUGAS AKHIR**


**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Biang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui,**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

  
**Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.**  
**NIP. 196603181990101001**

  
**Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.**  
**NIP. 198702062012121002**







**ANALISIS KOORDINASI PENGAMANAN  
DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API PADA  
PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG**

**Nama** : A'raaf Aji Setiyawan  
**Pembimbing I** : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
**Pembimbing II** : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

**ABSTRAK**

Keandalan sistem kelistrikan sangat penting untuk mendukung operasional suatu perusahaan. Hal ini dapat dipengaruhi oleh gangguan hubungan singkat fasa maupun gangguan tanah. Sehingga untuk menjaga keandalan sistem kelistrikan diperlukan suatu sistem koordinasi pengaman yang baik dan tepat, agar dapat mengisolasi gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Selain itu, gangguan hubungan singkat dapat menimbulkan Insiden Energi Busur Api yang berbahaya bagi para pekerja di sekitar area timbulnya Insiden Energi Busur Api. Berdasarkan *IEEE 1584 – 2002*, besar energi Busur Api pada sistem kelistrikan tegangan rendah dan tegangan menengah digunakan sebagai pedoman untuk menentukan jarak aman (*flash protection boundary / FPB*) sedangkan standar *NFPA 70E 2015* digunakan untuk menentukan Alat Pelindung Diri (APD) yang sesuai berdasarkan besar nilai insiden energi busur api saat terjadi gangguan hubungan singkat. Insiden energi dapat dihitung dengan menentukan arus gangguan *bolted 3 fasa*, sedangkan *fault clearing time (FCT)* merupakan waktu pemadaman busur api saat gangguan hubungan singkat berlangsung. Semakin cepat *FCT* maka besar insiden energi saat terjadi gangguan akan semakin kecil. *FCT* dapat diperoleh dari rele merasakan gangguan dan memerintah Pemutus daya (PMT) untuk trip dan waktu CB saat bekerja. Pada PT PJB UBJOM PLTU Rembang, masih terdapat beberapa koordinasi pengaman yang kurang tepat, sehingga perlu dilakukan pengaturan ulang. Setelah dilakukan pengaturan ulang koordinasi pengaman rele gangguan arus lebih, didapatkan tingkatan waktu antar rele yang sesuai dengan standar dan melindungi peralatan dengan baik, serta perhitungan nilai insiden energi yang mengacu pada standar sebagai penentu Alat Pelindung Diri.

*Kata Kunci* – Koordinasi pengaman, Busur Api, batas perlindungan busur api, *IEEE 1584 – 2002*, Alat Pelindung Diri, *fault clearing time*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALYSIS OF COORDINATION PROTECTION  
BY CONSIDERING BUSUR API IN  
PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG**

*Name* : A'raaf Aji Setiyawan  
*Advisor I* : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
*Advisor II* : Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

**ABSTRACT**

*The reliability of the electrical system is very important to support the operations of a company. This can be affected by phase short circuit disturbances or soil disturbances. So as to maintain the reliability of the electrical system, a good and appropriate protection coordination system is needed in order to isolate the disturbances that might occur. In addition, short circuit disturbances can cause incidences of dangerous arc flash energy for workers around the area, the incident of arc flash energy. Based on IEEE 1584 - 2002, large arc flash energy in low voltage and medium voltage electrical systems is used as a guideline to determine the safe distance (flash protection boundary, FPB) while the 2015 NFPA 70E standard is used to determine the appropriate Personal Protective Equipment (PPE) based on incident energy arc flash value when a short circuit occurs. Incident energy can be calculated by determining a three phase fault current bolt, while fault clearing time (FCT) is an arc flash blackout time when a short circuit interruption takes place. The faster the fault clearing time, the greater the incident energy when the interference occurs, the smaller it will be. Fault clearing time can be obtained from the relay to feel interference and rule the Circuit Breaker (CB) for trips and CB times when working. At PT PJB UBJOM PLTU Rembang, there are still some improper coordination of protection, so it is necessary to do resetting. After resetting overcurrent relay protection coordination, it is obtained grading time between relay that is in accordance with the standards and protects the equipment properly, as well as calculating the value of energy incidents that refer to standards as determinants of Personal Protective Equipment (PPE).*

*Keywords - Protection coordination, arc flash, flash protection boundary, IEEE 1584 - 2002, personal protective equipment, fault clearing time*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Rasa syukur dan selalu memuji adalah kalimat termashur yang sewajarnya penulis panjatkan kepada dzat yang maha baik, yang maha indah, Allah SWT. Berkat-Nya penulis mampu menyelesaikan penyusunan tugas akhir yang berjudul “ANALISIS KOORDINASI PENGAMANAN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BUSUR API PADA PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG”. Tak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Teruntuk:

1. Bapak Sudarli dan Ibu Siti Amini yang senantiasa mendoakan serta memberikan dukungan yang begitu besar, baik moril maupun materiil. Serta saudara-saudara ku yang aku cintai Arif Mustofa, Ardian Mohib, Andra Wahyudi.
2. Lilik Niswatun Faza, yang selalu memberikan dukungan dan doa, secara tidak langsung telah memberikan dampak yang cukup besar dalam penyelesaian tugas akhir ini. Semoga kami senantiasa dalam keridhoan-Nya, Allah SWT.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Redi, Masde, Agung, Farish, Andre, Ziya, Eka yang sudah mau diganggu waktunya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Semua teman LJ Elektro 2017 yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan perlindungan kepada kita semua, aamiin.....

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

<b>JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xxi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika .....	3
1.7 Relevansi atau manfaat.....	4
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b> .....	5
2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Hubungan Singkat.....	6
2.2 Pengaman Sistem Tenaga .....	9
2.3 Rele Arus Lebih .....	10
2.3.1 Karakteristik Rele Arus Lebih [5].....	10
2.4 Busur Api .....	13
2.4.1 Perhitungan Energi Busur Api Berdasarkan Standar <i>IEEE 1584-2002</i> .....	14
2.4.2 Insiden Energi.....	15

2.4.3	Batas Jarak Perlindungan Busur Api .....	16
2.4.4	Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Terhadap APD (Alat Pelindung Diri).....	18
<b>BAB 3</b>	<b>SISTEM KELISTRIKAN PLTU REMBANG.....</b>	<b>21</b>
3.1	Sistem Kelistrikan .....	21
3.2	Data Peralatan .....	21
3.2.1	Generator .....	22
3.2.2	Trafo.....	22
3.2.3	Kabel .....	23
3.2.4	Beban.....	24
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULASI DAN ANALISIS.....</b>	<b>27</b>
4.1	Pemodelan Sistem kelistrikan .....	27
4.2	Pemilihan Tipikal Pengaturan Koordinasi Rele Pengaman ..	27
4.3	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa .....	28
4.3.1	Analisis Tipikal 1A .....	28
4.3.2	Analisis Tipikal 2A .....	37
4.3.3	Analisis Tipikal 2B.....	50
4.4	Koordinasi Rele Gangguan ke Tanah ( <i>GFR</i> ) .....	59
4.5	Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api .....	63
4.6	Perhitungan Insiden Energi Busur Api Sesuai Standar <i>IEEE 1584-2002</i> .....	64
4.7	Perbandingan Insiden Energi Busur Api Kondisi Pengaturan ulang Antara Simulasi dan Perhitungan.....	72
4.8	Perbandingan Insiden Energi Busur Api Kondisi Pengaturan awal dan Pengaturan ulang .....	73
4.9	Perhitungan Batas perlindungan busur api .....	74
4.10	Perbandingan Nilai Batas perlindungan busur api ( <i>FPB</i> ) ....	77
4.11	Analisis Penentuan Alat Pelindung Diri (Alat Pelindung Diri, APD)	78



<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN</b> .....	81
5.1	Kesimpulan.....	81
5.2	Saran .....	82
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		103
<b>INDEKS</b> .....		105
<b>LAMPIRAN</b>		
<b>BIODATA PENULIS</b>		

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Hubungan singkat tiga fasa .....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Hubungan singkat tiga fasa dengan tanah .....	7
<b>Gambar 2.3</b>	Hubungan singkat dua fasa .....	7
<b>Gambar 2.4</b>	Hubungan singkat dua fasa ke tanah.....	8
<b>Gambar 2.5</b>	Hubungan singkat satu fasa ke tanah .....	8
<b>Gambar 2.6</b>	Skema kerja rele .....	10
<b>Gambar 2.7</b>	karakteristik rele arus lebih waktu tertentu .....	10
<b>Gambar 2.8</b>	<i>Kurva</i> arus terhadap waktu ( <i>TCC</i> ).....	11
<b>Gambar 2.9</b>	<i>Kurva</i> rele arus lebih <i>instantaneous time</i> .....	12
<b>Gambar 2.10</b>	Ilustrasi batas aman dari konduktor bertegangan.....	17
<b>Gambar 3.1</b>	<i>SLD</i> sistem kelistrikan pada PLTU Rembang .....	21
<b>Gambar 4.1</b>	Penentuan tipikal koordinasi pengaman PLTU Rembang	27
<b>Gambar 4.2</b>	Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 1A .....	28
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan awal tipikal 1A .	30
<b>Gambar 4.4</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 1A	36
<b>Gambar 4.5</b>	Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 2A .....	37
<b>Gambar 4.6</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2A .	39
<b>Gambar 4.7</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 2A	50
<b>Gambar 4.8</b>	Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 2B .....	51
<b>Gambar 4.9</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2B..	52
<b>Gambar 4.10</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 2B .....	57
<b>Gambar 4.11</b>	Diagram satu garis koordinasi pengaman rele gangguan tanah.....	59
<b>Gambar 4.12</b>	<i>Kurva TCC</i> pengaturan rele <i>GFR</i> .....	62

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Pengaturan <i>time dial</i> rele arus lebih standar ANSI .....	12
<b>Tabel 2.2</b> Pengaturan <i>time dial</i> rele arus lebih standar IEC .....	13
<b>Tabel 2.3</b> Faktor Untuk Peralatan dan Tingkat Tegangan [16] .....	15
<b>Tabel 2.4</b> Tipikal Jarak Bekerja [16] .....	16
<b>Tabel 2.5</b> Pengelompokan Kategori Resiko Sesuai dengan <i>NFPA 70E</i> <i>2015</i> .....	18
<b>Tabel 3.1</b> Data generator PLTU Rembang.....	22
<b>Tabel 3.2</b> Data Trafo PLTU Rembang .....	22
<b>Tabel 3.3</b> Data kabel sistem kelistrikan PLTU Rembang .....	23
<b>Tabel 3.4</b> Motor-motor induksi tegangan 6,3 kV .....	24
<b>Tabel 4.1</b> Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 1A .....	29
<b>Tabel 4.2</b> Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2A .....	38
<b>Tabel 4.3</b> Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2B .....	51
<b>Tabel 4.4</b> Perbandingan hasil pengaturan pengaturan awal dan pengaturan ulang.....	58
<b>Tabel 4.5</b> Data hasil simulasi Busur Api pada sistem pengaturan awal	63
<b>Tabel 4.6</b> Data hasil simulasi Busur Api pada sistem pengaturan ulang .....	64
<b>Tabel 4.7</b> Perbandingan nilai Insiden Energi Busur Api antara simulasi dan perhitungan. ....	73
<b>Tabel 4.8</b> Perbandingan nilai Insiden Energi Busur Api antara pengaturan awal dan pengaturan ulang. ....	73
<b>Tabel 4.9</b> Perbandingan Batas perlindungan busur api Kondisi Pengaturan awal, Pengaturan ulang dan Hitungan. ....	77
<b>Tabel 4.10</b> Penentuan APD sesuai dengan bus dan level insiden energi. .....	79

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

PT. PJB UBJOM PLTU Rembang adalah perusahaan yang bergerak dibidang jasa operasi dan pemeliharaan pembangkit tenaga listrik yang berada di Sluke kabupaten Rembang, dengan PT. PLN (Persero) sebagai *owner*-nya. PT. PJB UBJOM PLTU Rembang mengelola pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas daya yang dihasilkan sebesar 2 x 315 MW. Generator pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang berfungsi swing sebagai penanggung beban dasar pelanggan PT. PLN (Persero), sehingga keandalan pasokan listrik di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang sangatlah penting guna memenuhi kebutuhan operasi PT. PJB UBJOM PLTU Rembang.

Untuk mengatasi gangguan – gangguan yang mungkin terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, guna mencapai keandalan dan menjaga kontinuitas pendistribusian tenaga listrik, maka diperlukanlah sistem koordinasi pengaman yang baik. Sehingga ketika terjadi gangguan pada suatu jaringan, sistem pengaman akan mampu mengisolasi jaringan yang mengalami gangguan dengan cepat dan tepat.

Selain itu, gangguan pada sistem tenaga listrik juga berdampak pada timbulnya busur api (*Arc Flash*) yang dapat membahayakan pekerja di sekitar area yang mengalami gangguan. Sehingga perlu diketahui besar nilai insiden energi busur api yang timbul pada bus-bus sistem kelistrikan. Agar dapat mendefinisikan bahaya yang mungkin terjadi di sekitar area gangguan pada pekerja, serta mempersiapkan alat pelindung diri bagi pekerja sesuai dengan standar.

Dalam penelitian kali ini, pengaturan pengaman dilakukan dengan mempertimbangkan energi busur api yang mungkin timbul ketika terjadi gangguan. Penentuan energi busur api mengacu pada standar *IEEE 1584-2002*. Hasil dari perhitungan energi busur api digunakan untuk menentukan jarak aman antara titik yang berpotensi terjadinya busur api dengan pekerja, serta penentuan kategori bahaya busur api dan rekomendasi Alat Pelindung Diri (APD) bagi para pekerja berdasarkan standar *NFPA 70E 2015*.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Perumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan pengaturan koordinasi pengaman OCR dan GFR pada level tegangan menengah 6,3 kV di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang.
2. Menghitung besar insiden energi busur api kondisi pengaturan ulang pada level tegangan menengah 6,3 kV sesuai standar *IEEE 1584-2002* di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang.
3. Menentukan kategori insiden energi, alat pelindung diri serta jarak aman bagi para pekerja sesuai standar *NFPA 70E-2015* pada kondisi pengaturan ulang.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Analisis dilakukan di sistem kelistrikan pemakaian sendiri PT PJB UBJOM PLTU Rembang.
2. Analisis difokuskan pada koordinasi pengaman rele arus lebih fasa dan GFR pada level tegangan menengah 6,3 kV.
3. Perhitungan insiden energi busur api hanya dilakukan pada bus tegangan menengah 6,3 kV dengan menggunakan standar *IEEE 1584-2002*.
4. Simulasi hanya dilakukan dengan Perangkat lunak ETAP 12.6

## **1.4 Tujuan**

1. Menentukan sistem koordinasi pengaman arus lebih fasa yang tepat untuk diterapkan di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang.
2. Mengetahui perbandingan insiden energi busur api di level tegangan menengah 6,3 kV pada kondisi pengaturan awal dan pengaturan ulang, serta menentukan Alat Pelindung Diri (APD) sesuai dengan standar.
3. Ketika PT. PJB UBJOM PLTU Rembang melakukan perbaikan sistem pengaman maka tugas akhir ini dapat digunakan sebagai bahan acuan.

## **1.5 Metodologi**

Proses pengerjaan tugas akhir ini menggunakan metode sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Pertama kali yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah studi literatur, langkah-langkah yang dilakukan adalah



mencari buku, jurnal dan informasi yang berhubungan dengan hubungan singkat dan koordinasi pengaman.

2. Pengumpulan Data

Setelah melakukan tahap pertama, tahap kedua adalah mengumpulkan data. Sumber data yang digunakan berasal dari PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, meliputi diagram satu garis, rating generator, trafo, motor dan beban lainnya, kabel, busbar, pemutus daya, dan pengaturan rele pada kondisi pengaturan awal.

3. Pemodelan Sistem dan Simulasi

Tahap ini adalah pemodelan Diagram satu garis sistem, dan penentuan tipikal pada perangkat lunak ETAP 12.6. Setelah proses pengumpulan data dan pemodelan sistem dengan perangkat lunak, dilakukan simulasi untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan.

4. Analisis

Pada tahap ini, Data-data hasil simulasi yang telah diperoleh, seperti data aliran daya dan hubungan singkat, digunakan untuk analisis sistem kelistrikan dan untuk pengaturan serta koordinasi rele-rele pengaman pada sistem. Setelah rele-rele pengaman dikoordinasikan, dilakukan pemodelan skema dengan berbagai macam gangguan dan letak gangguan untuk mengetahui apakah koordinasi pengaman telah tepat. Selanjutnya dapat dilakukan analisis terhadap besarnya insiden energi Busur Api yang timbul pada sistem. Besar energi Busur Api akan di sesuaikan dengan standar *IEEE 1584-2002*, dan penentuan APD berdasarkan standar *NFPA 70E-2015*.

5. Penyusunan Laporan

Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan laporan terkait hasil analisis dan kesimpulan tugas akhir yang telah dilakukan. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil tugas akhir.

## 1.6 Sistematika

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

### **BAB I : Pendahuluan**

Pada bab 1 ini berisikan latar belakang tugas akhir, rumusan dan batasan masalah, tujuan yang ingin dicapai, metodologi, sistematika pembahasan.

### **BAB 2 : Sistem Pengaman Tenaga Listrik dan Energi Busur Api**

Pada bab 2 ini membahas literatur-literatur dan teori dasar yang berguna sebagai acuan dalam tugas akhir ini. Pada bab ini dibahas tentang gangguan-gangguan pada sistem tenaga listrik, sistem pengaman dan koordinasi pengaman tenaga listrik, serta energi Busur Api sesuai standar *IEEE 1584-2002* dan perlindungan terhadap Busur Api sesuai standar *NFPA 70E-2015*.

### **BAB 3 : Sistem Kelistrikan PT. PJB UBJOM PLTU Rembang**

Pada bab 3 ini membahas tentang sistem kelistrikan di PT. PJB UBJOM PLTU Rembang meliputi, konfigurasi sistem, kapasitas pembangkit, sistem distribusi tenaga listrik, dan data beban.

### **BAB 4 : Simulasi dan Analisis Busur Api pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang**

Pada bab 4 ini membahas mengenai analisis koordinasi pengaman dan analisis perhitungan energi Busur Api pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, serta rekomendasi jarak aman dan alat perlindungan diri untuk pekerja berdasarkan standar.

### **BAB 5 : Penutup**

Pada bab 5 ini berisikan kesimpulan dari pembahasan, simulasi dan analisis yang telah dilakukan. Pada bab ini juga terdapat saran terkait hasil dari tugas akhir untuk hasil yang lebih baik kedepannya.

## **1.7 Relevansi atau manfaat**

Dari hasil tugas akhir ini nantinya diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi PT. PJB UBJOM PLTU Rembang dalam melakukan pengaturan pengaman pada sistem kelistrikannya
2. Dapat mengetahui besar energi Busur Api yang terjadi pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, sehingga didapatkan rekomendasi Alat Pelindung Diri (APD) dan working distance yang aman untuk pekerja.

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

Dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal adanya bahaya Busur Api yang disebabkan oleh gangguan hubungan singkat. Dalam tingkat multi-tegangan (tegangan menengah dan rendah) sistem distribusi listrik, energi Busur Api dapat dikurangi menjadi 8 kal/cm<sup>2</sup> atau bahkan kurang. Hal ini dilakukan untuk menurunkan tingkat resiko insiden terhadap pekerja maupun alat, dan menyesuaikan pakaian Alat Pelindung Diri (APD). Untuk mengurangi bahaya Busur Api ke level yang lebih rendah ini, dilakukan perubahan dalam desain dan sistem pengamanan yang sedang digunakan. Dengan menganalisis sistem pengamanan, tabel dan plot koordinasi waktu yang telah disediakan, maka akan didapatkan desain sistem dan batas waktu perlindungan rele yang baru [1]. Satuan skema perlindungan dan panduan praktis untuk pengurangan *flash* busur disediakan. Itu metodologi IEEE 1584 [2] digunakan untuk analisis

#### **2.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik**

Gangguan pada sistem tenaga listrik adalah suatu kondisi abnormal yang menyebabkan terjadinya diskontinyu pada sistem pendistribusian tenaga listrik. Berdasarkan sifatnya, gangguan sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu temporer dan permanen. Sedangkan berdasarkan sumber gangguan, dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu: [3]

a. Faktor internal, contoh:

- 1) Arus dan tegangan yang tidak normal
- 2) Instalasi sistem tenaga listrik yang kurang tepat
- 3) Kesalahan mekanis yang disebabkan oleh usia pemakaian peralatan
- 4) Penggunaan beban yang berlebih
- 5) Kerusakan pada material peralatan

b. Faktor eksternal, contoh:

- 1) Gangguan yang terjadi akibat kesalahan manusia (*human error*).
- 2) Gangguan pada saluran udara yang disebabkan oleh cuaca seperti hujan, angin atau petir, yang menyebabkan hubungan singkat pada saluran.

- 3) Gangguan yang disebabkan oleh lingkungan seperti pohon, binatang, dan benda-benda asing.

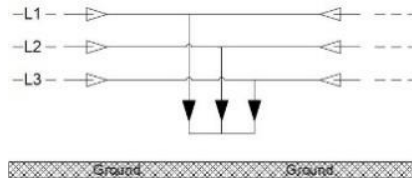
### 2.1.1 Hubungan Singkat

Hubungan singkat merupakan peristiwa hubungan konduksi secara sengaja atau tidak disengaja antara dua atau lebih konduktor yang berbeda potensial yang memaksa menjadi sama atau mendekati nol [4]. Jika terjadi hubungan singkat di suatu titik (bus atau terminal) maka generator, motor sinkron, dan motor induksi akan memberikan arus kontribusi ke bus tersebut sehingga bus tersebut mengkalkulasi arus-arus kontribusi yang mengalir sehingga total arus yang mengalir semakin besar.

Sedangkan menurut jenisnya, hubungan singkat sistem tenaga listrik 3 fasa dibedakan menjadi lima macam: [4]

1. Hubungan singkat tiga fasa

Hubungan singkat tiga fasa melibatkan konduktor ketiga fasa yang saling terhubung. Hubungan singkat tiga fasa dapat diperlihatkan pada gambar 2.1



**Gambar 2.1** Hubungan singkat tiga fasa

Arus hubungan singkat tiga fasa ( $I_{sc_{3\phi}}$ ) dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

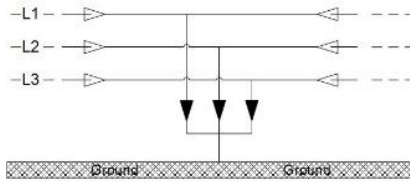
$$I_{sc_{3\phi}} = \frac{VLN}{Z_1} \quad (2.1)$$

$VLN$  = Tegangan nominal line to neutral

$Z_1$  = Impedansi urutan positif

2. Hubungan singkat tiga fasa ke tanah

Hubungan singkat ini terjadi pada kondisi ketiga fasa dan tanah terhubung dalam satu titik. Hubungan singkat tiga fasa dapat diperlihatkan pada gambar 2.2



**Gambar 2.2** Hubungan singkat tiga fasa dengan tanah

Arus hubungan singkat tiga fasa ke tanah ( $I_{sc_{3\phi g}}$ ) dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{sc_{3\phi g}} = \frac{VLN}{Z_1 + Z_g} \quad (2.2)$$

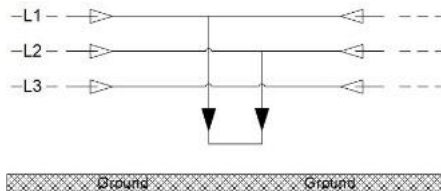
VLN = Tegangan nominal line to netral

$Z_1$  = Impedansi urutan positif

$Z_g$  = Impedansi pentanahan

3. Hubungan singkat dua fasa

Hubungan singkat dua fasa atau disebut juga dengan hubungan singkat antar fasa terjadi apabila dua konduktor fasa saling terhubung. Hubungan singkat dua fasa dapat diperlihatkan pada gambar 2.3



**Gambar 2.3** Hubungan singkat dua fasa

Arus hubungan singkat antar fasa ( $I_{sc_{2\phi}}$ ) didapatkan persamaan berikut:

$$I_{sc_2} = \frac{VLL}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{sc_3} \approx 0,86 \times I_{sc_3} \quad (2.3)$$

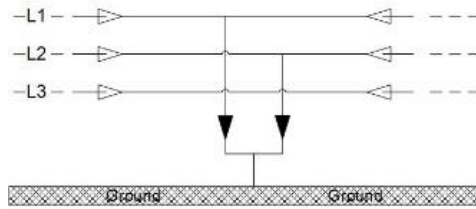
VLL = tegangan line to line

$Z_1$  = impedansi urutan positif

$Z_2$  = impedansi urutan negatif

4. Hubungan singkat dua fasa ke tanah

Hubungan singkat dua fasa ke tanah terjadi pada saat dua konduktor fasa dan tanah terhubung dalam satu titik. Hubungan singkat dua fasa ke tanah dapat diperlihatkan pada gambar 2.4



**Gambar 2.4** Hubungan singkat dua fasa ke tanah

Arus hubungan singkat dua fasa ke tanah ( $I_{sc_{2\phi g}}$ ) didapatkan persamaan berikut :

$$I_{sc_{2\phi g}} = \frac{VLN}{Z_1 + \left( \frac{Z_2 \times Z_0}{Z_2 + Z_0} \right)} \quad (2.4)$$

VLN = Tegangan nominal line to neutral

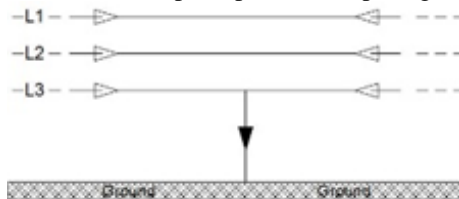
$Z_1$  = Impedansi urutan positif

$Z_2$  = Impedansi urutan negative

$Z_0$  = Impedansi urutan nol.

5. Hubungan singkat satu fasa ke tanah

Hubungan singkat ini terjadi apabila satu konduktor fasa terhubung dengan tanah dalam satu titik. Karena melibatkan impedansi urutan nol ( $Z_0$ ), maka besarnya arus hubungan singkat ini tergantung sistem pentanahan yang digunakan. Hubungan singkat satu fasa ke tanah dapat diperlihatkan pada gambar 2.5



**Gambar 2.5** Hubungan singkat satu fasa ke tanah

Arus hubungan singkat satu fasa ke tanah ( $I_{sc_{1\phi g}}$ ) didapatkan persamaan berikut:

$$I_{sc_{1\phi g}} = \frac{3VLN}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.5)$$

VLN = Tegangan nominal line to neutral

$Z_1$  = impedansi urutan positif

$Z_2$  = impedansi urutan negatif

$Z_0 = \text{impedansi urutan nol}$

## 2.2 Pengaman Sistem Tenaga

Dalam mengatasi bahaya yang disebabkan oleh gangguan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik, maka diperlukan pengamanan pada sistem pendistribusian tenaga listrik. Salah satunya dengan pemasangan rele pengaman. Sistem pengaman ini harus dirancang dengan baik agar rele pengaman dapat bekerja sesuai dengan fungsinya, sehingga keamanan dan keandalan sistem dapat terjaga.

Oleh karena itu dalam pengoperasiannya peralatan rele pengaman sistem tenaga listrik harus memenuhi syarat-syarat berikut: [5]

1. Cepat, yaitu rele harus dapat beroperasi dengan cepat pada saat terjadi gangguan sampai pelepasan pemutus (PMT). Dimana terkadang diperlukan kelambatan waktu seperti persamaan berikut:

$$t_{op} = t_p + t_{cb}$$

keterangan:

$t_{op}$  = waktu total

$t_p$  = waktu beraksi dari unit rele

$t_{cb}$  = waktu pelepasan CB

2. Kepekaan (Sensitivity), yaitu rele harus mampu memberikan respon pada saat terjadi gangguan.

$$K_s = I_{hsmin}/I_{pp}$$

keterangan:

$K_s$  = Kepekaan

$I_{hs min}$  = Arus hubungan singkat minimum

$I_{pp}$  = Arus pick-up pada sisi primer trafo arus

3. Selektifitas, yaitu kemampuan rele pengaman untuk mengetahui titik dimana gangguan terjadi dan memutuskan rangkaian dengan membuka CB terdekat.
4. Handal, yaitu jumlah rele yang berkerja atau mengamankan gangguan harus sama dengan jumlah titik yang mengalami gangguan. Keandalan yang baik adalah 90-99 %.
5. Ekonomis, yaitu selain memenuhi syarat di atas, rele juga harus disesuaikan dengan harga peralatan yang diamankan.

Operasi pemutus rangkaian dikendalikan oleh rele yang merasakan adanya gangguan. Dalam penerapan rele daerah (*zone*) pengamanan ditentukan untuk mendefinisikan bagian-bagian sistem yang menjadi tanggung jawab berbagai rele. Suatu rele juga akan mendukung rele yang lain dalam daerah yang bersebelahan atau daerah-

daerah di mana gangguan terjadi dan rele pada daerah bersebelahan itu gagal untuk menanggapi [6]. Skema kerja rele dapat dipelihatkan pada gambar 2.6



**Gambar 2.6** Skema kerja rele

### 2.3 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih atau biasa disebut dengan OCR adalah suatu rele yang digunakan untuk mendeteksi adanya gangguan pada sistem penyaluran tenaga listrik yang disebabkan oleh arus yang berlebih. Rele ini beroperasi pada saat kondisi sebagai berikut: [5]

If > Ip, rele akan bekerja (trip)

If < Ip, rele tidak akan bekerja (blok)

Dimana,

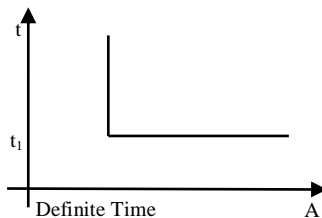
If = Arus gangguan yang dirasakan oleh sisi sekunder trafo arus (CT)

Ip = Arus kerja rele yang dinyatakan pada sisi sekunder trafo (CT)

#### 2.3.1 Karakteristik Rele Arus Lebih [5]

##### 1. *Definite Time*

Merupakan rele arus lebih yang dapat diatur waktu operasinya sesuai dengan level arus yang berbeda. Semua level arus yang melebihi *pickup setpoint*-nya akan diputuskan dalam waktu yang sama (*definite*). Sehingga rele ini lebih sensitif dalam memutus gangguan yang terjadi pada sistem pendistribusian tenaga listrik [5]. Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik rele arus lebih waktu tertentu.

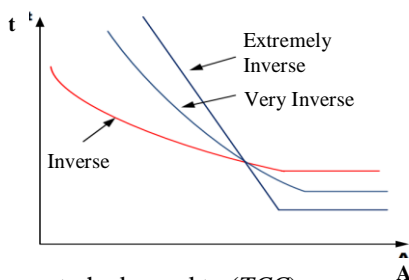


**Gambar 2.7** karakteristik rele arus lebih waktu tertentu

##### 2. *Inverse Time*



Merupakan rele arus lebih yang memiliki waktu inverse terhadap arus dalam pengoperasiannya. Sehingga semakin besar arus gangguan yang dirasakan maka akan semakin kecil waktu yang diperlukan rele ini untuk beroperasi, begitu pula sebaliknya [7]. Dalam standar IEC 60255-3 dan BS 142 dijelaskan bahwa untuk mendefinisikan beberapa jenis perlindungan waktu inverse maka dikelompokkan menjadi tiga standar, yaitu *standart inverse*, *very inverse* dan *extremely inverse* [8]. Untuk menjelaskan karakteristik kerja rele arus lebih waktu inverse digambarkan dalam kurva arus terhadap waktu (*TCC*). Kurva *TCC* dapat dilihat pada gambar

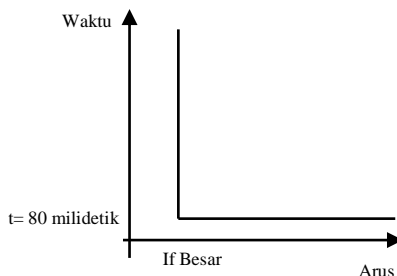


**Gambar 2.8** Kurva arus terhadap waktu (*TCC*)

### 3. *Instantaneous Time*

Rele ini merupakan rele yang bekerja tanpa penundaan waktu, namun rele ini masih bekerja dalam waktu yang sangat singkat yaitu 0.1 detik. Pada umumnya rele ini digunakan dalam waktu kurang dari 0.08 detik [8].

Rele dengan karakteristik ini bekerja sesuai dengan besarnya arus gangguan yang dipilih. Biasanya rele ini dikombinasikan dengan rele yang lain untuk mendapatkan hasil dari sistem pengaman yang lebih handal. Kurva dari rele arus lebih *instantaneous time* dapat dijelaskan pada gambar.



**Gambar 2.9** Kurva rele arus lebih *instantaneous time*

**4. Pengaturan Rele Arus Lebih [5]**

Untuk memperoleh sistem pengamanan yang tepat, maka rele arus lebih harus diatur nilai nominal arus dan waktu trip, serta terkoordinasi antara rele satu dengan yang lainnya dengan benar. Sehingga diperlukan perhitungan yang tepat untuk menentukan berapa nilai arus dan waktu yang diperlukan rele untuk beroperasi. Berdasarkan *British standart BS – 142* rentang pengaturan arus lebih bernilai antara 1,05 – 1,3 kali dari FLA. Rele arus lebih yang umum digunakan adalah kombinasi dari rele arus lebih *inverse time* dan rele arus lebih *instantaneous time*.

Pada rele arus lebih *inverse time* terdapat dua bagian pengaturan yaitu pengaturan arus pick up ( $I_{pu}$ ) dan pengaturan time dial (TD). Pengaturan arus pick up rele arus lebih adalah sebagai berikut [9].

$$1,05 \times FLA < I_{pu} < 1,3 \times FLA \quad (2.6)$$

Dengan mempertimbangkan nilai tap pada trafo arus, sehingga nilai pengaturan arus pick up rele arus yaitu.

$$I_{set} = \frac{I_{pu}}{CT_{primary}} \quad (2.7)$$

Sedangkan time dial digunakan untuk menentukan waktu rele arus lebih *inverse time* untuk bekerja. Terdapat dua standar yang biasa digunakan untuk menentukan time dial pada rele yaitu standar ANSI dan standar IEC. Tabel 2.1 dan 2.2 menunjukkan pengaturan *time dial* rele arus lebih.

**Tabel 2.1** Pengaturan *time dial* rele arus lebih standar ANSI

No	Tipe	Persamaan	Standar
1	<i>Standart Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( 0,0226 + \frac{0,0104}{M^{0,02} - 1} \right)$	ANSI
2	<i>Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( 0,18 + \frac{5,95}{M^2 - 1} \right)$	ANSI
3	<i>Very Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( 0,0963 + \frac{3,88}{M^2 - 1} \right)$	ANSI

4	<i>Extremly Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( 0,0352 + \frac{5,67}{M^2 - 1} \right)$	ANSI
5	<i>Short-time Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( 0,00262 + \frac{0,00342}{M^{0,02} - 1} \right)$	ANSI

**Tabel 2.2** Pengaturan *time dial* rele arus lebih standar IEC

No	Type	Persamaan	Standar
1	<i>Standart Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( \frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \right)$	IEC
2	<i>Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( \frac{13,5}{M - 1} \right)$	IEC
3	<i>Very Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( \frac{80}{M^2 - 1} \right)$	IEC
4	<i>Extremly Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( \frac{120}{M^2 - 1} \right)$	IEC
5	<i>Short-time Inverse</i>	$T_d = T_D \times \left( \frac{0,05}{M^{0,04} - 1} \right)$	IEC

Pengaturan *time dial* pada rele arus lebih tergantung pada masing-masing pabrikan dan nilai *time dial* rele arus lebih ini ditentukan dengan persamaan *time delay* rele arus lebih

Keterangan :

$T_d$  = *Time Delay*

$T_D$  = *Time Dial*

$$M = \frac{I_{sc,max}}{I_{set}} \quad (2.8)$$

## 2.4 Busur Api

Definisi dari Busur Api (*Arc Flah*) adalah pelepasan energi panas yang sangat tinggi akibat adanya *arc fault* ataupun *bolted fault*. *Arc fault* sendiri merupakan arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor dengan konduktor atau konduktor dengan tanah. Sedangkan

*bolted fault* menggunakan perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya.

Efek yang dihasilkan *arc* dapat berupa radiasi panas, cahaya yang menyilaukan, dan tekanan yang sangat besar. Temperatur dari radiasi panas yang dihasilkan dapat mencapai sekitar 35.000 ° F, atau sekitar empat kali panas permukaan matahari. Temperatur yang tinggi juga merubah keadaan konduktor dari padat ke logam cair panas dan uap.

Penting untuk memprediksi besarnya energi yang dihasilkan pada suatu bus akibat Busur Api. Beberapa variabel yang mempengaruhinya meliputi arus *bolted fault* atau arus hubungan singkat maksimum, waktu peralatan pengaman untuk menghilangkan gangguan, jarak antar konduktor, tegangan sistem, dan jarak titik *arc* ke pekerja.

#### 2.4.1 Perhitungan Energi Busur Api Berdasarkan Standar *IEEE 1584-2002*

Arus Busur Api adalah arus gangguan selama terjadi Busur Api yang melewati plasma. Arus Busur Api pada titik pusat dan berapa bagian arus yang melalui peralatan pelindung pertama harus ditentukan. Arus gangguan Busur Api tergantung pada *bolted fault current*. *Bolted fault current* di peralatan pengaman dapat ditentukan dari studi arus hubungan singkat dengan melihat satu bus gangguan.

Perhitungan arus pencetus merupakan langkah awal dalam perhitungan level energi Busur Api. Nilai arus pencetus diperoleh berdasarkan arus hubungan singkat tiga fasa. Berikut adalah persamaan untuk menghitung arus pencetus [10]:

Untuk sistem dengan level tegangan < 1 kV,

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V (\log I_{bf}) - 0,00304G (\log I_{bf}) \quad (2.9)$$

Sedangkan untuk sistem dengan level tegangan > 1 kV digunakan persamaan berikut:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (2.10)$$

Keterangan:

$I_a$  = arus pencetus (kA)

K = konstanta (-0.153 untuk konfigurasi terbuka dan -0.097 untuk konfigurasi dalam ruang)

- $I_{bf}$  = bolted fault current (kA)  
 $V$  = tegangan sistem (kV)  
 $G$  = jarak antar konduktor (mm)

### 2.4.2 Insiden Energi

Insiden energi adalah sebuah nilai yang menunjukkan informasi yang dapat digunakan untuk menentukan pakaian pelindung seperti apa yang dibutuhkan dan juga dapat digunakan dalam pelaksanaan analisis resiko. Perhitungan nilai insiden energi Busur Api pada sistem dengan level tegangan di bawah 15 kV menggunakan dua persamaan. Pertama menentukan  $\log_{10}$  *normalized*. Persamaan ini berdasarkan data *normalized* untuk waktu pencetusan 0.2 detik dan jarak dari titik pencetusan ke pekerja sejauh 610 mm. Persamaannya sebagai berikut:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1081 \log I_a + 0,0011G \quad (2.11)$$

Setelah didapat nilai  $E_n$ , selanjutnya dapat dihitung nilai insiden energi saat terjadi gangguan dan persamaannya adalah sebagai berikut:

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.12)$$

Keterangan:

- $E_n$  = insiden energi *normalized* untuk waktu dan jarak (J/cm<sup>2</sup>)  
 $K_1$  = konstanta [-0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*) dan -0,555 untuk konfigurasi *box* (*enclosed equipment*)]  
 $K_2$  = konstanta (0 untuk sistem *ungrounded* dan *high-resistance grounded* sedangkan -0,113 untuk sistem *grounded*)  
 $G$  = jarak antar konduktor (mm)  
 $E$  = insiden energi (J/cm<sup>2</sup>)  
 $C_f$  = faktor pengali (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV dan 1.5 untuk tegangan di bawah 1 kV)  
 $t$  = waktu pencetusan (detik)  
 $D$  = jarak antara titik pencetusan dengan pekerja (mm)  
 $x$  = jarak eksponen

**Tabel 2.3** Faktor Untuk Peralatan dan Tingkat Tegangan [16]

Tegangan Sistem (kV)	Jenis Peralatan	Jarak antar Konduktor (mm)	Faktor Jarak X
----------------------	-----------------	----------------------------	----------------

0,208-1	Udara terbuka	10-40	2
	<i>Switchgear</i>	32	1,473
	<i>MCC</i> dan panel	25	1,641
	Kabel	13	2
>1-5	Udara terbuka	102	2
	<i>Switchgear</i>	13-102	0,973
	Kabel	13	2

Lanjutan tabel 2.3

>5-15	Udara terbuka	13-153	2
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	Kabel	13	2

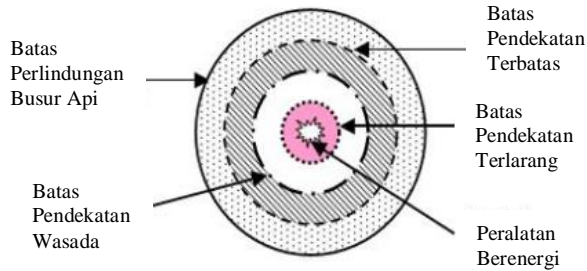
**Tabel 2.4** Tipikal Jarak Bekerja [16]

<b>Kelas Peralatan</b>	<b>Tipikal Jarak Bekerja (mm)</b>
15 kV <i>Switchgear</i>	910
5 kV <i>Switchgear</i>	910
<i>Low Voltage Switchgear</i>	610
<i>Low Voltage MCCs and Panelboard</i>	455
<i>Cable</i>	455
<i>Other</i>	<i>To be Determined in Field</i>

### 2.4.3 Batas Jarak Perlindungan Busur Api

Batas jarak perlindungan terhadap titik Busur Api disebut batas perlindungan busur api. Ini merupakan batas jarak tertentu dengan konduktor aktif yang memungkinkan seseorang terpapar bahaya Busur Api (Busur Api *Hazard*). Batasan jarak ini dapat dikategorikan setelah nilai insiden energi Busur Api diketahui. Untuk meningkatkan kewaspadaan terhadap bahaya Busur Api, pengetahuan tentang batas perlindungan busur api sangat penting untuk dipahami sebagai upaya perlindungan baik terhadap peralatan maupun terhadap personal[6].

Pada gambar 2.10 terdapat ilustrasi batas aman dari konduktor yang bertegangan.



**Gambar 2.10** Ilustrasi batas aman dari konduktor bertegangan.

Batas perlindungan busur api seperti terlihat pada gambar 2.1, meliputi:

1. Batas Pendekatan Terbatas

Merupakan batas perlindungan untuk tidak dilewati oleh orang-orang yang tidak memenuhi syarat kecuali diawasi oleh orang-orang yang berpengalaman. Area ini batas pendekatan jarak dari bagian konduktor aktif dimana terdapat sebuah bahaya sengatan listrik.

2. Batas Pendekatan Wasada

Batas perlindungan yang hanya boleh dilewati oleh orang-orang yang berpengalaman dan saat melintasi batas ini harus mengenakan pakaian dan peralatan yang dibutuhkan. Peningkatan Busur Api dapat terjadi dikarenakan kombinasi Busur Api dengan gerakan pekerja yang tidak sengaja.

3. Batas Pendekatan Terlarang

Batas pendekatan/perlindungan jarak dari bagian konduktor aktif dimana pekerja dianggap seperti melakukan kontak langsung dengan konduktor aktif.

4. Batas perlindungan busur api

Merupakan batas perlindungan, dimana tingkat Insiden Energi sama dengan  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ . Area ini memungkinkan pekerja mengalami dampak cedera parah jika terjadi Busur Api.

*Flash boundary* dapat dengan mudah dihitung ketika insiden energi Busur Api telah diketahui. Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan ketika level tegangan  $<15 \text{ kV}$  [6]:

$$D_B = \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.13)$$

Sedangkan untuk level tegangan >15 kV menggunakan persamaan berikut [11]:

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 V \times I_{bf} \left( \frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.14)$$

Dimana:

- $D_B$  = jarak batas dari titik pencetusan (mm)
- $C_f$  = faktor pengali (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV dan 1.5 untuk tegangan di bawah 1 kV)
- $E_n$  = Insiden Energi *normalized*
- $E_B$  = insiden energi dalam  $J/cm^2$  pada jarak *boundary*.  $E_B$  diset 5  $J/cm^2$  ( $5 J/cm^2 = 1.2 cal/cm^2$ )
- $t$  = waktu pencetusan (detik)
- $x$  = jarak eksponen
- $I_{bf}$  = *bolted fault current* (kA)

#### 2.4.4 Pengelompokan Tingkatan Energi Busur Api Terhadap APD (Alat Pelindung Diri)

Kategori bahaya atau resiko Busur Api ditentukan menggunakan nomor yang mewakili tingkat bahaya berdasarkan insiden energi. Kategori 0 merepresentasikan adanya bahaya sedikit atau bahkan tidak ada. Sedangkan kategori 4 adalah yang paling berbahaya. Tabel 2.3 menunjukkan klasifikasi resiko yang mengacu pada standar *NFPA 70E 2015* berdasarkan referensi [3]. Para pekerja harus mempersiapkan diri dengan peralatan serta perlengkapan sesuai dengan kategori resiko sebelum memulai pekerjaan atau inspeksi didekat area yang bertegangan. Dokumentasi dan label peringatan juga diperlukan.

**Tabel 2.5** Pengelompokan Kategori Resiko Sesuai dengan *NFPA 70E 2015*

Kategori	Minimum Energi (Cal/cm <sup>2</sup> )	APD – PCC yang Dibutuhkan
----------	---------------------------------------	---------------------------



1	4	<p>PPC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang dan celana yang memiliki ketahanan terhadap Busur Api atau penutup seluruh tubuh yang tahan api</li> <li>2. Jaket yang tahan api</li> </ol> <p>APD:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Helem <i>safety</i></li> <li>2. Kacamata <i>safety</i></li> <li>3. Pelindung pendengaran</li> <li>4. Sarung tangan kulit untuk pekerjaan berat</li> <li>5. Sepatu kulit</li> </ol>
---	---	--

Lanjutan tabel 2.5

2	8	<p>PCC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang dan celana yang tahan api atau penutup seluruh tubuh, pelindung wajah, dan balaclava</li> <li>2. Jaket yang tahan api</li> </ol> <p>PEE:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Helm <i>safety</i></li> <li>2. Kacamata <i>safety</i></li> <li>3. Pelindung pendengaran</li> <li>4. Sarung tangan kulit</li> <li>5. Sepatu kulit</li> </ol>
3	25	<p>PPC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang tahan api, celana yang tahan api, penutup seluruh tubuh yang tahan api, pelindung wajah yang tahan api</li> <li>2. Jaket yang tahan api</li> </ol> <p>APD:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Helm <i>safety</i></li> <li>2. Kacamata <i>safety</i></li> <li>3. Pelindung pendengaran</li> <li>4. Sepatu kulit</li> </ol>
4	40	<p>PPC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang tahan api, celana yang tahan api, penutup seluruh tubuh yang tahan api</li> <li>2. Sarung tangan yang tahan api</li> </ol>

		3. Jaket yang tahan api APD: 1. Helm safety 2. Kacamata <i>safety</i> 3. Pelindung pendengaran 4. Sepatu kulit
--	--	---

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

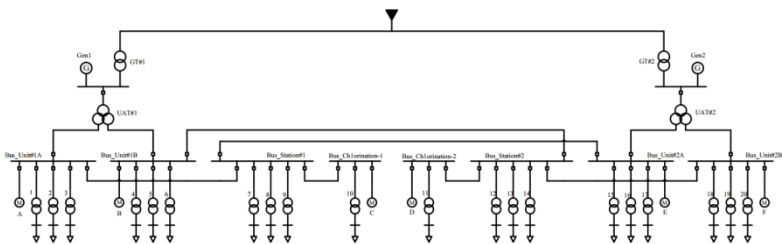
## BAB 3

### SISTEM KELISTRIKAN PLTU REMBANG

#### 3.1 Sistem Kelistrikan

PLTU Rembang merupakan salah satu pembangkit listrik yang dibangun guna mengurangi defisit energi yang berada di pulau Jawa. PLTU Rembang sebagai sub unit juga berperan menyuplai daya pada jaringan transmisi 150 kV untuk mencukupi kebutuhan pelanggan, khususnya di sistem Jawa Tengah (Pati dan Rembang).

Untuk menjalankan proses produksi energi listrik yang optimal, PLTU Rembang membutuhkan energi listrik untuk kebutuhan peralatan bantu seperti motor-motor dan kebutuhan energi listrik pada gedung-gedung yang terdapat pada kawasan PLTU Rembang. Untuk memenuhi energi listrik pada PLTU Rembang, sistem kelistrikan pada PLTU Rembang disuplai dengan three winding trafo (UAT) untuk menurunkan tegangan dari generator ke beban sesuai level tegangan yang dibutuhkan beban. Gambar 3.1 merupakan sistem kelistrikan pada PLTU Rembang.



**Gambar 3.1** SLD sistem kelistrikan pada PLTU Rembang

#### 3.2 Data Peralatan

Sistem kelistrikan pada PLTU Rembang terdapat peralatan utama seperti generator, trafo utility (UAT) dan trafo daya (GT), serta beban.

### 3.2.1 Generator

Pada PLTU Rembang terdapat dua generator dengan kapasitas masing – masing unit sebesar 315 MW. Data dari generator PLTU Rembang diperlihatkan pada tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3.1** Data generator PLTU Rembang

No	ID	Daya (MW)	Tegangan (kV)	FLA (Amper)	Cos $\phi$	Xd'' (%)
1	Gen 1	315,8	20	10725	0,85	15,58
2	Gen 2	315,8	20	10725	0,85	15,58

### 3.2.2 Trafo

Sistem kelistrikan tegangan menengah pada terdapat PLTU Rembang. Terdapat dua tarfo dengan jenis *three-winding* trafo yang digunakan untuk pemakaian sendiri dan trafo untuk menurunkan dari tegangan menengah ke tegangan rendah. Tabel 3.2 menunjukkan data trafo sistem kelistrikan PLTU Rembang.

**Tabel 3.2** Data Trafo PLTU Rembang

No	ID	Daya (MV A)	Tegangan (kV)	FLA (Amper)	Z (%)
1	UAT 1	40/50	20/6,6/6,6	1443,4/2186,9/2186,9	17,4
2	UAT 2	40/50	20/6,6/6,6	1443,4/2186,9/2186,9	17,4
3	UST-1A1	1,6	6,3/0,42	146,6/2199,4	6,2
4	UST-1B1	1,6	6,3/0,42	146,6/2199,4	6,2
5	UST-1A2	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7
6	UST-1B2	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7
7	ESP-1A	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
8	ESP-1B	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
9	SST-A1	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
10	SST-B1	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
11	ADM-1A	0,63	6,3/0,42	57,7/866,03	5
12	ADM-1B	0,63	6,3/0,42	57,7/866,03	5
13	CIT-1A	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7
14	CIT-1B	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7
15	SST-A2	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
16	SST-B2	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
17	ESP-2A	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3
18	ESP-2B	2,5	6,3/0,42	229,1/3436,6	9,3

Lanjutan tabel 3.2

19	UST-2A1	1,6	6,3/0,42	146,6/2199,4	6,2
20	UST-2B1	1,6	6,3/0,42	146,6/2199,4	6,2
21	UST-2A2	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7
22	UST-2B2	2	6,3/0,42	183,3/2749,3	7,7

### 3.2.3 Kabel

Data kabel yang digunakan pada sistem kelistrikan PLTU Rembang dapat dilihat pada table 3.3.

**Tabel 3.3** Data kabel sistem kelistrikan PLTU Rembang

No	ID	Cable Type	Size (Sqmm)	Lengt (m)
1	UST-1A1	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	30
2	UST-1B1	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	30
3	UST-1A2	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	195
4	UST-1B2	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	210
5	ESP-1A	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	300
6	ESP-1B	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	325
7	SST-A1	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	150
8	SST-B1	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	150
9	ADM-1A	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	325
10	ADM-1B	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	325
11	CIT-1A	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	50
12	CIT-1B	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	50
13	SST-A2	6.3 kV, XLPE AL ARMOURED (UE)	3C X 185	150

Lanjutan tabel 3.3

14	SST-B2	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	150
15	ESP-2A	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	250
16	ESP-2B	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	265
17	UST-2A1	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	30
18	UST-2B1	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	30
19	UST-2A2	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	135
20	UST-2B2	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 185	120
21	00BCC10	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 240	475
22	00BCD10	6.3 kV, XLPE AL ARMoured (UE)	3C X 240	475

### 3.2.4 Beban

Pada sistem kelistrikan PLTU Rembang terdapat juga motor induksi yang berguna untuk membantu proses produksi tenaga listrik. Untuk lebih jelasnya dapat dijelaskan pada tabel 3.4 berikut.

**Tabel 3.4** Motor-motor induksi tegangan 6,3 kV

No	ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	FLA (Amper)
Bus UNIT #1A				
1	MILL-1	520	6,3	97,1
2	MILL-2	520	6,3	97,1
3	MILL-3	520	6,3	97,1
4	CCP-1A	280	6,3	31,7
5	CEP-1A	1000	6,3	105,3
6	PA FAN-1A	1700	6,3	176,5
7	FD FAN-1A	450	6,3	51,15
8	ID FAN-1A	2150	6,3	233
9	IAC-1	250	6,3	29,95
10	SAC-1	250	6,3	29,95

Lanjutan tabel 3.4

Bus UNIT #1B				
1	MILL-4	520	6,3	97,1
2	MILL-5	520	6,3	97,1
3	CCP-1B	280	6,3	31,7
4	CEP-1B	1000	6,3	105,3
5	PA FAN-1B	1700	6,3	176,5
6	FD FAN-1B	450	6,3	51,15
7	ID FAN-1B	2150	6,3	233
8	IAC-3	250	6,3	29,95
9	BFP-1B	3300	6,3	346
Bus CLH -1				
1	DP 1A	200	6,3	22,8
2	DP 1B	200	6,3	22,8
3	CWP 1A	1800	6,3	221,2
4	CWP 1B	1800	6,3	221,2
Bus UNIT #2A				
1	MILL-1	520	6,3	97,1
2	MILL-2	520	6,3	97,1
3	MILL-3	520	6,3	97,1
4	CCP-2B	280	6,3	31,7
5	CEP-2B	1000	6,3	105,3
6	PA FAN-2B	1700	6,3	176,5
7	FD FAN-2B	450	6,3	51,15
8	ID FAN-2B	2150	6,3	233
9	SAC-3	250	6,3	29,95
Bus UNIT #2B				
1	MILL-4	520	6,3	97,1
2	MILL-5	520	6,3	97,1
3	CCP-2A	280	6,3	31,7
4	CEP-2A	1000	6,3	105,3
5	PA FAN-2A	1700	6,3	176,5
6	FD FAN-2A	450	6,3	51,15
7	ID FAN-2A	2150	6,3	233
8	IAC-2	250	6,3	29,95
9	SAC-2	250	6,3	29,95
10	BFP-2A	3300	6,3	346

Lanjutan tabel 3.4

Bus CLH -2				
1	DP 2A	200	6,3	22,8
2	DP 2B	200	6,3	22,8
3	CWP 2A	1800	6,3	221,2
4	CWP 2B	1800	6,3	221,2

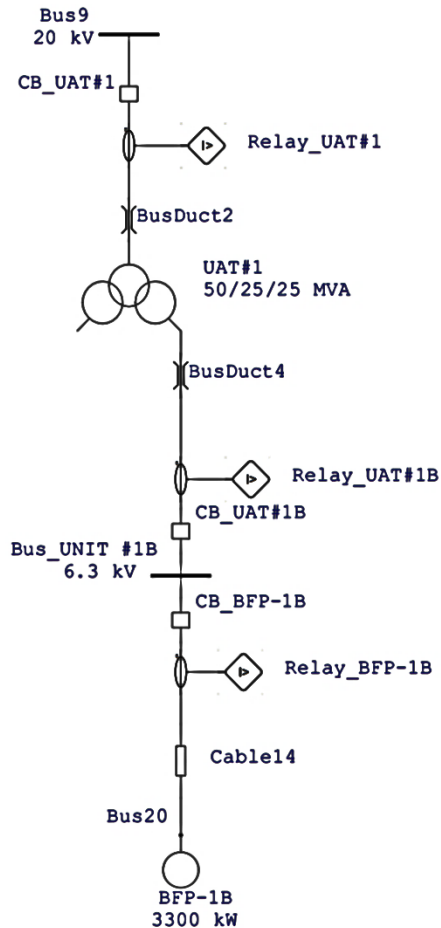




### 4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

#### 4.3.1 Analisis Tipikal 1A

Pada tipikal 1A ini akan dilakukan analisis mengenai sistem pengaman yang terletak pada beban motor BFP sampai Bus9. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.2



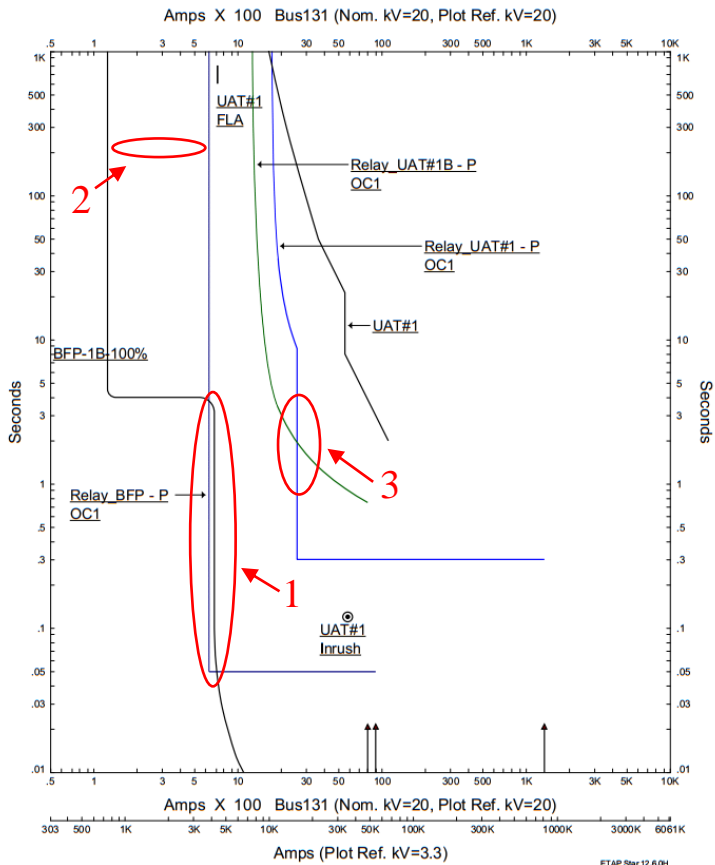
**Gambar 4.2** Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 1A

Data pengaturan awal pengaturan rele arus lebih dapat dilihat pada table 4.1 dibawah ini:

**Tabel 4.1** Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 1A

Rele ID & Model	Pengaturan	
Rele_BFP ABB REM 543	Tipe kurva	Definite Time
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	5
	Rele Amper	25 – 2000
	Time Dial	0,05
	Instantaneous (NA)	
Rele_UAT#1B ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	1
	Rele Amper	0,9 – 3600
	Time Dial	0,2
	Instantaneous (NA)	
Rele_UAT#1 AREVA P121	Tipe kurva	Very Inverse
	Pick Up Range	0,1 - 25
	Pick Up	0,69
	Rele Amper	0,7 - 1750
	Time Dial	0,5
	Instantaneous	
	Pick Up Range	0,5 – 40
	Pick Up	1,05
	Rele Amper	1,26 – 3150
	Time Delay	0,3

Pada koordinasi pengaman rele arus lebih tipikal 1A terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih perlu diperbaiki. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva *TCC* pengaman arus lebih pada gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Kurva *TCC* pengaturan rele pengaturan awal tipikal 1A

Dari hasil plot kurva *TCC* rele arus lebih Tipikal 1A dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu arus *starting* motor BFP mengenai pengaturan rele (Rele\_BFP) yang mengamankan motor BFP, sehingga rele akan bekerja ketika motor *starting*. Pada lingkaran 2 yaitu pengaman beban lebih motor tidak digunakan sehingga akan mempengaruhi umur motor apabila motor bekerja pada kondisi beban lebih secara kontinyu. Dan yang terahir pada lingkaran 3 kurva rele pengaman primer trafo memotong kurva rele

pengaman sekunder trafo, sehingga akan menyebabkan *overlap* pada pemutusan daya saat terjadi hubungan singkat.

Setelah dilakukan analisis terhadap kurva *TCC* pengaturan awal tipikal 1A, dapat diketahui bahwa perlu dilakukan pengaturan ulang terhadap koordinasi rele arus lebih tipikal 1A. Berikut ini perhitungan pengaturan ulang dari masing-masing rele arus lebih tipikal 1A.

**a. Rele\_BFP**

<i>Manufacture</i>	= ABB
Model	= REM 543
Tipe kurva	= Normal Inverse
Isc 4 cycle	= 28680 A
Isc 30 cycle	= 20150 A
FLA	= 395,3 A
LRA	= 2174,3 A
CT	= 400/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 395,3 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 395,3$$

$$415,1 \leq I_{set} \leq 553,5$$

*Tap current setting:*

$$\frac{415,1}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{553,5}{n_{CT}}$$

$$\frac{415,1}{400} \leq Tap \leq \frac{553,5}{400}$$

$$1,04 \leq Tap \leq 1,38$$

Dipilih Iset = 520 A

*Tap current setting* = 1,3

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 4 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{1,3 \times LRA}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{1,3 \times LRA}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{4 \times \left[ \left( \frac{2826,56}{520} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0,983$$

Dipilih TD = 0,99

*Instantaneous*

$$1,3 \times LRA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,3 \times 2174,3 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 20150$$

$$2826,56 \leq I_{set} \leq 16120$$

*Tap current setting:*

$$\frac{2826,56}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16120}{n_{CT}}$$

$$\frac{2826,56}{400} \leq Tap \leq \frac{16120}{400}$$

$$7,07 \leq Tap \leq 40,3$$

Iset dipilih = 3000 A

Tap = 7.5

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

#### **b. Rele\_UAT#1B**

*Manufacture* = ABB

*Model* = REX 521

*Tipe kurva* = Normal Inverse

*Isc 4 cycle* = 25240 A

*Isc 30 cycle* = 21090 A

*FLA* = 2291,1 A

*CT* = 4000/1

### Over Current Pick Up

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 2291,1 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 2291,1$$

$$2405,6 \leq I_{set} \leq 3207,5$$

### Tap current setting:

$$\frac{2405,6}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{3207,5}{n_{CT}}$$

$$\frac{2405,6}{4000} \leq Tap \leq \frac{3207,5}{4000}$$

$$0,60 \leq Tap \leq 0,80$$

Dipilih Iset = 2440 A

Tap current setting = 0,61

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 1,9 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,9 \times \left[ \left( \frac{25240}{2440} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.649$$

Dipilih TD = 0.65

### Instantaneous

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 2991,1 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 21090$$

$$3665,7 \leq I_{set} \leq 16872$$

*Tap current setting:*

$$\frac{3665,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16872}{n_{CT}}$$

$$\frac{3665,7}{4000} \leq Tap \leq \frac{16872}{4000}$$

$$0,92 \leq Tap \leq 4,22$$

Iset dipilih = 5120 A

Tap = 1,28

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,7 detik

### c. Rele\_UAT#1

*Manufacture* = AREVA

*Model* = P121

*Tipe kurva* = Standard Inverse

*Isc 4 cycle* = 25850 A (6,3 kV) → 8142,7 A (20 Kv)

*Isc 30 cycle* = 97720 A

*FLA* = 1443,4 A

*CT* = 2500/1

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 1443,4 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1443,4$$

$$1515,54 \leq I_{set} \leq 2020,73$$

*Tap current setting:*

$$\frac{1515,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{2020,73}{n_{CT}}$$

$$\frac{1515,4}{2500} \leq Tap \leq \frac{2020,73}{2500}$$

$$0,61 \leq Tap \leq 0,81$$

Dipilih Iset = 1525 A

*Tap current setting* = 0,61



*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 0,9

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{0,9 \times \left[ \left( \frac{8142,7}{1525} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.219$$

Dipilih TD = 0.22

*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 1443,4 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 97720$$

$$2309,4 \leq I_{set} \leq 78176$$

*Tap current setting:*

$$\frac{2309,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{78176}{n_{CT}}$$

$$\frac{2309,4}{2500} \leq Tap \leq \frac{78176}{2500}$$

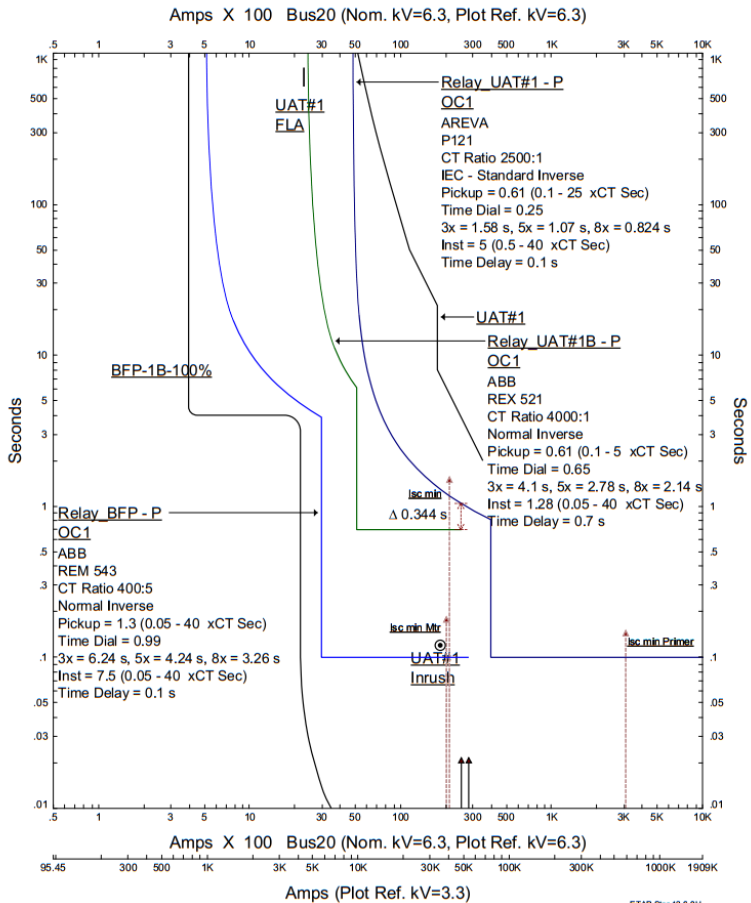
$$0,92 \leq Tap \leq 31,27$$

Iset dipilih = 12500 A

Tap = 5

*Time Delay*

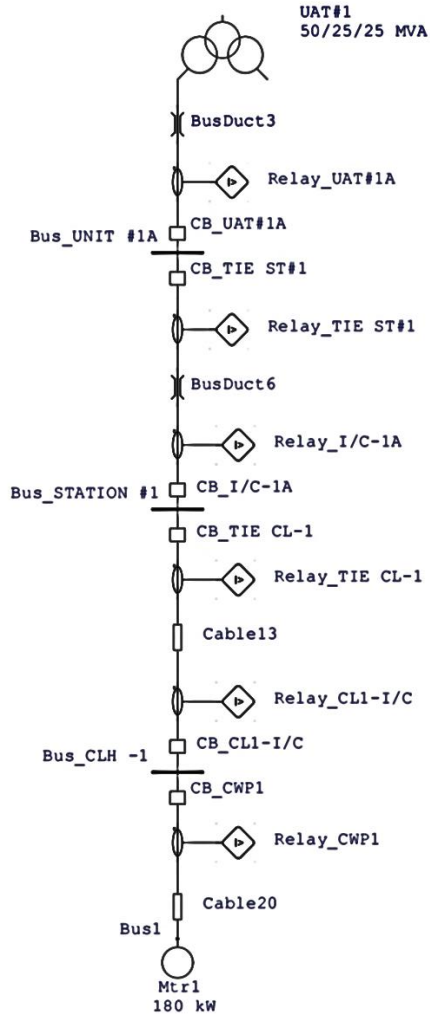
Dipilih *Time Delay* 0,1 detik



**Gambar 4.4** Kurva TCC pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 1A

### 4.3.2 Analisis Tipikal 2A

Pada tipikal 2A ini akan dilakukan analisis mengenai sistem pengaman yang terletak pada beban motor CWP-1A sampai UAT#1. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 2A

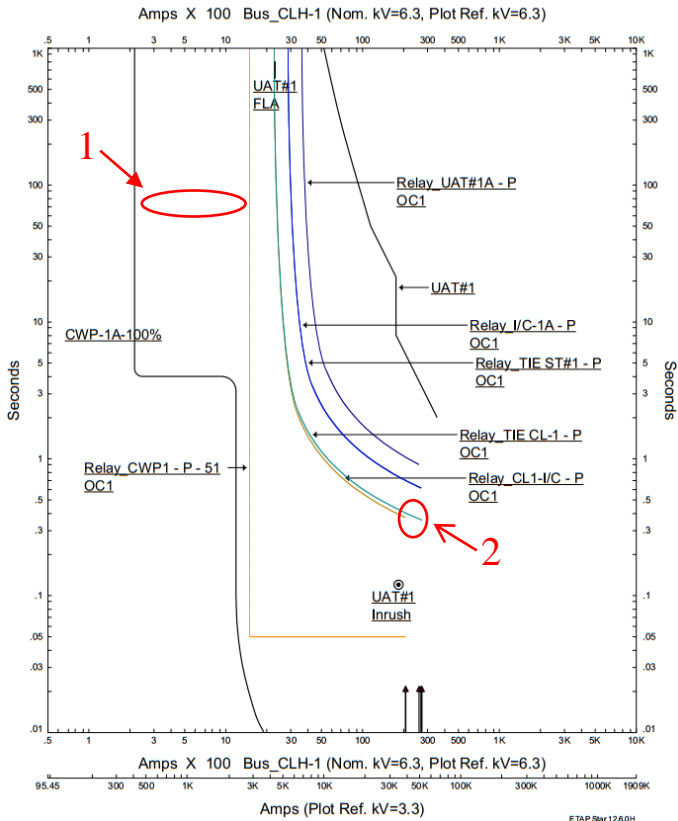
Data pengaturan awal pengaturan rele arus lebih dapat dilihat pada table 4.2 dibawah ini:

**Tabel 4.2** Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2A

Rele ID & Model	Pengaturan	
Rele_CWP1 ABB REM 543	Tipe kurva	Definite Time
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	5
	Rele Amper	25 – 2000
	Time Dial	0,05
	Instantaneous (NA)	
Rele_CL1-I/C ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	1,8
	Rele Amper	9 – 2250
	Time Dial	0,12
	Instantaneous (NA)	
Rele_TIE CL-1 ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	1,8
	Rele Amper	9 – 2250
	Time Dial	0,13
	Instantaneous (NA)	
Rele_I/C-1A ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	1,14
	Rele Amper	5,7 – 2850
	Time Dial	0,2
	Instantaneous (NA)	
Rele_TIE ST#1 ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	1,14
	Rele Amper	5,7 – 2850
	Time Dial	0,2
	Instantaneous (NA)	

Rele_UAT#1A ABB REX 521	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,1 – 5
	Pick Up	0,9
	Rele Amper	5,7 – 2850
	Time Dial	0,26
Instantaneous (NA)		

Pada koordinasi pengaman rele arus lebih tipikal 2A terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih perlu diperbaiki. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva *TCC* pengaman arus lebih pada gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Kurva *TCC* pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2A

Dari hasil plot kurva *TCC* rele arus lebih Tipikal 2A dapat dilihat masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 yaitu pengaman beban lebih motor tidak digunakan sehingga akan mempengaruhi umur motor apabila motor bekerja pada kondisi beban lebih secara kontinyu. Sedangkan pada lingkaran 2 untuk pengaman saluran Rele\_TIE CL-1 dan Rele\_CL1-I/C terdapat jeda waktu, sehingga waktu yang dibutuhkan dalam melokalisir gangguan akan semakin lama.

Setelah dilakukan analisis terhadap kurva *TCC* pengaturan awal tipikal 2A di atas, dapat diketahui bahwa perlu dilakukan pengaturan ulang terhadap koordinasi rele arus lebih tipikal 2A. Berikut ini perhitungan untuk *resetting* dari masing-masing rele arus lebih tipikal 2A.

**a. Rele\_CWP1**

<i>Manufacture</i>	= ABB
Model	= REM 543
Tipe kurva	= Normal Inverse
Isc 4 cycle	= 20730 A
Isc 30 cycle	= 15560 A
FLA	= 215,6 A
LRA	= 1185,9 A
CT	= 300/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 215,6 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 215,6$$

$$226,4 \leq I_{set} \leq 301,9$$

*Tap current setting:*

$$\frac{226,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{301,9}{n_{CT}}$$

$$\frac{226,4}{300} \leq Tap \leq \frac{301,9}{300}$$

$$0,75 \leq Tap \leq 1,01$$

Dipilih Iset = 300 A

*Tap current setting* = 1

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 4 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{1,3 \times LRA}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$
$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{1,3 \times LRA}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$
$$TD = \frac{4 \times \left[ \left( \frac{1541,7}{300} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0,951$$

Dipilih TD = 0,96

*Instantaneous*

$$1,3 \times LRA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,3 \times 1185,9 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 15560$$

$$1541,7 \leq I_{set} \leq 12448$$

*Tap current setting:*

$$\frac{1541,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{12448}{n_{CT}}$$

$$\frac{1541,7}{300} \leq Tap \leq \frac{12448}{300}$$

$$5,14 \leq Tap \leq 41,49$$

$$\text{Iset dipilih} = 1641 \text{ A}$$

$$\text{Tap} = 5,47$$

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

#### **b. Rele\_CL1-I/C**

*Manufacture* = ABB

*Model* = REX 521

Tipe kurva	= Normal Inverse
Isc 4 cycle	= 20540 A
Isc 30 cycle	= 16400 A
FLA	= 462,35 A
CT	= 1250/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 462,35 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 462,35$$

$$485,5 \leq I_{set} \leq 647,3$$

*Tap current setting:*

$$\frac{485,5}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{647,3}{n_{CT}}$$

$$\frac{485,5}{1250} \leq Tap \leq \frac{647,3}{1250}$$

$$0,39 \leq Tap \leq 0,52$$

Dipilih Iset = 500 A

Tap current setting = 0,4

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 1,5 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,5 \times \left[ \left( \frac{20540}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0,826$$

Dipilih TD = 0,83



*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$
$$1,6 \times 462,35 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 16400$$
$$739,8 \leq I_{set} \leq 13120$$

*Tap current setting:*

$$\frac{739,8}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{13120}{n_{CT}}$$
$$\frac{739,8}{1250} \leq Tap \leq \frac{13120}{1250}$$
$$0,59 \leq Tap \leq 10,5$$

Iset dipilih = 3225 A  
Tap = 2,58

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

### c. Rele\_TIE CL-1

*Manufacture* = ABB  
*Model* = REX 521  
*Tipe kurva* = Normal Inverse  
*Isc 4 cycle* = 20540 A  
*Isc 30 cycle* = 16400 A  
*FLA* = 462,35 A  
*CT* = 1250/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$
$$1,05 \times 462,35 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 462,35$$
$$485,5 \leq I_{set} \leq 647,3$$

*Tap current setting:*

$$\frac{485,5}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{647,3}{n_{CT}}$$

$$\frac{485,5}{1250} \leq Tap \leq \frac{647,3}{1250}$$

$$0,39 \leq Tap \leq 0,52$$

Dipilih Iset = 500 A

Tap current setting = 0,4

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 1,5 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,5 \times \left[ \left( \frac{20540}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0,826$$

Dipilih TD = 0,83

### Instantaneous

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 462,35 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 16400$$

$$739,8 \leq I_{set} \leq 13120$$

Tap current setting:

$$\frac{739,8}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{13120}{n_{CT}}$$

$$\frac{739,8}{1250} \leq Tap \leq \frac{13120}{1250}$$

$$0,59 \leq Tap \leq 10,5$$

Iset dipilih = 3225 A

Tap = 2,58

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

**d. Rele I/C-1A**

*Manufacture* = ABB  
*Model* = REX 521  
*Tipe kurva* = Normal Inverse  
*Isc 4 cycle* = 26800 A  
*Isc 30 cycle* = 21090 A  
*FLA* = 1322,3 A  
*CT* = 2500/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1322,3$$

$$1388,4 \leq I_{set} \leq 1851,2$$

*Tap current setting:*

$$\frac{1388,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{n_{CT}}$$

$$\frac{1388,4}{2500} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{2500}$$

$$0,55 \leq Tap \leq 0,74$$

Dipilih Iset = 1400 A

*Tap current setting* = 0,56

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 1,7 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02}} - 1$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,7 \times \left[ \left( \frac{26800}{1400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.738$$

Dipilih TD = 0,74

*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 21090$$

$$2115,7 \leq I_{set} \leq 16872$$

*Tap current setting:*

$$\frac{2115,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16872}{n_{CT}}$$

$$\frac{2115,7}{2500} \leq Tap \leq \frac{16872}{2500}$$

$$0,85 \leq Tap \leq 6,75$$

Iset dipilih = 4050 A

Tap = 1,62

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

#### e. Rele TIE ST#1

*Manufacture* = ABB

*Model* = REX 521

*Tipe kurva* = Normal Inverse

*Isc 4 cycle* = 26800 A

*Isc 30 cycle* = 21090 A

*FLA* = 1322,3 A

*CT* = 2500/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1322,3$$

$$1388,4 \leq I_{set} \leq 1851,2$$

*Tap current setting:*

$$\frac{1388,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{n_{CT}}$$

$$\frac{1388,4}{2500} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{2500}$$

$$0,55 \leq Tap \leq 0,74$$

Dipilih Iset = 1400 A

Tap current setting = 0,56

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 1,7 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,7 \times \left[ \left( \frac{26800}{1400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.738$$

Dipilih TD = 0,74

*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 21090$$

$$2115,7 \leq I_{set} \leq 16872$$

*Tap current setting:*

$$\frac{2115,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16872}{n_{CT}}$$

$$\frac{2115,7}{2500} \leq Tap \leq \frac{16872}{2500}$$

$$0,85 \leq Tap \leq 6,75$$

Iset dipilih = 4050 A

Tap = 1,62

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

#### **f. Rele\_UAT#1A**

*Manufacture* = ABB

*Model* = REX 521

*Tipe kurva* = Normal Inverse

*Isc 4 cycle* = 25850 A

*Isc 30 cycle* = 21090 A

*FLA* = 2291,1 A

*CT* = 4000/1

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 2291,1 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 2291,1$$

$$2405,6 \leq I_{set} \leq 3207,5$$

*Tap current setting:*

$$\frac{2405,6}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{3207,5}{n_{CT}}$$

$$\frac{2405,6}{4000} \leq Tap \leq \frac{3207,5}{4000}$$

$$0,60 \leq Tap \leq 0,80$$

Dipilih Iset = 2440 A

*Tap current setting* = 0,61

*Time Dial*

Dipilih waktu operasi (td) = 1,9 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,9 \times \left[ \left( \frac{25850}{2440} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.656$$

Dipilih TD = 0.66

*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 2991,1 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 21090$$

$$3665,7 \leq I_{set} \leq 16872$$

*Tap current setting:*

$$\frac{3665,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16872}{n_{CT}}$$

$$\frac{3665,7}{4000} \leq Tap \leq \frac{16872}{4000}$$

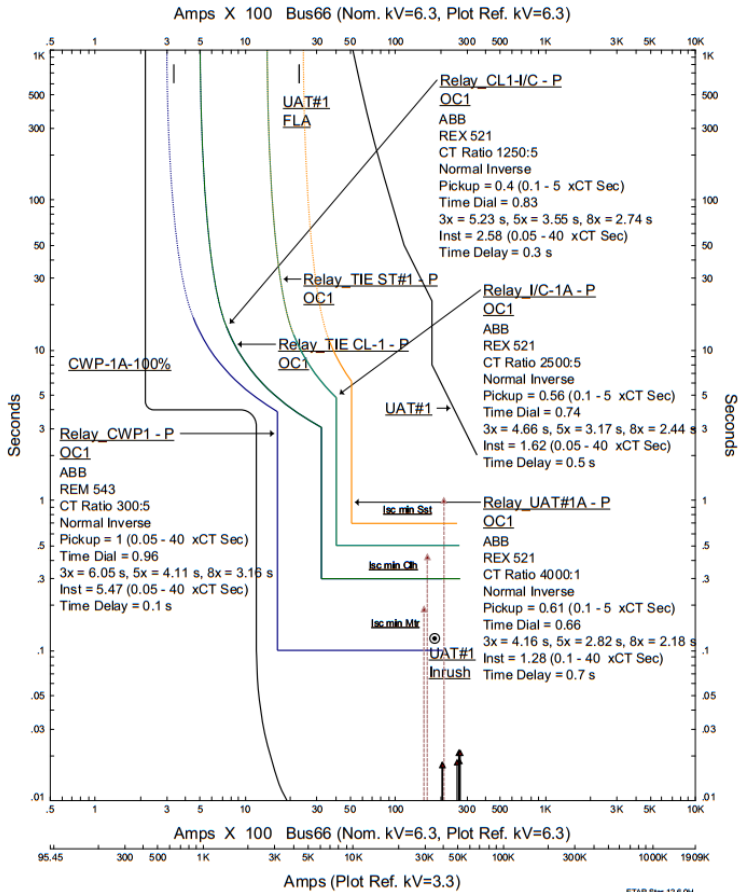
$$0,92 \leq Tap \leq 4,22$$

$$I_{set} \text{ dipilih} = 5120 \text{ A}$$

$$Tap = 1,28$$

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,7 detik

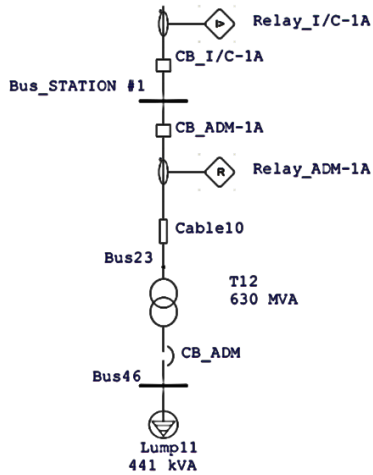


**Gambar 4.7** Kurva *TCC* pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 2A

### 4.3.3 Analisis Tipikal 2B

Pada tipikal 2B ini akan dilakukan analisis mengenai sistem pengaman antara Rele\_ADM-1A dan Rele\_I/C-1A. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.8.





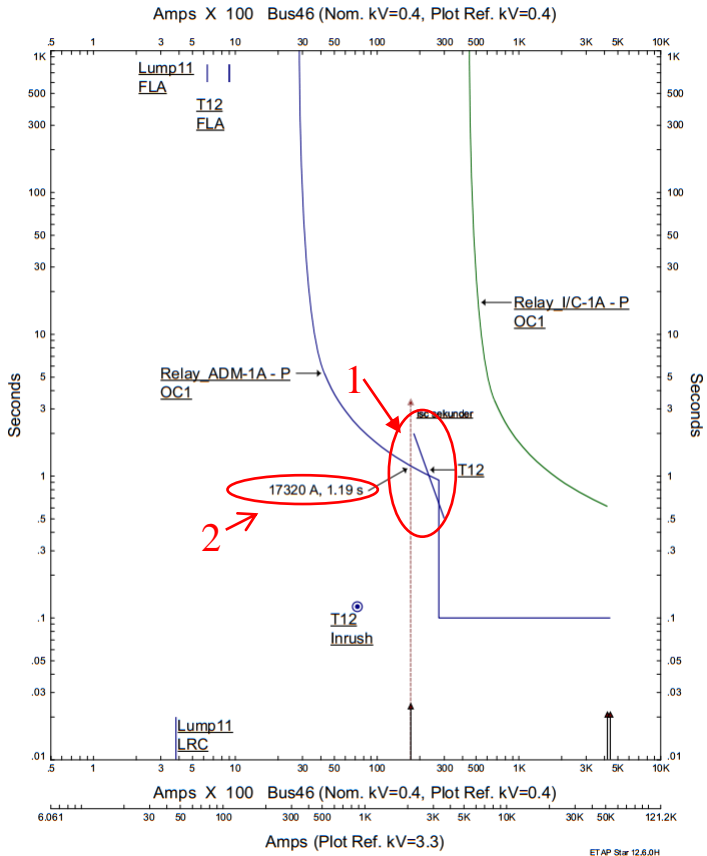
**Gambar 4.8** Diagram satu garis koordinasi pengaman tipikal 2B

Data pengaturan awal pengaturan rele arus lebih dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini:

**Tabel 4.3** Data pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2B

Rele_ADM-1A ABB REF 610	Tipe kurva	Normal Inverse
	Pick Up Range	0,3 – 5
	Pick Up	0,3
	Rele Amper	1,5 – 180
	Time Dial	0,31
	Instantaneous	
	Pick Up Range	0,5 – 35
	Pick Up	2,89
	Rele Amper	14,45 - 1734
	Time Delay	0,1
	Rele_I/C-1A ABB REX 521	Tipe kurva
Pick Up Range		0,1 – 5
Pick Up		1,14
Rele Amper		5,7 – 2850
Time Dial		0,2
Instantaneous (NA)		

Pada koordinasi pengaman rele arus lebih tipikal 2B terdapat beberapa koordinasi rele pengaman yang masih perlu diperbaiki. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada kurva *TCC* pengaman arus lebih pada gambar 4.9



**Gambar 4.9** Kurva *TCC* pengaturan rele pengaturan awal tipikal 2B

Dari hasil plot kurva *TCC* rele arus lebih Tipikal 2B dapat dilihat masih terdapat pengaturan rele yang kurang tepat. Pada lingkaran 1 menunjukan bahwa kurva rele menyentuh kurva *damage* trafo, sehingga apabila terjadi hubungan singkat maka isolasi trafo akan rusak. Sedangkan pada lingkaran 2 arus gangguan pada sisi sekunder trafo

dirasakan rele ADM-1A pada waktu 1,19 detik, sehingga butuh waktu yang lebih lama untuk melokalisasi gangguan.

Setelah dilakukan analisis terhadap kurva *TCC* pengaturan awal tipikal 2B di atas, dapat diketahui bahwa perlu dilakukan pengaturan ulang terhadap koordinasi rele arus lebih tipikal 2B. Berikut ini perhitungan untuk pengaturan ulang dari masing-masing rele arus lebih tipikal 2B.

**a. CB\_ADM-1A**

<i>Manufacture</i>	= Siemens
Model	= ETU45B
Isc 4 cycle	= 17310 A
Isc 30 cycle	= 14920 A
I sensor	= 1000 A
FLA	= 909,3 A

*Long Time Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ min}$$

$$1,05 \times 909,3 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 14920$$

$$954,77 \leq I_{set} \leq 11936$$

$$I_{set} = 1000 \text{ A}$$

$$LT \text{ Pick Up} = 1$$

$$LT \text{ Band} = 2$$

*Short Time Pick Up*

$$I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ min}$$

$$I_{set} \leq 0,8 \times 14920$$

$$I_{set} \leq 11936$$

$$I_{set} = 2000 \text{ A}$$

$$ST \text{ Pick Up} = 2$$

$$ST \text{ Band} = 0,3s$$

*Instantaneous = Disable*

**b. Rele\_ADM-1A**

<i>Manufacture</i>	= ABB
Model	= REF 610
Tipe kurva	= Normal Inverse

Isc 4 cycle	= 17310 A (0,4 kV) → 1099 A (6,3 kV)
Isc 30 cycle	= 17390 A
FLA	= 57,74 A
CT	= 600/5

### Over Current Pick Up

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 57,74 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 57,74$$

$$60 \leq I_{set} \leq 80,83$$

### Tap current setting:

$$\frac{60}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{80,83}{n_{CT}}$$

$$\frac{60}{600} \leq Tap \leq \frac{80,83}{600}$$

$$0,1 \leq Tap \leq 0,13$$

Dipilih Iset = 180 A

Tap current setting = 0,3

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 0,6 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{0,6 \times \left[ \left( \frac{1099}{180} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.157$$

Dipilih TD = 0,16

*Instantaneous*

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 57,74 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 17390$$

$$92,4 \leq I_{set} \leq 13912$$

*Tap current setting:*

$$\frac{92,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{13912}{n_{CT}}$$

$$\frac{92,4}{600} \leq Tap \leq \frac{13912}{600}$$

$$0,15 \leq Tap \leq 23,2$$

Iset dipilih = 1500 A

Tap = 2,5

*Time Delay*

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

**c. Rele\_I/C-1A**

d. *Manufacture* = ABB

Model = REX 521

Tipe kurva = Normal Inverse

Isc 4 cycle = 26800 A

Isc 30 cycle = 21090 A

FLA = 1322,3 A

CT = 2500/5

*Over Current Pick Up*

$$1,05 \times FLA \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA$$

$$1,05 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1322,3$$

$$1388,4 \leq I_{set} \leq 1851,2$$

*Tap current setting:*

$$\frac{1388,4}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{n_{CT}}$$

$$\frac{1388,4}{2500} \leq Tap \leq \frac{1851,2}{2500}$$

$$0,55 \leq Tap \leq 0,74$$

Dipilih Iset = 1400 A

Tap current setting = 0,56

### Time Dial

Dipilih waktu operasi (td) = 1,7 detik

$$td = \frac{K \times TD}{\left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1}$$

$$TD = \frac{td \times \left[ \left( \frac{I_{sc \max}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = \frac{1,7 \times \left[ \left( \frac{26800}{1400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TD = 0.738$$

Dipilih TD = 0,74

### Instantaneous

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min}$$

$$1,6 \times 1322,3 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 21090$$

$$2115,7 \leq I_{set} \leq 16872$$

Tap current setting:

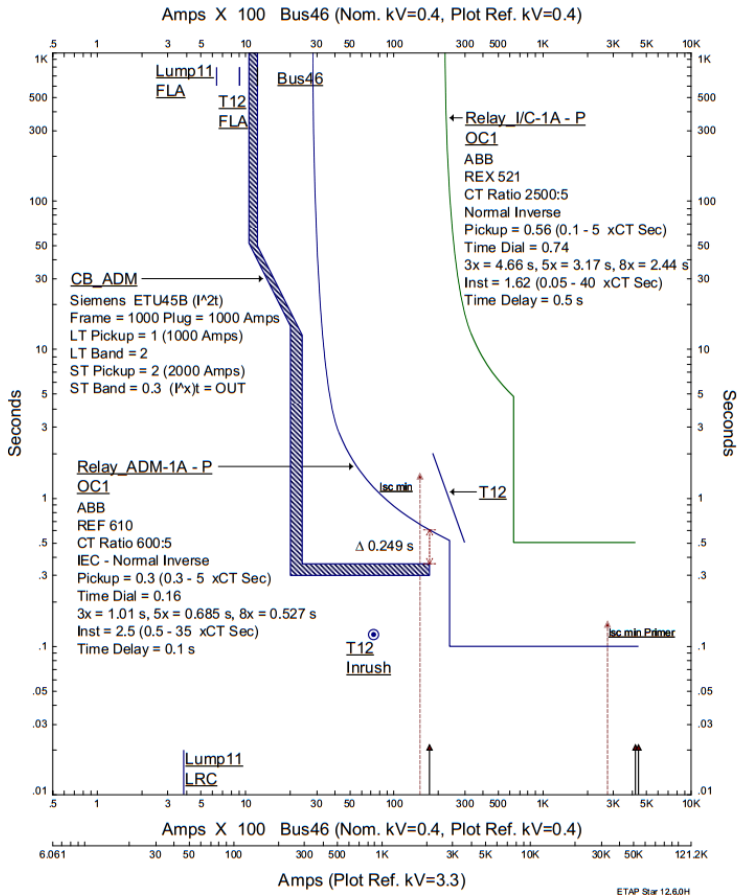
$$\frac{2115,7}{n_{CT}} \leq Tap \leq \frac{16872}{n_{CT}}$$

$$\frac{2115,7}{2500} \leq Tap \leq \frac{16872}{2500}$$

$$0,85 \leq Tap \leq 6,75$$

Iset dipilih = 4050 A  
 Tap = 1,62

*Time Delay*  
 Dipilih *Time Delay* 0,5 detik



**Gambar 4.10** Kurva TCC pengaturan rele pengaturan ulang tipikal 2B

Perbandingan hasil pengaturan ulang dengan pengaturan awal dapat dilihat pada tabel 4.4

**Tabel 4.4** Perbandingan hasil pengaturan pengatur awal dan pengaturan ulang

Rele ID	Pengaturan awal			Pengaturan ulang		
	Tipe Kurva	Pick Up	TD	Tipe Kurva	Pick Up	TD
<i>Low Set</i>						
UAT# 1	IEC-Standard Inverse	0,69	0,5	IEC-Standard Inverse	0,61	0,22
UAT# 1B	Normal Inverse	1	0,2	Normal Inverse	0,61	0,65
BFP-1B	Definite Time	5	0,05	Normal Inverse	1,3	0,99
UAT# 1A	Normal Inverse	0,9	0,26	Normal Inverse	0,61	0,66
I/C-1A	Normal Inverse	1,14	0,2	Normal Inverse	0,56	0,74
CL1 I/C	Normal Inverse	1,8	0,12	Normal Inverse	0,4	0,83
CWP-1A	Definite Time	5	0,05	Normal Inverse	1	0,96
ADM-1A	IEC-Normal Inverse	0,3	0,31	IEC-Normal Inverse	0,3	0,16
<i>High Set</i>						
UAT# 1	Instantaneous	1,05	0,3	Instantaneous	5	0,1
UAT# 1B	Not Used	-	-	Instantaneous	1,28	0,7
BFP-1B	Not Used	-	-	Instantaneous	7,5	0,1
UAT# 1A	Not Used	-	-	Instantaneous	1,28	0,7
I/C-1A	Not Used	-	-	Instantaneous	1,62	0,5
CL1 I/C	Not Used	-	-	Instantaneous	2,58	0,3
CWP-1A	Not Used	-	-	Instantaneous	5,47	0,1
ADM-1A	Instantaneous	2,89	0,1	Instantaneous	2,5	0,1





CT = 300/5  
 $10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$   
 $10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$   
 $30A \leq I_{set} \leq 150A$   
 Dipilih Iset = 30 A  
 Tap current setting = 0.1  
 Time delay = 0.1 s

**b. Rele\_CL1-I/C**

Manufacture = ABB  
 Model = REM 543  
 Rele Type = *Instantaneous*  
 Isc line to ground = 300 A  
 CT = 300/5  
 $10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$   
 $10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$   
 $30A \leq I_{set} \leq 150A$   
 Dipilih Iset = 30 A  
 Tap current setting = 0.1  
 Time delay = 0.3 s

**c. Rele\_TIE CL-1**

Manufacture = ABB  
 Model = REM 543  
 Rele Type = *Instantaneous*  
 Isc line to ground = 300 A  
 CT = 300/5  
 $10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$   
 $10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$   
 $30A \leq I_{set} \leq 150A$   
 Dipilih Iset = 30 A  
 Tap current setting = 0.1  
 Time delay = 0.3 s

**d. Rele\_I/C-1A**

*Manufacture* = ABB  
*Model* = REM 543  
*Rele Type* = *Instantaneous*  
*Isc line to ground* = 300 A  
*CT* = 300/5

$$10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$$

$$10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$$

$$30A \leq I_{set} \leq 150A$$

*Dipilih Iset* = 30 A  
*Tap current setting* = 0.1  
*Time delay* = 0.5 s

**e. Rele\_TIE ST#1**

*Manufacture* = ABB  
*Model* = REM 543  
*Rele Type* = *Instantaneous*  
*Isc line to ground* = 300 A  
*CT* = 300/5

$$10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$$

$$10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$$

$$30A \leq I_{set} \leq 150A$$

*Dipilih Iset* = 30 A  
*Tap current setting* = 0.1  
*Time delay* = 0.5 s

**f. Rele\_UAT#1A**

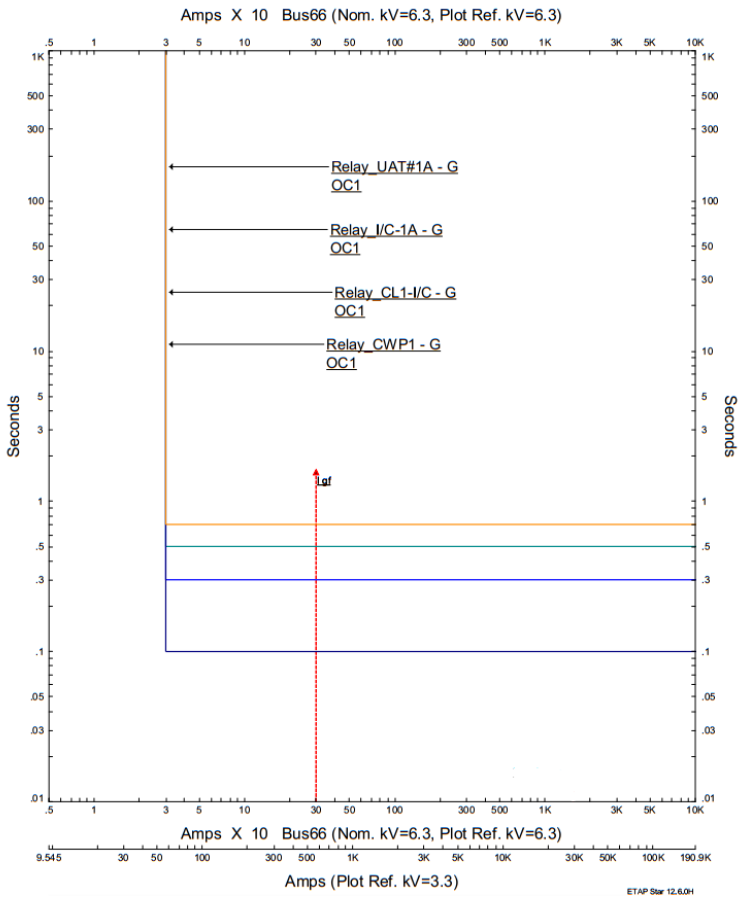
*Manufacture* = ABB  
*Model* = REM 543  
*Rele Type* = *Instantaneous*  
*Isc line to ground* = 300 A  
*CT* = 300/5

$$10\% \times I_{NGR} \leq I_{set} \leq 50\% \times I_{NGR}$$

$$10\% \times 300A \leq I_{set} \leq 50\% \times 300A$$

$$30A \leq I_{set} \leq 150A$$

Dipilih Iset = 30 A  
 Tap current setting = 0.1  
 Time delay = 0.7 s



**Gambar 4.12** Kurva TCC pengaturan rele GFR

#### 4.5 Hasil Simulasi Insiden Energi Busur Api

Dengan dilakukannya simulasi menggunakan Busur Api maka didapatkan nilai Insiden Energi Busur Api dan kategori insiden yang terjadi, selanjutnya akan dilakukan penyesuaian nilai Insiden Energi Busur Api dan kategori insiden dengan Alat Pelindung Diri (APD) sesuai dengan standar *NFPA 70E-2015*. Pada penelitian ini data Busur Api yang akan dianalisis adalah pada level tegangan menengah 6,3 kV. Untuk lebih jelasnya hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.5 dan tabel 4.6.

Pada tabel 4.4 akan ditunjukkan data hasil dari simulasi Insiden Energi Busur Api pada sistem pengaturan awal.

**Tabel 4.5** Data hasil simulasi Busur Api pada sistem pengaturan awal

Bus ID	Arus <i>Bolted Fault</i> (kA)	Arus <i>Arching</i> (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
Bus UNIT #1A	30,15	28,72	0,35	14,081	2
Bus UNIT #1B	28,94	27,59	0,35	13,481	2
Bus STATION #1	30,15	28,72	0,35	14,081	2
Bus CLH - 1	22,29	21,34	0,35	10,386	2
Bus CLH - 2	22,12	21,18	0,35	10,308	2
Bus STATION #2	29,81	28,40	0,35	13,922	2
Bus UNIT #2A	28,87	27,52	0,35	13,447	2
Bus UNIT #2B	29,81	28,40	0,35	13,922	2

Pada tabel 4.5 akan ditunjukkan data hasil dari simulasi Insiden Energi Busur Api pada sistem pengaturan ulang.

**Tabel 4.6** Data hasil simulasi Busur Api pada sistem pengaturan ulang

Bus ID	Arus Bolted Fault (kA)	Arus Arching (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm <sup>2</sup> )	Kategori
Bus UNIT #1A	30,15	28,72	0,750	30,174	3
Bus UNIT #1B	28,94	27,59	0,750	28,889	3
Bus STATION #1	30,15	28,72	0,550	22,128	2
Bus CLH - 1	22,64	21,67	0,350	10,386	2
Bus CLH - 2	22,48	21,52	0,350	10,308	2
Bus STATION #2	29,83	28,42	0,550	21,878	2
Bus UNIT #2A	28,87	27,52	0,750	28,815	3
Bus UNIT #2B	29,83	28,42	0,750	29,834	3

#### 4.6 Perhitungan Insiden Energi Busur Api Sesuai Standar IEEE 1584-2002

Selain dari hasil simulasi, nilai energi Busur Api juga dapat diperoleh dari perhitungan dengan standar *IEEE 1584-2002*. Nilai yang dicari ialah arus pencetusan *fault* ( $I_a$ ) dan energi insiden Busur Api ( $E$ ). Data yang diperlukan untuk perhitungan energi Busur Api adalah arus gangguan maksimal pada bus (gangguan 3 fasa  $\frac{1}{2}$  cycle) dan *fault clearing time* ( $t$ ). Selain itu juga diperlukan jarak/gap antar bus, jarak kerja/*working distance*, dan *X factor* standar *IEEE 1584-2002* yang disesuaikan dengan tegangan kerja pada tiap bus. Adapun perhitungannya dapat dilihat sebagai berikut:

##### 1. Bus UNIT #1A

$$I_{bf} = 30.15 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,75 \text{ s} \\
 D &= 914,4 \text{ mm} \\
 G &= 153 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}
 \log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\
 &= 0,00402 + 0,983 \log 30,15 \\
 &= 0,00402 + 0,983 \times 1,479 \\
 &= 1,458 \\
 I_a &= 10^{\log I_a} \\
 &= 28,72 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi (E)

$$\begin{aligned}
 \log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\
 &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(28,72) + 0,0011 \times 153 \\
 &= 1,077 \\
 E_n &= 10^{\log E_n} \\
 &= 11,93 \text{ J/cm}^2 \\
 E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \\
 &= 4,184 \times 1 \times 11,93 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}} \right) \\
 &= 126,2 \text{ J/cm}^2 \\
 &= 126,2 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\
 &= 30,162 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

## 2. Bus UNIT #1B

$$\begin{aligned}
 I_{bf} &= 28,94 \text{ kA} \\
 t &= 0,75 \text{ s} \\
 D &= 914,4 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned} \log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 28,94 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,461 \\ &= 1,441 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 27,59 \text{ kA} \end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi (E)

$$\begin{aligned} \log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(27,59) + 0,0011 \times 153 \\ &= 1,058 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 11,42 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 11,42 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}} \right) \\ &= 120,9 \text{ J/cm}^2 \\ &= 120,9 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 28,895 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

### 3. Bus STATION #1

$$I_{bf} = 30,15 \text{ kA}$$

$$t = 0,55 \text{ s}$$

$$D = 914,4 \text{ mm}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:



Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 30,15 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,479 \\ &= 1,458 \\ I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 28,72 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(28,72) + 0,0011 \times 153 \\ &= 1,076 \\ E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 11,93 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 11,93 \times \left(\frac{0,55}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 92,56 \text{ J/cm}^2 \\ &= 92,56 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 22,122 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

#### 4. Bus CLH -1

$$\begin{aligned}I_{bf} &= 22,64 \text{ kA} \\ t &= 0,35 \text{ s} \\ D &= 914,4 \text{ mm} \\ G &= 153 \text{ mm}\end{aligned}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 22,64 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,355 \\ &= 1,336\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 21,67 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(21,67) + 0,0011 \times 153 \\ &= 0,944\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 8,80 \text{ J/cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 8,80 \times \left(\frac{0,35}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 43,44 \text{ J/cm}^2 \\ &= 43,44 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 10,382 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

## 5. Bus CLH -2

$$I_{bf} = 22,48 \text{ kA}$$

$$t = 0,35 \text{ s}$$

$$D = 914,4 \text{ mm}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 22,48 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,352 \\ &= 1,333\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 21,52 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(21,52) + 0,0011 \times 153 \\ &= 0,941\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 8,73 \text{ J/cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 8,73 \times \left(\frac{0,35}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 43,12 \text{ J/cm}^2 \\ &= 43,12 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 10,305 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

## 6. Bus STATION #2

$$I_{bf} = 29,83 \text{ kA}$$

$$t = 0,55 \text{ s}$$

$$D = 914,4 \text{ mm}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 29,83 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,475 \\ &= 1,454\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 28,42 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(28,42) + 0,0011 \times 153 \\ &= 1,072\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 11,79 \text{ J/cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 11,79 \times \left(\frac{0,55}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 91,52 \text{ J/cm}^2 \\ &= 91,52 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 21,873 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

## 7. Bus UNIT #2A

$$I_{bf} = 28,87 \text{ kA}$$

$$t = 0,75 \text{ s}$$

$$D = 914,4 \text{ mm}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 28,87 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,460 \\ &= 1,440 \\ I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 27,52 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(27,52) + 0,0011 \times 153 \\ &= 1,057 \\ E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 11,39 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 11,79 \times \left(\frac{0,75}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 120,5 \text{ J/cm}^2 \\ &= 120,5 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 28,799 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

## 8. Bus UNIT #2B

$$I_{bf} = 29,83 \text{ kA}$$

$$t = 0,75 \text{ s}$$

$$D = 914,4 \text{ mm}$$

$$G = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan data tersebut, maka:

Mencari besar Arus pencetusan ( $I_a$ )

$$\begin{aligned}\log I_a &= 0,00402 + 0,983 \log I_b f \\ &= 0,00402 + 0,983 \log 29,83 \\ &= 0,00402 + 0,983 \times 1,475 \\ &= 1,454 \\ I_a &= 10^{\log I_a} \\ &= 28,42 \text{ kA}\end{aligned}$$

Mencari besar Insiden Energi ( $E$ )

$$\begin{aligned}\log E_n &= K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G \\ &= -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(28,42) + 0,0011 \times 153 \\ &= 1,072 \\ E_n &= 10^{\log E_n} \\ &= 11,79 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 11,79 \times \left(\frac{0,75}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914,4^{0,973}}\right) \\ &= 124,8 \text{ J/cm}^2 \\ &= 124,8 \text{ J/cm}^2 \times 0,239 \\ &= 29,827 \text{ cal/cm}^2\end{aligned}$$

#### **4.7 Perbandingan Insiden Energi Busur Api Kondisi Pengaturan ulang Antara Simulasi dan Perhitungan**

Perbandingan antara perhitungan manual dan hasil simulasi pengaturan ulang perlu dilakukan agar diketahui kesalahan dari analisis Busur Api. Pada tabel 4.7 dibawah ini akan ditunjukkan perbandingan serta persentase eror antara simulasi dan perhitungan.

**Tabel 4.7** Perbandingan nilai Insiden Energi Busur Api antara simulasi dan perhitungan.

ID Bus	Simulasi	Perhitungan	Eror %
Bus UNIT #1A	30,174	30,162	0.04
Bus UNIT #1B	28,889	28,895	0,02
Bus STATION #1	22,128	22,122	0,03
Bus CLH -1	10,386	10,382	0,04
Bus CLH -2	10,308	10,305	0.03
Bus STATION #2	21,878	21,873	0,02
Bus UNIT #2A	28,815	28,799	0,06
Bus UNIT #2B	29,834	29,827	0,02

#### 4.8 Perbandingan Insiden Energi Busur Api Kondisi Pengaturan awal dan Pengaturan ulang

Setelah dilakukan simulasi energi Busur Api pada kondisi pengaturan awal dan pengaturan ulang, serta perhitungan energi Busur Api pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, maka dapat dilakukan perbandingan dari hasil simulasi dan hasil perhitungan tersebut. Perbandingan besar energi Busur Api dapat dilihat pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Perbandingan nilai Insiden Energi Busur Api antara pengaturan awal dan pengaturan ulang.

ID Bus	Pengaturan awal		Pengaturan ulang	
	Insiden Energi $cal/cm^2$	Level	Insiden Energi $cal/cm^2$	Level
Bus UNIT #1A	14,081	2	30,174	3
Bus UNIT #1B	13,481	2	28,889	3

Lanjutan tabel 4.8

Bus STATION #1	14,081	2	22,128	2
Bus CLH - 1	10,386	2	10,386	2
Bus CLH - 2	10,308	2	10,308	2
Bus STATION #2	13,922	2	21,878	2
Bus UNIT #2A	13,447	2	28,815	3
Bus UNIT #2B	13,922	2	29,834	3

#### 4.9 Perhitungan Batas perlindungan busur api

Dari hasil perhitungan besar Insiden Energi Busur Api di atas, maka dapat dihitung *protection boundary* dari bus tersebut. *Protection boundary* ialah batasan daerah kerja atau jarak aman pekerja yang bekerja disekitar daerah bertegangan. Jarak aman pekerja ini merupakan batasan jarak dari titik Busur Api dimana pekerja masih aman meskipun tanpa memakai Alat Pelindung Diri (APD). Perhitungan ini menggunakan insiden energi sebesar 5,0 J/cm<sup>2</sup> berdasarkan batas perlindungan busur api pada *IEEE 1584-2002*. Berikut ini perhitungan batas perlindungan busur api pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang.

##### 1. Bus UNIT #1A

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,93 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\
 &= 25246,9mm \\
 &= 25,3m
 \end{aligned}$$



## 2. Bus UNIT #1B

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,42 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 24142,5mm \\ &= 24,2m \end{aligned}$$

## 3. Bus STATION #1

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,93 \times \left( \frac{0,55}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 18355,8mm \\ &= 18,4m \end{aligned}$$

## 4. Bus CLH -1

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 8,80 \times \left( \frac{0,35}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 8436,5mm \\ &= 8,5m \end{aligned}$$

**5. Bus CLH -2**

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 8,73 \times \left( \frac{0,35}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 8371,4mm \\ &= 8,4m \end{aligned}$$

**6. Bus STATION #2**

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,79 \times \left( \frac{0,55}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 18143,1mm \\ &= 18,2m \end{aligned}$$

**7. Bus UNIT #2A**

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,39 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ &= 24078,7mm \\ &= 24,1m \end{aligned}$$

## 8. Bus UNIT #2B

Perhitungan Batas perlindungan busur api:

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[ 4,184 \times C_f \times E_n \times \left( \frac{t}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[ 4,184 \times 1 \times 11,79 \times \left( \frac{0,75}{0,2} \right) \times \left( \frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\
 &= 24954,4 \text{ mm} \\
 &= 25 \text{ m}
 \end{aligned}$$

### 4.10 Perbandingan Nilai Batas perlindungan busur api (FPB)

Setelah dilakukan simulasi pada kondisi pengaturan awal dan pengaturan ulang, serta perhitungan batas perlindungan busur api pada PLTU Rembang, maka dapat dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Perbandingan besar nilai batas perlindungan busur api dapat dilihat pada tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Perbandingan Batas perlindungan busur api Kondisi Pengaturan awal, Pengaturan ulang dan Hitungan.

Bus ID	Pengaturan awal <i>FPB</i> (m)	Pengaturan ulang Simulasi <i>FPB</i> (m)	Pengaturan ulang Perhitungan <i>FPB</i> (m)
Bus UNIT #1A	11,486	25,139	25,247
Bus UNIT #1B	10,984	24,040	24,143
Bus STATION #1	11,486	18,278	18,356
Bus CLH -1	8,401	8,401	8,437
Bus CLH -2	8,336	8,336	8,371
Bus STATION #2	11,353	18,066	18,143
Bus UNIT #2A	10,955	23,976	24,079
Bus UNIT	11,353	24,848	24,954

#2B			
-----	--	--	--

Dari tabel perbandingan di atas dapat dilihat bahwa pada kondisi pengaturan ulang jarak batas perlindungan busur api menjadi lebih dekat. Hal ini dikarenakan batas perlindungan busur api dipengaruhi oleh besar insiden energi. Semakin besar insiden energi maka semakin jauh jarak aman untuk pekerja, dan semakin kecil insiden energi maka semakin dekat jarak aman untuk pekerja. Untuk hasil simulasi dan perhitungan batas perlindungan busur api, jarak yang didapatkan tidak terlalu berbeda. Dari hasil batas perlindungan busur api tersebut maka dapat diketahui batas jarak aman bagi pekerja yang tidak memakai APD, jika melebihi batas tersebut maka pekerja wajib memakai APD yang sesuai dengan level insiden energi.

#### **4.11 Analisis Penentuan Alat Pelindung Diri (Alat Pelindung Diri, APD)**

Alat Pelindung Diri (APD) ialah alat pelindung diri (APD) bagi pekerja yang wajib digunakan saat bekerja pada daerah yang bertegangan dan beresiko timbul Busur Api. Berdasarkan standar *NFPA 70E 2015* dengan memperhatikan kategori bahaya atau resiko Busur Api, maka Alat Pelindung Diri dikategorikan berdasarkan besar insiden energi pada Busur Api.

Berdasarkan analisis Busur Api pada PT. PJB UBJOM PLTU Rembang pada kondisi pengaturan awal, diketahui bahwa terdapat bus atau daerah kerja yang memiliki kategori level insiden energi di luar standar *NFPA 70E 2015* (lebih besar dari level insiden energi yang ditentukan NFPA), sehingga untuk APD tidak dapat ditentukan. Setelah dilakukan pengaturan ulang pada rele pengaman, nilai insiden Busur Api dapat diturunkan dan sesuai dengan level insiden energi standar *NFPA 70E 2015*. Alat Pelindung Diri pada setiap daerah kerja berbeda-beda sesuai dengan level insiden energi yang mungkin timbul pada daerah tersebut. Penentuan APD sesuai dengan bus dan level insiden energi dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Dengan mengetahui besar insiden energi Busur Api di daerah kerja bertegangan, maka pekerja wajib untuk menggunakan APD yang sesuai saat bekerja di daerah bertegangan tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengurangi dampak dari Busur Api yang mungkin timbul.

**Tabel 4.10** Penentuan APD sesuai dengan bus dan level insiden energi.

No	ID Bus	Level	APD
1	Bus CLH -1	2	<p>PCC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang dan celana yang tahan api atau penutup seluruh tubuh, pelindung wajah, dan balaclava</li> <li>2. Jaket yang tahan api</li> </ol> <p>PEE:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Helm safety</li> <li>2. Kacamata <i>safety</i></li> <li>3. Pelindung pendengaran</li> <li>4. Sarung tangan kulit</li> <li>5. Sepatu kulit</li> </ol>
2	Bus CLH -2	2	
3	Bus STATION #1	2	
4	Bus STATION #2	2	
5	Bus UNIT #1A	3	<p>PPC:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemeja lengan panjang tahan api, celana yang tahan api, penutup seluruh tubuh yang tahan api, pelindung wajah yang tahan api</li> <li>2. Jaket yang tahan api</li> </ol> <p>APD:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Helm safety</li> <li>2. Kacamata <i>safety</i></li> <li>3. Pelindung pendengaran</li> <li>4. Sepatu kulit</li> </ol>
6	Bus UNIT #1B	3	
7	Bus UNIT #2A	3	
8	Bus UNIT #2B	3	

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis sistem koordinasi pengaman yang telah dilakukan pada sistem kelistrikan PT. PJB UBJOM PLTU Rembang, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi ETAP diketahui koordinasi pengaman sistem eksisting PT PJB UBJOM PLTU Rembang masih butuh perbaikan.
2. Beberapa rele arus lebih belum terkoordinasi dengan baik, hal ini dapat menyebabkan *CB* pada sisi hulu bekerja terlebih dahulu saat terjadi gangguan. Serta beberapa rele tidak melindungi peralatan dengan semestinya yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan apabila terjadi gangguan.
3. Setelah dilakukan pengaturan ulang, didapatkan tingkatan waktu antar rele yang tepat sesuai dengan standar untuk mengamankan peralatan, serta didapatkan nilai insiden energi Busur Api sesuai dengan standar *IEEE 1584-2002*.
4. Waktu rele merasakan gangguan sampai dengan memerintah *CB* untuk bekerja mempengaruhi nilai insiden energi Busur Api. Semakin cepat *CB* bekerja untuk memutus gangguan, semakin kecil pula nilai insiden energi yang akan timbul.
5. Rata-rata terjadi kenaikan nilai insiden energi Busur Api pada bus-bus tegangan 6.3 kV, hal ini disebabkan pada saat kondisi pengaturan awal rele bekerja terlalu cepat dan belum terkoordinasi dengan baik. Besar energi Busur Api pada Bus UNIT #1A semula 14,081 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 30,17 cal/cm<sup>2</sup>, pada Bus UNIT #1B nilai insiden energi semula 13,481 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 28,89 cal/cm<sup>2</sup>, pada Bus STATION #1 nilai insiden energi semula 14,081 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 22,13 cal/cm<sup>2</sup>. Hanya Bus CLH-1 dan Bus CLH-2 yang nilainya tetap.
6. Dengan mengetahui nilai insiden energi Busur Api pada setiap bus level tegangan menengah, dapat diperoleh klasifikasi APD yang wajib digunakan oleh pekerja sesuai dengan standar *NFPA 70E 2015*.

## 5.2 Saran

1. Berdasarkan pengaturan rele pengaman yang didapat dan hasil dari koordinasi arus waktu pengaturan ulang dapat dijadikan pertimbangan dan referensi dalam melakukan pengaturan rele pengaman.
2. Diharapkan untuk selanjutnya dapat dilakukan studi untuk mengurangi dan menurunkan nilai insiden energi dengan menggunakan rele *differential*.
3. Setelah diketahui nilai insiden energi Busur Api di area tegangan menengah, diharapkan para pekerja dapat menggunakan APD sesuai dengan kategori level insiden energi di area kerja tersebut.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Atlanta, Georgia, "*Protection Planning And System Design To Reduce Arc Flash Incident Energy In A Multi-Voltage Level Distribution System To 8 Cal/Cm<sup>2</sup> (Hrc 2) Or Less – Part Ii: Analysisieee*", IEEE Transaction, Paper no 978-1-4244-5674-1/10, 2010
- [2] IEEE 1584, IEEE "*Guide for Performing Arc Flash Hazard calculations*", 2002
- [3] Simms, J., Johnson, G., "*Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy*", IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 49, No. 2, pp 803, April, 2013.
- [4] Chuan Hel, Baohui Zhangl, Yeye Yuanl, Yongshang Jil, Zhiqian Bo2. "*Relay Protection Setting Calculation System in Distribution Network*". State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, pp. 1-3. China, September, 2016.
- [5] Anupreyaa K, Anupreyaa K, "*Relay Coordinatrion for Distribution System*". St.Joseph's college of engineering, pp.1- 4. India, Maret, 2016.
- [6] Blackburn, J. Lewis, "*Protection Relay Principle and Application*", New York: CRC Press, 2006. Third Edition..
- [7] Lazar, Irwin "*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plant*", McGraw-Hill Inc., USA, Ch, 1, 1980
- [8] Keller, Kimberlay, "*Electrical Safety Code Manual*", Elsevier, Inc., USA, Ch. 7, 2010.
- [9] IEEE, "*Protection and Coordination of Industrial and Comercial Power System*", New York: Institue of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 2001.
- [10] Irsad Taufiqi, Moch, "*Analisis Arc Flash Pada Sistem Kelistrikan di Pt. Asahimas Flat Glass Tbk, Sidoarjo – Jawa Timur*", Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2015

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## INDEKS

### A

*ABSTRACT*, Xi, Xv  
Aliran Daya, 3, 27  
Analisis, Iii, Xvi, 2, 3, 4, 28, 37,  
50, 78, 83  
Arus, Ix, Xvii, Xix, 2, 6, 8, 9, 10,  
11, 12, 13, 14, 29, 30, 31, 38,  
39, 40, 51, 52, 53, 59, 64, 81

### B

Busur Api, I, Ii, Iv, Ix, X, Xiii

### C

Pemutus daya, Ix, Xi  
*Cycle*, 31, 32, 34, 40, 42, 43, 45,  
46, 48, 53, 54, 55, 64

### D

Daya, 1, 21, 27, 31  
*Definite Time*, 10, 29, 38, 58  
Delay, 13, 60, 61, 62  
*Demage*, 52  
Distribusi, 1, 4, 5

### E

Pengaturan awal, Xvii, Xix, 2, 3,  
27, 29, 30, 31, 38, 39, 40, 51,  
52, 53, 57, 58, 63, 73, 77, 78, 81  
*Extremely Inverse*, 10

### F

Fasa, Ix, Xvii, 2, 6, 7, 8, 14, 59, 64  
*FPB*, Ix, Xi, Xvi, 77

### G

*Grading Time*, Ix, Xi, 81  
Grid, 27

### H

*High Set*, 58  
*Hubungan Singkat*, Ix, 3, 5, 6, 7, 8,  
9, 13, 14, 31, 52, 59

### I

Impedansi, 6, 7, 8  
*Instantaneous*, Xvii, 11, 12  
*Instantaneous*, 11, 29, 32, 33, 35,  
38, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49,  
51, 53, 55, 56, 58, 59, 60, 61  
Isolasi, 52

### K

Koordinasi, Ix, Xvii, 1, 2, 3, 4, 5,  
27, 28, 29, 30, 31, 37, 39, 40,  
51, 52, 53, 59, 81  
Kurva, 10, 29, 30, 31, 39, 40, 52,  
53, 59

### L

*Low Set*, 58

### M

Metodelogi, Xv, 2

## N

Normal Inverse, 29, 31, 32, 38, 39,  
40, 41, 43, 45, 46, 48, 51, 53,  
55, 58

## O

*Overcurrent*, Xi

## P

Pemodelan, Xvi, 3, 27  
Pengaman, Ix, Xvii, 1, 2, 3, 4, 5, 8,  
9, 11, 13, 14, 27, 28, 29, 30, 37,  
39, 40, 50, 51, 52, 59, 78, 81  
*Pickup*, 10  
Plot, 5, 30, 40, 52  
*PPE*, Ix, Xi, Xv, Xvi, Xix, 1, 2, 3,  
4, 5, 18, 19, 63, 74, 78, 79, 82

## R

Rele, 29, 30, 31, 32, 38, 39, 40, 41,  
43, 45, 46, 48, 50, 51, 53, 55,  
59, 60, 61, 83  
Relevansi, Xv, 4

Pengaturan ulang, Ix, Xi, Xvii,  
Xix, 2, 31, 36, 40, 50, 53, 57,  
58, 63, 64, 72, 73, 77, 78, 81

## S

Saluran, 5, 40  
*Setpoint*, 10  
Pengaturan, Xvii, Xix, 1, 2, 3, 4,  
11, 12, 27, 29, 30, 31, 32, 33,  
34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42,  
43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,  
51, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59,  
60, 61, 62, 81  
Perangkat lunak, 2  
*Standart Inverse*, 10  
Tunak, 27

## T

*Time Dial*, Xix, 12, 13  
Tipikal, Xvi, 27, 28, 30, 37, 40, 50,  
52  
Trafo, 3, 12, 21, 22, 27, 59  
Trip, Ix, 10, 11

## V

*Very Inverse*, 10

## BIOGRAFI PENULIS



A'raaf Aji Setiyawan lahir di Grobogan 21 Agustus 1994. Mulai menempuh pendidikan di SD N Guci pada tahun (2001-2007), MTs N Kudus tahun (2007-2010), dan SMA N 1 Purwodadi tahun (2010-2013). Setelah lulus sekolah, penulis melanjutkan kuliah di D3 Teknik Elektro Universitas Diponegoro tahun (2013-2016). Pada tahun 2017, penulis melanjutkan studi di program Lintas Jalur Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya Jurusan Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Jika ada keperluan dapat menghubungi di email [araafs3@gmail.com](mailto:araafs3@gmail.com)

